DANIEL FELIPE SEMPÉRTEGUI TAPIA

ESTUDO TEÓRICO – EXPERIMENTAL DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO DURANTE A EVAPORAÇÃO CONVECTIVA NO INTERIOR DE CANAIS COM DIÂMETRO REDUZIDO.

Dissertação Apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para a obtenção do titulo de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

ORIENTADOR: Professor Gherhardt Ribatski

São Carlos

2011

Este exemplar trata-se da versão corrigida. A versão original encontra-se disponível junto ao departamento de engenharia mecânica da EESC-USP.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S473e

Sempértegui, Daniel Felipe.
Estudo teórico-experimental dos padrões de escoamento durante a evaporação convectiva no interior de canais com diâmetro reduzido. / Daniel Felipe Sempértegui; orientador Gherhardt Ribatski. São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica e Área de Concentração Térmica e Fluídos) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Escoamento bifásico. 2. Microcanais. 3. Evaporação convectiva. 4. Padrões de escoamento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Licenciado **DANIEL FELIPE SEMPERTEGUI TAPIA.**

Dissertação defendida e julgada em 29/04/2011 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

Prof. Dr. **GHERHARDT RIBATSKI - (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **JULIO CESAR PASSOS**
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

APROVADO

Profª. Drª. **MAÍRA MARTINS DA SILVA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Associado **MARCELO AREIAS TRINDADE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenheira Mecânica

Prof. Associado **PAULO CESAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico esta tesis de maestria a mis padres, Eloina Tapia y Jaime Sempértegui, por toda la confianza que depositaron em mi persona y por el apoyo incondicional y constante en todos los ámbitos a lo largo de mi vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a meu orientador, o professor Gherhardt Ribastki, pela confiança depositada em mim, apoio contínuo, excelente orientação, formação acadêmica e amizade brindada no decorrer do mestrado.

A meus irmãos Aldo, Gabriela, Diego e Yerko, que sempre confiaram em mim e estiveram presentes para me apoiar com qualquer coisa. Ao resto de familiares, primos, tios e sobrinhos pela força e ânimo brindado. Aos amigos que me dedicaram sua amizade sincera antes e durante o decorrer do curso.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pela bolsa de estudos a mim concedida (N° Processo 2008/56930-8).

Um agradecimento especial ao professor William Gonzáles, pela formação acadêmica durante a graduação e o apoio e amizade dedicados até agora.

A Jose Roberto Bogni, pela amizade e dedicação na preparação e manutenção da bancada experimental utilizada neste estudo.

Ao grupo de trabalho envolvido em microcanais: Cristiano Tibiriçá, Alan Oliveira, Alexandre Arcanjo, Jaqueline Diniz, Juliano Freitas e Caio Lourenço não só pela ajuda na aquisição de dados, montagem de algum dispositivo experimental, implementação de algum programa ou análise de resultados experimentais, mas também pela amizade.

Ao pessoal do laboratório de refrigeração: Francisco Nascimento, Fabio Kanizawa, Franciane Motta, Anderson Ubices, Gustavo Barba, Renan Sasahara, Hugo Leão, Taye Mogaji, Marcio Ota, Francismara Cabral e Vanessa Santos, pela amizade ao longo da elaboração desta dissertação.

Aos professores Antonio Moreira, Paulo Seleghim e Jose Sainz Jabardo, pela formação acadêmica e aos técnicos Jorge Nicolau dos Santos e Roberto, pela colaboração durante o mestrado.

À Universidade de São Paulo, USP, e à Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

RESUMO

SEMPÉRTEGUI, D. F. **Estudo teórico-experimental dos padrões de escoamento durante a evaporação convectiva no interior de canais com diâmetro reduzido.** 2011. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Em linhas gerais, esta dissertação de mestrado envolve o estudo de padrões de escoaomento durante a ebulição convectiva em microcanais. Resultados experimentais foram levantados para um tubo com diâmetro de 2,32 mm durante a evaporação convectiva dos refrigerantes R134a e R245fa. Para a investigação, técnicas experimentais e de análise foram desenvolvidas. A caracterização dos padrões de escoamento envolveu o tratamento simultâneo de sinais provenientes dos seguintes dispositivos: um par diodo/sensor-laser tendo um tubo transparente entre eles no interior do qual ocorre o escoamento bifásico; um transdutor de pressão piezo-elétrico de tamanho reduzido com o objetivo de determinar a variação local da pressão do escoamento; e de um micro-termopar em contato com o fluido refrigerante. A técnica de tratamento de dados utilizada envolve a aglomeração progressiva de dados que apresentem características médias similares através do algoritmo *k-means*. Os sinais de pressão, intensidade de radiação e temperatura foram adquiridos simultaneamente a uma freqüência de 25 kHz. Imagens simultâneas do escoamento bifásico a uma velocidade de captura em torno de 10.000 imagens/s foram levantadas através de uma câmera de filmagem rápida (até 100.000 imagens/s), e os padrões de escoamentos observados contrastados aos resultados fornecidos pelo método proposto. Baseado nesta análise, mapas de escoamento foram propostos, os quais incorporaram não apenas critérios subjetivos como a visualização, mas também objetivos como as variações transientes da pressão local do escoamento e da morfologia do escoamento através do seu efeito na dispersão da radiação emitida pelo foto-diodo. Os resultados previstos pelo método objetivo apresentam concordância razoável com os dados caracterizados com base em visualizações. Adicionalmente, características de bolhas alongadas foram determinadas.

Palavras chave: *escoamento bifásico, microcanais, evaporação convectiva, padrões de escoamento.*

ABSTRACT

SEMPÉRTEGUI, D. F. **Experimental study of the two-phase flow patterns during convective boiling in microchannels.** 2011. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

The present research has been focused on the study of flow patterns inside channels of diameter less than 3 mm during the convective evaporation of refrigerants such as R134a and R245fa. For the investigation of such topics, experimental techniques and methods of analysis of results were developed. A broad database was gathered in an experimental test facility. The characterization of flow patterns involved the simultaneous processing of signals from the following devices: a pair diode / laser-sensor having a transparent tube between them, within which occurs the two-phase flow; a micro piezoelectric pressure transducer to determine the local variation of pressure of the flow and a micro-thermocouple fixed within the fluid. The technique used in data processing involves the gradual agglomeration of data having similar average characteristics; this method was developed based on the k-means clustering algorithm. The signals from the transducers were acquired simultaneously at a frequency of 25 kHz. The program for the acquisition and for processing of the signals was developed using LabView. Simultaneous images of two-phase flow at a speed of capture around 10,000 images / s were obtained through a high speed camera and the observed flow patterns were contrasted to the results provided by the objective method. Based on this analysis, flow maps were proposed, which incorporate not only subjective criteria such as visualization, but also objective criteria like the transient variations of local pressure of the flow, temperature of the fluid and the effect of the flow morphology based on the dispersion of light which effect was captured by the photo-diode. The maps obtained by the objective method were compared against flow pattern segregated based on visualization and a reasonable agreement was obtained. Besides the elongated bubble characteristics were determined.

Key words: *two-phase flow, microchannels, convective boiling, flow pattern.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Padrões de escoamento em tubos verticais segundo Collier e Thome (1996). 35

Figura 2.2 - Padrões de escoamento observados por Barbieri (2005)..... 36

Figura 2.3 - Mapa de padrões de escoamento de Baker (1954). 38

Figura 2.4 - Mapa de padrões de escoamento proposto por Mandhane et al. (1974). 40

Figura 2.5 - Ilustração esquemática do escoamento estratificado segundo Taitel e Duckler (1976)..... 41

Figura 2.6 - Efeito do diâmetro na transição entre padrões de escoamento segundo o método de Kattan et al. (1998). R134a, T_{sat} = 31°C. 44

Figura 2.7 - Efeito da temperatura de saturação na transição entre padrões de escoamento segundo o método de Kattan et al. (1998), R134a ,D = 3 mm. 45

Figura 2.8 - Efeito do diâmetro na transição entre padrões de escoamento segundo Wojtan et al. (2004). R22, G = 300 kg/m²s, T_{sat} = 5 °C, ϕ = 57,5 kW/m². 46

Figura 2.9 - Efeito da temperatura de saturação segundo o método proposto por Wojtan et al. (2004). R22, G = 300 kg/m²s, D = 13,5 mm, ϕ = 57,5 kW/m². 47

Figura 2.10 - Características do sinal para o padrão Bolhas, Jones e Zuber (1975). ... 49

Figura 2.11 - Características do sinal para o padrão Intermitente, Jones e Zuber (1975). 50

Figura 2.12 - Características do sinal para o padrão Anular, Jones e Zuber (1975). ... 50

Figura 2.13 - Mapa de padrões de escoamento de Jones e Zuber (1975)..... 51

Figura 2.14 - Mapa de padrões de escoamento probabilístico desenvolvido por Caniere et al. (2009) comparado ao modelo de Taitel e Dukler (1976)..... 52

Figura 2.15 - Variação do diâmetro de transição entre micro e macroescala segundo o critério de Kew e Cornwell (1997), Thome e Ribatski (2005)..... 56

Figura 2.16 - Padrões de escoamento em microcanais, segundo Triplett et al. (1999) para ar-água e D = 1,097 mm. 58

Figura 2.17 - Representação esquemática do critério de transição entre escoamento estratificado e intermitente segundo Barnea et al. (1983). 60

Figura 2.18 - Efeito da temperatura de saturação na transição entre padrões de escoamento segundo o método de Ong e Thome (2009), R134 a, D = 3 mm. 62

Figura 2.19 - Comparação entre o método de Felcar et al. (2007) e dados levantados por Yang e Shieh (2001) para o R134a. 64

Figura 3.1 - Esquema do circuito do refrigerante..... 66

Figura 3.2 - Diagrama pressão vs. entalpia do refrigerante ao longo do circuito de testes para o R134a. 66

Figura 3.3 - Registro fotográfico da seção de visualização com os componentes utilizados na caracterização do escoamento. 67

Figura 3.4 - Esquema do circuito auxiliar (ou de etileno glicol/água). 69

Figura 3.5 - Fonte de corrente contínua. 71

Figura 3.6 - Registro fotográfico das seções de testes e de pré-aquecimento. 71

Figura 3.7 - Diagrama esquemático da seção de pré-aquecimento e de testes. 72

Figura 3.8 - Esquema da instrumentação do laser 75

Figura 3.9 - Esquema de instalação do transdutor piezoelétrico. 76

Figura 3.10 - Esquema de sensores e atuadores do sistema de aquisição. 77

Figura 3.11 - Interface entre o sistema de aquisição e o operador da bancada. 78

Figura 4.1 - Nomenclatura adotada no presente estudo para classificação de padrões de escoamento com base em visualizações. 83

Figura 4.2 - Fluxograma de implementação do algoritmo *k-means*. 84

Figura 4.3 - Ilustração esquemática da obliquidade numa distribuição de frequências. 85

Figura 4.4 - Significado da curtose numa distribuição de frequências. 86

Figura 4.5.- Sinal filtrado da intensidade de radiação indicado pelo fotodiodo versus o tempo. 88

Figura 4.6 - Correlação cruzada dos sinais do laser. 89

Figura 4.7- Avaliação da energia rejeitada para o ambiente, R245fa, T_{ent} = 31 °C. . 91

Figura 4.8 - Avaliação da energia rejeitada para o ambiente, R245fa, T_{ent} = 41 °C .. 92

Figura 4.9 - Comparação da perda de pressão experimental com a teórica, R245fa. 93

Figura 4.10 - Comparação da perda de pressão experimental com a teórica com base na rugosidade relativa estimada, R245fa e G = 500-600 kg/m²s. 93

Figura 4.11 - Validação da frequência de bolhas alongadas, R245fa, T_{sat} = 31°C 94

Figura 5.1 - Efeito da velocidade mássica e temperatura de saturação na velocidade da bolha alongada, R134a. 100

Figura 5.2 - Velocidade da bolha alongada como função da velocidade superficial do escoamento bifásico, R134a. 101

Figura 5.3 - Comparação entre as frações de vazio calculada a partir da velocidade das bolhas do modelo homogêneo, R134a, T_{sat} = 22°C. 101

Figura 5.4 - Efeito da velocidade mássica, da temperatura de saturação e do refrigerante na frequência de bolhas. 102

Figura 5.5 - Ilustração da convergência assintótica do título de vapor com o incremento do comprimento médio das bolhas, R245fa. 103

Figura 5.6 - Mapas de padrões de escoamento baseados em visualizações 104

Figura 5.7 - Comparação entre o método de Barnea et al. (1983) (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R245fa, T_{sat} = 31°C, *D*=2,32mm. 105

Figura 5.8 - Comparação entre o método de predição de Ong e Thome (2009) (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R245fa, *D*=2,32mm. 106

Figura 5.9 - Comparação entre o método de predição de Felcar et al. (2007) (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R245fa, *D*=2,32mm. 107

Figura 5.10 - Análise do sinal captado pelo fotodiodo para o padrão de escoamento segundo bolhas, T_{sat} = 31°C, *G* = 100 kg/m²s e *x* = 0,07, R245fa. 108

Figura 5.11 - Análise do sinal captado pelo fotodiodo para o padrão de escoamento intermitente, T_{sat} = 22°C, *G* = 300 kg/m²s, *x* = 0,13, R245fa. 109

Figura 5.12 - Análise do sinal captado pelo fotodiodo para o padrão de escoamento anular, T_{sat} = 31°C, *G* = 600 kg/m²s, *x* = 0,37, R134a. 109

Figura 5.13 - Análise do sinal da pressão para o padrão bolhas. T_{sat} = 22°C, *G* = 100 kg/m²s, *x* = 0,07, R245fa. 110

Figura 5.14 - Análise do sinal da pressão para o padrão intermitente, T_{sat} = 22°C, *G* = 300 kg/m²s, *x* = 0,13, R245fa. 111

Figura 5.15 - Análise do sinal da pressão para o padrão anular. T_{sat} = 31°C, *G* = 600 kg/m²s, *x* = 0,37, R134a. 111

Figura 5.16 - Análise do sinal da temperatura para os três padrões de escoamento. . 112

Figura 5.17 - Comparação entre o método proposto com 3 centróides (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R245fa, T_{sat} *= 31°C*. 113

Figura 5.18 - Comparação entre o método proposto com 3 centróides (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R134a, T_{sat} = 22°C. 114

Figura 5.19 - Comparação entre o método proposto com 3 centróides (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R134a, T_{sat} = 31°C. 114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Estudos de padrões de escoamento em dutos verticais..... 38
Tabela 2.2 - Estudos de padrões de escoamento em tubos horizontais. 39
Tabela 2.3 - Resultados da avaliação de mapas elaborada por Mandhane et al. (1974). 40
Tabela 2.4 - Estudos envolvendo métodos objetivos existentes na literatura..... 53
Tabela 2.5 - Classificação de canais proposta por Kandlikar e Grande (2003)..... 55
Tabela 2.6 - Estudos sobre padrões de escoamento em microcanais..... 59
Tabela 3.1 - Características operacionais da microbomba. 70
Tabela 3.2 - Especificações da câmera de alta velocidade. 72
Tabela 3.3 - Resolução da câmera em relação da frequência de aquisição de imagens. 73
Tabela 3.4 - Características dos emissores do laser..... 74
Tabela 3.5 - Características dos sensores do laser..... 74
Tabela 3.6 - Sensores e atuadores utilizados na bancada experimental..... 78
Tabela 4.1 - Faixa de parâmetros experimentais para escoamentos monofásicos..... 90
Tabela 4.2 - Validação da velocidade média das bolhas. 96
Tabela 4.3 - Incerteza dos parâmetros medidos..... 97
Tabela 4.4 - Incerteza dos parâmetros estimados. 97

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

$\dot{m}$	Vazão mássica, kg/s.
$\dot{Q}$	Vazão volumétrica, m³/s
A	Área da seção transversal, m².
C_o	Parâmetro de distribuição de Zuber e Findlay (1965)
D	Diâmetro do tubo, m.
E	Energia, J.
EI	Escala de imagen
f	Fator de atrito
fr	Frequência, Hz.
g	Aceleração da gravidade, m²/s
G	Velocidade mássica, kg/m²s
h	Altura, m
i	Entalpia específica, J/kg
IPS	Imagens por segundo
J	Velocidade superficial, m/s
L	Comprimento, m.
N	Número
P	Potência, W.
p	Pressão, Pa.
p_r	Pressão reduzida, adimensional.
R	Constante do gas, J/kgK
S	Perímetro, m
s	Desvio padrão
T	Temperatura, K

t	tempo, s.
u	Velocidade, m/s
u_{GJ}	Velocidade de deslizamento do gás, m/s.
u_{LJ}	Velocidade de deslizamento do líquido, m/s.
x	Título de vapor

Letras gregas

α	Fração de vazio superficial.
β	Fração de vazio volumétrico.
γ_1	Obliquidade
γ_2	Curtose
ε	Rugosidade, m.
θ	Ângulo de contato, rad.
λ	Comprimento de caminho livre molecular, m.
μ	Viscosidade dinâmica, Pa.s
ρ	Densidade, kg/m³
σ	Tensão superficial, N/m
ς	Parâmetro definido por Mandhane et al. (1974).
τ	Tensão de cisalhamento, Pa
υ	Viscosidade cinemática, m²/s
φ	Ângulo de inclinação do tubo, rad.
χ	Parâmetro definido por Mandhane et al. (1974).
ϕ	Fluxo de calor, W/m².

Subscritos

A	Água
Abs	Absoluto

Aq	Aquisição
Ar	Ar
b	Bolhas alongada
crit	Crítico
df	*Drift-flux*
EA	Espaço anular de tubos concêntricos.
ent	Entrada
G	Gás
Go	A mistura bifásica escoando como vapor
H	Hidráulico
im	imagens
in	Interno
L	Líquido
Lo	A mistura bifásica escoando como líquido
mono	Monofásico
pa	Seção de pré-aquecimento
r	Reduzida
s	Superficial
sai	Saída
sat	Saturação
st	Seção de teste
Sub	Subresfriado
sv	Seção de visualização
T	Total
Tr	Transição.
i	Interfacial

Números adimensionais

$\lambda = \left[\frac{\rho_G}{\rho_{Ar}} \frac{\rho_L}{\rho_A} \right]^{0.5}$	Adimensional definido por Baker
$\psi = \frac{\sigma_L}{\sigma_A} \left[\frac{\mu_L}{\mu_A} \left(\frac{\rho_A}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3}$	Adimensional definido por Baker
$Bo = \frac{q''}{Gi_{LG}}$	Número de Ebulição
$Co = \frac{\left[\sigma / \left(\left(\rho_L - \rho_G \right) g \right) \right]^{1/2}}{D}$	Número de Confinamento
$E_O = \frac{(\rho_L - \rho_G) g L^2}{\sigma}$	Número de Eötvos
$Eo_M = \frac{g \left(\rho_L - \rho_G \right) D^2}{\sigma \cos\theta}$	Número de Eötvos Modificado
$Kn = \frac{\lambda}{D_H}$	Número de Knudsen
$\mathrm{Re} = \frac{GD}{\mu}$	Número de Reynolds
$We = \frac{G^2 D}{\rho \sigma}$	Número de Weber
$We_M = \frac{\rho_G \left(u_G - u_L \right)^2 D}{\sigma}$	Número de Weber Modificado
$Z = -56 Eo_M^{-0,6} \left(1 - e^{-0,02 Eo_M^{-0,5} We_M} \right)$	Parâmetro Z, Felcar et al. (2007)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 27

1.1 Introdução 27

1.2 Objetivos do trabalho 28

1.3 Organização do trabalho 29

CAPÍTULO 2 - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA 31

2.1 Introdução 31

2.2 Parâmetros gerais 31

2.3 Modelos para o escoamento bifásico 32

2.3.1 Modelo homogêneo 32

2.3.2 Modelo "*drift-flux*" 33

2.4 Padrões de escoamento 33

2.5 Identificação de padrões de escoamento 37

2.5.1 Métodos de previsão e mapas baseados em classificações subjetivas 37

2.5.2 Métodos objetivos de identificação de padrões de escoamento 47

2.6 Transição entre micro e macro escala para escoamentos bifásicos 54

2.7 Padrões de escoamento em microcanais 57

CAPÍTULO 3 - APARATO EXPERIMENTAL 65

3.1 Introdução 65

3.2 Circuito de teste 65

3.3 Circuito auxiliar 68

3.4 Descrição dos componentes e da instrumentação utilizada. 69

3.4.1 Reservatório de refrigerante 69

3.4.2 Microbomba 70

3.4.3 Fonte de corrente contínua 70

3.4.4 Seções de teste e pré-aquecimento 71

3.4.5 Seção de visualização 72

3.4.6 Câmera de alta velocidade 72

3.4.7 Sensores e emissores laser 74

3.4.8 Transdutores de pressão 75

3.4.9 Sistema de aquisição de dados e controle da bancada 76

CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 79

4.1 Introdução 79

4.2 Redução de dados 79

4.2.1 Parâmetros gerais 79

4.2.2 Padrões de escoamento 82

4.2.3 Características de bolhas alongadas 87

4.3 Validação do aparato experimental 89

4.3.1 Balanço de energia 90

4.3.2 Ensaios para perda de pressão e validação com correlações da literatura 92

4.3.3 Validação dos procedimentos de caracterização das bolhas alongadas 94

4.4 Incertezas de parâmetros medidos e estimados 97

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS 99

5.1 Introdução 99

5.2 Caracterização de bolhas 99

5.3 Padrões de escoamento baseados em visualizações 103

5.4 Comparações entre transições baseadas em observações e métodos de previsão da literatura. 104

5.5 Avaliação objetiva dos padrões de escoamento 107

5.6 Mapas de padrões de escoamento bifásico 112

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 115

6.1 Considerações gerais 115

6.2 Conclusões 115

6.3 Recomendações para trabalhos futuros 116

BIBLIOGRAFIA.....116

APÊNDICE A: Programa de Aquisição.....127

APÊNDICE B: Implementação do algoritmo k-means.....129

APÊNDICE C: Programa para caracterização de bolhas alongadas.....135

APÊNDICE D: Incertezas e Calibrações.....137

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Escoamentos bifásicos têm sido intensamente investigados desde a década de 40. Tais estudos envolvem a caracterização dos padrões de escoamento e determinação de características como fração de vazio, velocidade das fases e espessura do filme de líquido em caso do padrão anular. Estas pesquisas foram motivadas pelo fato de tais parâmetros estarem diretamente relacionados ao coeficiente de transferência de calor, à perda de pressão, ao fluxo de calor crítico e à presença de instabilidades no escoamento. Os estudos relacionados à determinação de padrões de escoamento foram em sua maioria desenvolvidos para macrotubos ($D_H \geq 3$ mm) e tendo ar/água como fluidos de trabalho. Neles, utilizam-se misturadores com a finalidade de obter o escoamento bifásico. Tais condições são distintas daquelas observadas quando o escoamento bifásico decorre de um processo de evaporação e, consequentemente, o desenvolvimento dos padrões de escoamento também ocorre de forma distinta.

Durante a última década a necessidade de dissipar elevadas taxas de calor em espaços confinados tem desafiado engenheiros e pesquisadores. Tal necessidade decorre principalmente do incremento do número de transistores em um processador e da compactação de componentes eletrônicos. Nestas aplicações, dissipadores de calor baseados em microcanais possuem claras vantagens em relação às tecnologias concorrentes entre elas o fato de prover uma área de contato com o fluido refrigerante por unidade de volume superior. Microcanais podem suportar pressões de operação superiores quando comparado a canais convencionais. Através de microcanais é possível obter coeficientes de transferência de calor superiores. Segundo estudos preliminares de Kandlikar e Grande (2003), taxas de dissipação de até 10 MW/m² podem ser atingidas. Por outro lado, minimizar o trocador de calor implica também reduzir o material utilizado na sua construção e o inventário do refrigerante, implicando consequentemente, em reduções de custo e de impacto ambiental.

Dentro deste contexto, diversos estudos foram desenvolvidos buscando identificar padrões de escoamento em microcanais. Na maioria destas investigações

foram desenvolvidos mapas para padrões de escoamento baseados apenas em observações visuais e envolvendo faixas determinadas de velocidades mássicas, títulos de vapor e temperaturas de saturação. Devido ao fato da classificação geralmente realizar-se por intermédio de observações através de uma câmera filmadora de alta velocidade e envolver um observador, tais métodos carecem de objetividade. Vale ainda ressaltar que a caracterização de padrões de escoamento só se faz necessária a partir do momento que suas características afetam de forma significante as variáveis de projeto de trocadores como o coeficiente de troca de calor, a perda de pressão e o fluxo crítico.

Visando a eliminar esta subjetividade, baseados no tratamento de um sinal característico do escoamento, desenvolveram-se métodos objetivos para a previsão dos padrões. Estes métodos objetivos consideram as variações de fração de vazio, pressão local e perda de pressão ao longo de um comprimento de seção, podendo utilizar para a classificação dos padrões, além da variação do sinal com o tempo, métodos estatísticos, redes neurais e técnicas de agrupamento de dados.

Neste trabalho, desenvolveu-se um método objetivo de identificação de padrões de escoamento baseado no agrupamento de dados com características similares. A partir da análise dos parâmetros estatísticos dos sinais da pressão local, atenuação de um sinal laser através do escoamento e temperatura do fluido, com o auxílio de um algoritmo de agrupamento de dados, foram determinados mapas de escoamentos bifásicos. Seus resultados foram comparados a observações visuais realizadas através de uma câmera com captura de imagens em alta velocidade. Características das bolhas alongadas tais como velocidade, frequência e comprimento foram determinadas por intermédio do método das correlações cruzadas aplicada à atenuação de radiação luminosa pelo escoamento, cujo sinal é capturado por dois fotodiodos.

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho possui como objetivo geral investigar os padrões de escoamento em microcanais durante a ebulição convectiva dos refrigerantes R134a e R245fa, tendo os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma pesquisa bibliográfica extensa e crítica sobre padrões de escoamento em micro e macrocanais;

- Elaborar um programa que permita, por meio do tratamento de sinais relacionados à atenuação de radiação luminosa pelo escoamento, a determinação automática do número de bolhas alongadas, suas velocidades e comprimentos médios;
- Elaborar um procedimento que permita a identificação automática dos padrões de escoamento mediante um algoritmo de agrupamento de dados (*Clustering method*), com base nos sinais relacionados à atenuação de um laser através do escoamento e às variações locais da pressão e temperatura;
- Levantar resultados experimentais para a frequência, velocidade e comprimento das bolhas alongadas e propor mapas de escoamentos a partir dos programas elaborados;
- Comparar os mapas baseados em critérios de agrupamento com as observações visuais obtidas através de uma câmera de captura de imagens em alta velocidade;
- Com base nos resultados anteriores e na literatura, buscar um critério fundamentado para a transição entre micro e macroescala.

1.3 Organização do trabalho

A estrutura do trabalho está dividida em capítulos compostos de Pesquisa Bibliográfica, Descrição do Aparato Experimental, Procedimento Experimental, Resultados Experimentais e Conclusões e Recomendações, descritos conforme se segue:

O **Capítulo 2** apresenta um estudo crítico da literatura. Nele são discutidos os padrões de escoamento e métodos para suas previsões. Uma análise dos estudos encontrados na literatura sobre a transição entre micro e macro-escala também é apresentada.

O **Capítulo 3** apresenta a descrição da bancada experimental e sua validação através de ensaios para escoamentos monofásicos.

O **Capítulo 4** descreve os procedimentos de redução de dados, incluindo o método de agrupamento de dados e as incertezas experimentais.

Os resultados experimentais para padrões de escoamento são apresentados, discutidos e analisados no **Capítulo 5**. Nele os resultados são comparados com métodos

de previsão de padrões de escoamento disponíveis na literatura. Resultados para frequência, comprimento e velocidade de bolhas alongadas também são apresentados e discutidos.

O C**apítulo 6** apresenta as principais conclusões levantadas neste estudo a partir da análise dos resultados experimentais e da revisão bibliográfica.

CAPÍTULO 2 - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A denominação escoamento bifásico refere-se ao escoamento simultâneo de duas fases. Considerando os estados da matéria sólido, líquido e gasoso, as seguintes combinações de escoamentos bifásicos são possíveis: gás-líquido, gás-sólido e líquido-sólido. Em geral, na literatura "escoamentos de dois componentes", isto é envolvendo substâncias distintas como ar-líquido e líquido-líquido, também são referidos como escoamentos bifásicos.

Escoamentos bifásicos verificam-se em sistemas de engenharia e biológicos e em diversos fenômenos naturais. Seu estudo é tema de destaque na área Térmica e de Mecânica dos Fluidos.

2.2 Parâmetros gerais

Alguns parâmetros são utilizados na caracterização dos escoamentos bifásicos gás-líquido e encontram-se definidos neste item. O título de vapor é dado pela razão entre as vazões mássicas da fase vapor e a total, conforme a seguinte equação:

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}} \tag{2.1}$$

Define-se também a fração de vazio superficial dada pela razão entre a área transversal da seção ocupada pelo gás e sua área total como se segue:

$$\alpha = \frac{A_G}{A} = 1 - \frac{A_L}{A} \tag{2.2}$$

A velocidade superficial da fase é a velocidade que ela teria caso escoasse sozinha no mesmo canal, assim é calculada como a razão entre a vazão volumétrica da fase e a área total da seção transversal conforme as seguintes equações:

$$J_G = \frac{\dot{Q}_G}{A} = \frac{\dot{m}_G}{\rho_G A} = \frac{G_G}{\rho_G} = \frac{x \cdot G}{\rho_G} \tag{2.3}$$

$$J_L = \frac{\dot{Q}_L}{A} = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L A} = \frac{G_L}{\rho_L} = \frac{(1-x)\cdot G}{\rho_L} \tag{2.4}$$

A velocidade superficial é comumentemente utilizada para caracterizar fenômenos típicos de escoamentos bifásicos, ocorrendo em modelagens fenomenológicas e correlações que expressam fenômenos relacionados à interação entre as fases. Inclusive aparecem como variável nas coordenadas dos eixos de vários mapas de padrões de escoamento. Define-se também a velocidade superficial total que caracteriza a velocidade do centro de volume da mistura bifásica e é dada pela soma das velocidades superficiais de cada fase:

$$J = J_G + J_L \tag{2.5}$$

A razão de deslizamento entre as fases (*slip ratio*) é definida como a razão entre as velocidades das fases gasosa e líquida.A velocidade de deslizamento representa o movimento da fase com relação ao centro de volume da mistura e é dada por:

$$u_{GJ} = u_G - J \tag{2.6}$$

$$u_{LJ} = u_L - J \tag{2.7}$$

2.3 Modelos para o escoamento bifásico

A determinação da fração de vazio é fundamental para projetos de engenharia envolvendo escoamentos bifásicos. Para lograr este objetivo foram propostos diversos modelos e correlações para o cálculo da fração de vazio, os quais junto às equações de campo (conservação da massa, quantidade de movimento e energia) são utilizados para caracterizar o escoamento bifásico. Neste capítulo são descritos dois modelos cinemáticos o homogêneo e o drift-flux de Zuber e Findlay (1965) que serão considerados na análise dos resultados experimentais.

2.3.1 Modelo homogêneo

Neste modelo considera-se a mistura como um pseudo-fluido ponderando suas propriedades de transporte através dos valores das componentes. No modelo homogêneo assume-se também que as duas fases apresentam velocidades uniformes e similares ($u_G = u_L$) e, logo, a razão de deslizamento apresenta um valor igual a unidade.

A fração de vazio segundo o modelo homogêneo é dada pela seguinte equação:

$$\alpha_H = \frac{1}{1+\left(\frac{1-x}{x}\right).\frac{\rho_G}{\rho_L}} \tag{2.8}$$

O modelo homogêneo fornece uma aproximação razoável para escoamentos dispersos (bolhas e névoa) condição em que as fases gasosa e líquida escoam à velocidades similares.

2.3.2 Modelo "*drift-flux*"

O modelo "drift-flux" proposto por Zuber e Findlay (1965) considera o deslizamento entre as fases e distribuições de velocidade e fração de vazio local não uniformes ao longo da seção transversal. Para isto são introduzidos parâmetros que devem ser determinados empiricamente. O modelo resulta na seguinte equação para a determinação da fração de vazio:

$$\alpha_{df} = \frac{\beta}{C_o + \frac{u_{GJ}}{J}} \tag{2.9}$$

Nesta equação os parâmetros empíricos são C_o, que está relacionado a distribuição de velocidade e fração de vazio das fases, e a velocidade de deslizamento da fase gás, $u_{GJ,}$ definida na Eq. 2.6. Alterações dos valores destes parâmetros correspondem a mudanças no regime de escoamento.

2.4 Padrões de escoamento

Quando gás e líquido escoam simultaneamente em uma tubulação, a distribuição das fases pode apresentar distintas configurações, denominadas de padrões de escoamento, cuja topografia depende das características do sistema de transporte, das variáveis operacionais e das propriedades físicas dos fluidos que compõem a mistura bifásica. Parâmetros geométricos como o diâmetro da tubulação e sua inclinação em relação à horizontal podem determinar a presença de um determinado padrão. Dentre as características operacionais que também influenciam o estabelecimento de um padrão, destacam-se as vazões de cada fase da mistura e a pressão termodinâmica local de

escoamento. A densidade e a viscosidade de cada componente e a tensão superficial são propriedades de transporte e termodinâmicos que afetam a topologia do escoamento.

Os padrões de escoamento influenciam os mecanismos de transporte durante o escoamento bifásico relacionados à transferência de massa, quantidade de movimento e calor. A fração de vazio média na seção transversal do escoamento (a fração da área da seção transversal do escoamento ocupada pelo gás) também está relacionada ao padrão de escoamento.

Os métodos para a identificação de padrões de escoamento podem ser subjetivos e objetivos. Os métodos subjetivos se baseiam em observações visuais. Rouhani e Sohel (1983) citaram 84 diferentes denominações para os padrões de escoamento, fato, segundo eles, relacionado à natureza subjetiva das definições e às inúmeras nomenclaturas adotadas para um único padrão de escoamento. Os métodos objetivos utilizam a análise de sinais característicos do escoamento através de técnicas, totalmente independente de critérios subjetivos baseados no reconhecimento de imagens por um observador.

Collier e Thome (1996) apontam os seguintes padrões de escoamento em dutos verticais:

- *Bolhas:* É quando a fase gasosa envolta pela fase líquida se encontra segundo bolhas não necessariamente esféricas e com diâmetros equivalentes inferiores ao tubo;
- *Pistonado:* Neste padrão estão presentes bolhas de dimensões comparáveis ao diâmetro do duto que escoam de modo intermitente e com frequência regular. Entre duas bolhas consecutivas escoa um pistão de líquido em cujo interior se verificam bolhas de tamanho reduzido;
- *Agitante:* Neste caso a ponte de líquido entre os pistões é rompida por ação hidrodinâmica formando um escoamento com interface irregular;
- *Anular:* É quando um filme de líquido escoa em toda a periferia do duto com a fase gasosa escoando na região central;
- *Névoa:* Neste caso a fase líquida se encontra dispersa no gás na forma de gotículas de reduzidas dimensões.

Uma ilustração destes padrões de escoamento pode ser vista na **Figura 2.1**

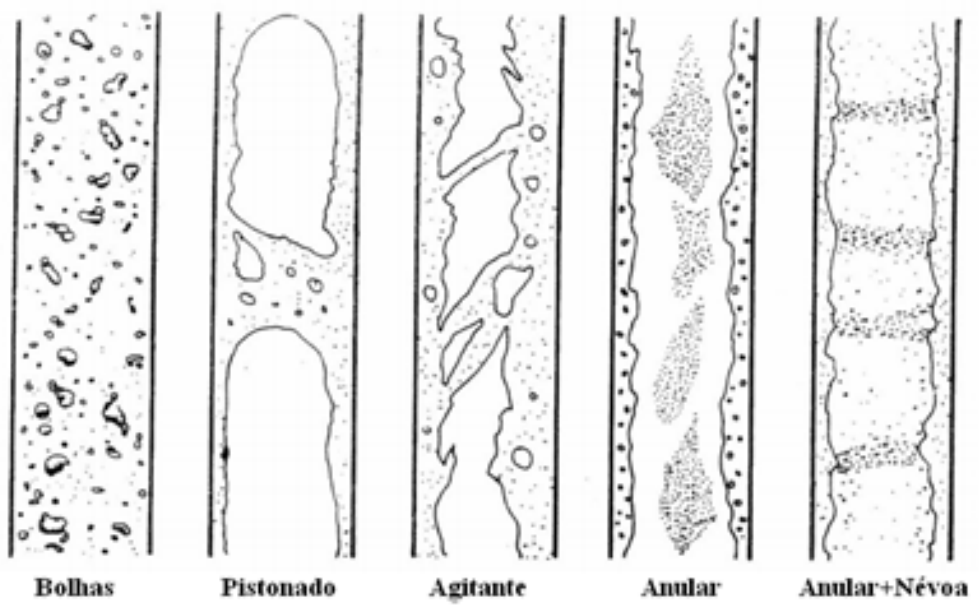


Figura 2.1 - Padrões de escoamento em tubos verticais segundo Collier e Thome (1996).

Para escoamentos horizontais, devido a efeitos gravitacionais, além das topologias ilustradas na **Figura 2.1**, são identificados os seguintes padrões:

- *Estratificado Liso:* O líquido se concentra na região inferior do duto e o gás na superior com a interfase de separação relativamente lisa;
- *Estratificado Ondulado:* É uma variante do estratificado liso, para o qual, devido à ação do arraste do gás a interface apresenta ondulações.

Na **Figura 2.2** é possível observar registros fotográficos dos padrões de escoamento obtidos por Barbieri (2005) para escoamentos horizontais.

A identificação dos padrões de escoamento tem atraído a atenção de pesquisadores cujo objetivo é modelar os fenômenos de transporte durante escoamentos bifásicos por meio de modelos mecanísticos Estes modelos necessitam a determinação da geometria da interface, pois, como exemplo, mecanismos distintos predominam para o caso das bolhas distribuírem-se através do líquido com uma fase dispersa, e em condições em que as bolhas coalescem formando pistões de vapor.

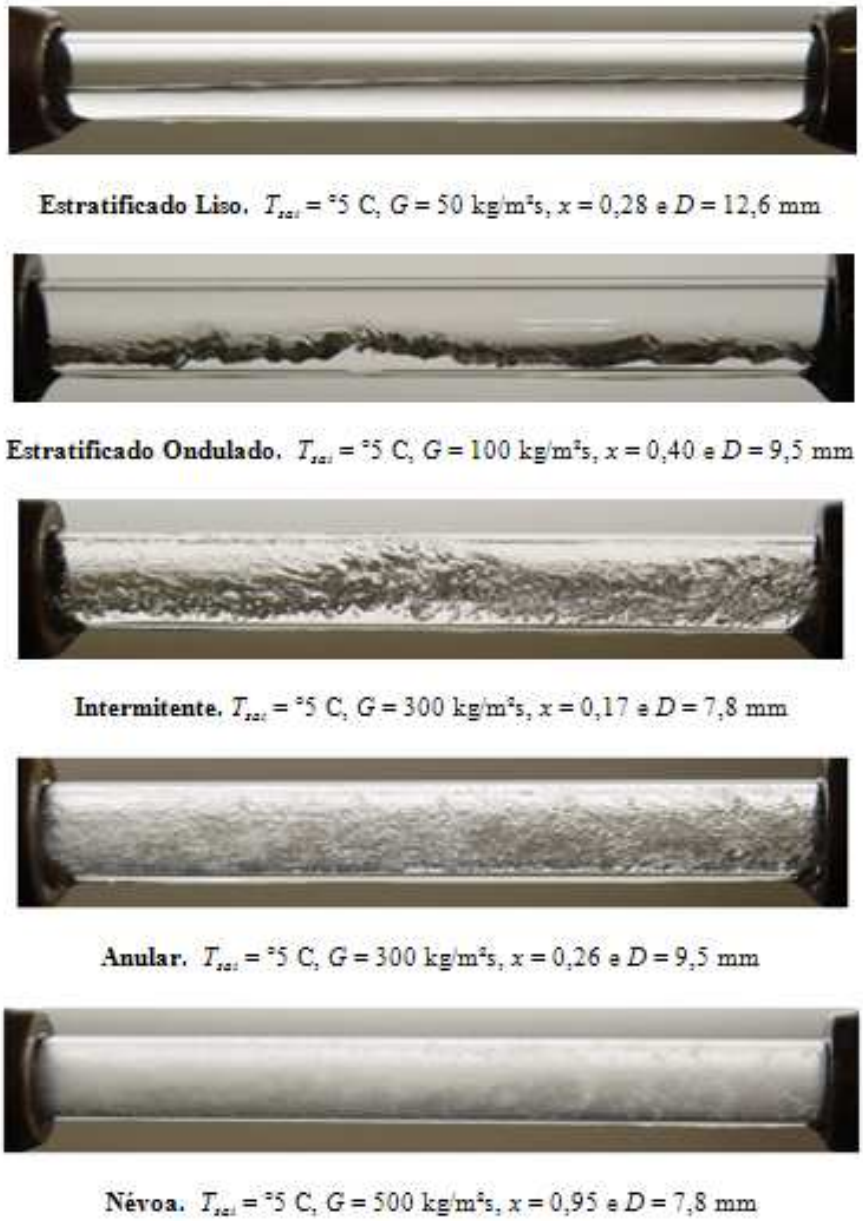


Figura 2.2 - Padrões de escoamento observados por Barbieri (2005).

Até meados da década de 70, a abordagem para o desenvolvimento de método de previsão de padrões de escoamento consistia na elaboração de mapas baseados em bancos de dados extensos compreendendo amplas faixas de vazões e caracterizando os padrões por meio de observações do escoamento através de uma seção de testes transparente.

O mapa de padrões era estabelecido baseado em um sistema de coordenadas, envolvendo velocidades superficiais ou adimensionais relacionados aos processos de transporte. Tais mapas, consequentemente, eram adequados às condições experimentais

para as quais foram desenvolvidos. Posteriormente, surgiram métodos de previsão baseados no tratamento de sinais captados por transdutores e relacionados ao comportamento dos sinais por eles captados. Desta forma, eliminou-se a subjetividade do observador no julgamento e classificação das imagens segundo os diferentes padrões de escoamento.

2.5 Identificação de padrões de escoamento

A seguir são descritos os métodos de determinação e previsão dos padrões de escoamento encontrados na literatura.

2.5.1 Métodos de previsão e mapas baseados em classificações subjetivas

Nesta seção são apresentados os principais mapas e métodos disponíveis na literatura para a determinação de padrões de escoamento baseados em métodos subjetivos de classificação. Os métodos aqui descritos foram desenvolvidos para diâmetros superiores a 3 mm e são apresentados por terem sido utilizados no desenvolvimento de métodos para canais de diâmetro reduzido.

A **Tabela 2.1** e a **Tabela 2.2** descrevem esquematicamente uma serie de estudos envolvendo a proposição de mapas de padrões de escoamento encontrados na literatura, para dutos verticais e horizontais respectivamente. Segundo estas tabelas, verifica-se que até o inicio da década de 80 estudos foram realizados em sua maioria para misturas ar-água, cobrindo diâmetros de dutos entre 4,55 mm e 50,8 mm para escoamentos verticais e entre 20 e 127 mm para escoamentos horizontais.

Um dos primeiros mapas de escoamento com pretensões genéricas através da adoção de adimensionais nos eixos coordenados foi proposto por Baker (1954). Neste mapa, ilustrado na **Figura 2.3**, o autor relaciona propriedades da fase gasosa e líquida da mistura com propriedades do ar e água em condições normais de pressão e temperatura através dos adimensionais definidos abaixo:

$$\lambda = \left[\frac{\rho_G}{\rho_{Ar}} \frac{\rho_L}{\rho_A} \right]^{0.5} \tag{2.11}$$

$$\psi = \frac{\sigma_L}{\sigma_A}\left[\frac{\mu_L}{\mu_A}\left(\frac{\rho_A}{\rho_L}\right)^2\right]^{1/3} \tag{2.12}$$

Tabela 2.1 - Estudos de padrões de escoamento em dutos verticais.

Autor (es)	Fluidos	Diâmetro do tubo [mm]	Eixos Coordenados
Galegar et al. (1954)	Ar/Água	12,7 e 50,8	G_G, G_L
Ueda (1958)	Ar/Água	50,8	$\dot{m}_G$, $\dot{m}_L$
Hewitt e Robertson (1969)	Ar/Água	31,75	$\rho_L J_L^2$, $\rho_G J_G^2$
Nishigawa et al. (1969)	Ar/Água	25,4	J_L, J_G
Spedding e Nguyen (1980)	Ar/Água	4,55	$J/\sqrt{gD}$, J_L/J_G
Weisman e Kang (1981)	Ar/Água	25,4	J_G, J_L

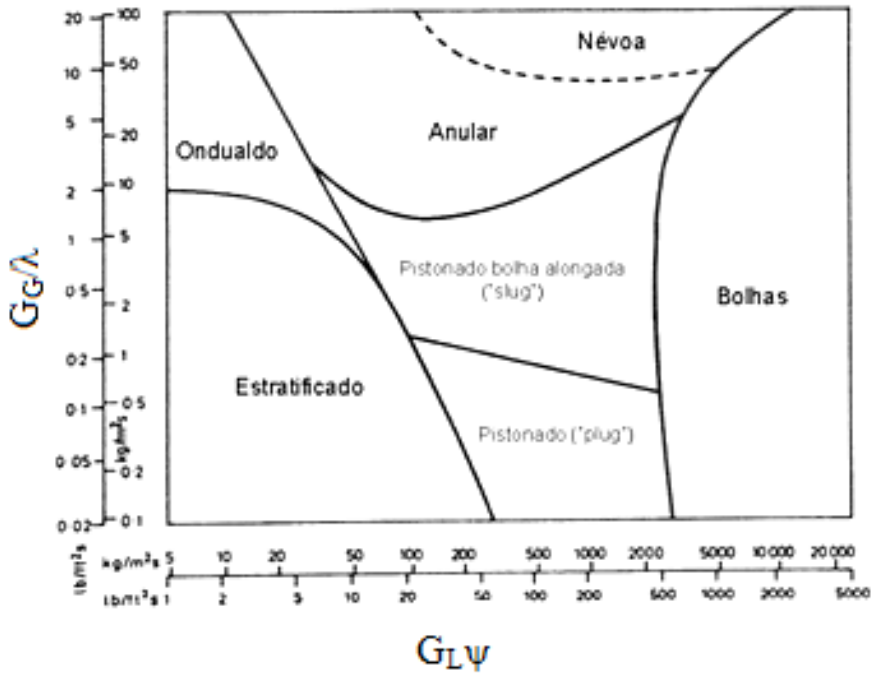


Figura 2.3 - Mapa de padrões de escoamento de Baker (1954).

Tabela 2.2 - Estudos de padrões de escoamento em tubos horizontais.

Autor (es)	Fluidos	Diâmetro do tubo [mm]	Eixos Coordenados
Bergelin e Gazley (1949)	Ar/Água	25,4	$\dot{m}_L$, $\dot{m}_G$
Kosterin (1949)	Ar/Água	25,4 ; 50,8; 76,2 e 101,6	β, J
Johnson e Abou-Sabe (1952)	Ar/Água	22	$\dot{m}_L$, $\dot{m}_G$
Krasiakova (1952)	Ar/Água	30	J_L, J_G
Baker (1954)	Ar/Água, Gás Natural/Óleo	Banco de dados	G_L/λ, $G_G\psi$
Alves (1954)	Ar/Água, Ar/Óleo	26,6	J_L, J_G
White e Huntington (1958)	Ar/Água, Ar/Óleo, Gás natural/ Óleo	25,4; 38,1 e 50,8	G_G,G_L
Hoogendorn (1959)	Ar/Água	24 - 140	β, J
Govier e Omer (1962)	Ar/Água	25,4	J_L, J_G
Eaton et al. (1967)	Gás Natural/Água, Gás Natural/Óleo	-	Re_{EA}, We_{EA}
Mandhane et al. (1974)	Ar/Água, Gás Natural/Óleo, Ar/Óleo	12,7 – 165,1	J_L, J_G
Simpson et al. (1977)	Ar/Água	127	G_G,G_L
Spedding e Chen (1981)	Vapor de água/Água	13-50	J_L, J_G

Para as condições mencionadas na **Tabela 2.2**, Mandhane et al. (1974) levantaram um extenso banco de dados experimentais contendo 5935 observações de padrões de escoamento. Este banco de dados foi comparado a métodos de previsão disponíveis na literatura, os quais foram avaliados segundo os parâmetros dados pelas seguintes equações:

$$\varsigma_i = \frac{\text{(Resultados previstos corretamente como padrão i)}}{\text{(Total de resultados experimentais para o padrão i)}} \times 100 \qquad (2.13)$$

$$\chi = \frac{\text{(Resultados corretamente previstas)}}{\text{(Número total de observações)}} \times 100 \qquad (2.14)$$

Os resultados destas comparações encontram-se na **Tabela 2.3**, segundo a qual previsões razoáveis são obtidas para o escoamento anular. Entretanto quando observados os demais padrões e os resultados gerais, conclui-se que os mapas avaliados falharam ao prever os padrões de escoamento.

Tabela 2.3 - Resultados da avaliação de mapas elaborada por Mandhane et al. (1974).

Padrão de escoamento	Número de observações	Valores de ç (%)		
		Baker (1954)	Hoogendorn (1959)	Govier e Omer (1962)
Bolhas	758	20,4	64,6	32,4
Estratificado Liso	397	54,7	80,9	51,6
Estratificado Ondulado	783	10,0	41,5	17,5
Pistonado	2020	24,0	58,7	63,4
Anular	1746	84,7	90,5	91,0
Bolhas dispersas	231	2,2	0,0	0,0
Total	5935	41,5	65,7	58,3

Mandhane et al. (1974), além de avaliar alguns dos métodos de previsão existentes até então, propôs um novo mapa de padrões de escoamento baseado em seu banco de dados. Este mapa possui velocidades superficiais do líquido e do gás em seus eixos coordenados e encontra-se ilustrado na **Figura 2.4**.

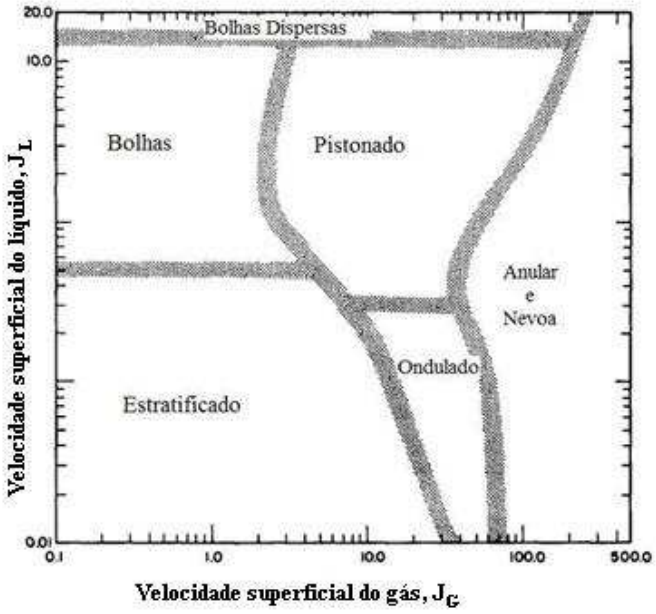


Figura 2.4 - Mapa de padrões de escoamento proposto por Mandhane et al. (1974).

Em meados da década de 70, Taitel e Dukler (1976) propuseram um método de previsão de padrões de escoamento que desde então vem sendo aprimorado por diversos autores. Eles desenvolveram um modelo teórico, baseado em conceitos físicos, capaz de prever as transições entre os diversos padrões de escoamento para tubulações horizontais e levemente inclinadas. Este modelo parte de um balanço de quantidade de movimento para o escoamento estratificado conforme ilustrado na **Figura 2.5** admitindo condições de equilíbrio entre as fases.

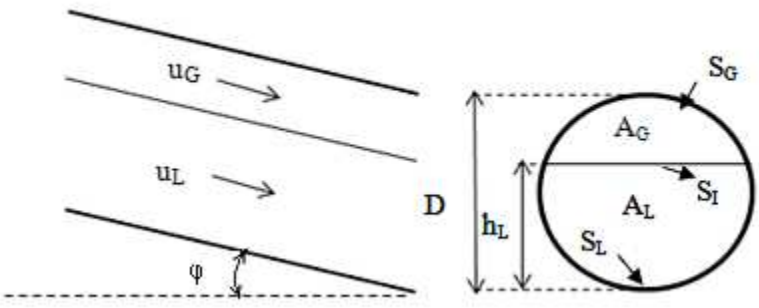


Figura 2.5 - Ilustração esquemática do escoamento estratificado segundo Taitel e Duckler (1976).

O balanço da quantidade de movimento para cada uma das fases resulta nas Eq. 2.5 e 2.6.

$$-A_L\left(\frac{dp}{dx}\right)_L - \tau_{PL}S_L + \tau_i S_i + \rho_L A_L g \sin\varphi = 0 \tag{2.15}$$

$$-A_G\left(\frac{dp}{dx}\right)_G - \tau_{PG}S_G + \tau_i S_i + \rho_G A_G g \sin\varphi = 0 \tag{2.16}$$

Assumindo gradientes de pressão similares para ambas as fases e manipulando algebricamente as equações acima se têm suas soluções escritas como função de h_L, das perdas de pressão para cada uma das fases da mistura escoando no tubo, dadas pelas equações de Blasius, e pelo produto entre a diferença de densidades do líquido e vapor, a aceleração gravitacional e o seno do ângulo de inclinação em relação à horizontal. A partir dessa equação, as transições são caracterizadas por relações propostas com base nos seguintes mecanismos:

- *Estratificado – Intermitente/Anular:* Partindo-se do escoamento estratificado, esta transição ocorre com o incremento da velocidade mássica da mistura bifásica. O incremento da velocidade do gás promove o surgimento de ondas na interface líquido/gás, estas ondas tendem a reduzir a área disponível para o escoamento da fase gasosa, resultando no incremento local de sua velocidade. Assim, segundo a equação de Bernoulli, a pressão na região de pico da onda decresce atuando de forma a elevar o pico da onda. A tal comportamento contrapõe-se o efeito da gravidade, que tende a reduzir a amplitude do pico da onda. A transição, segundo Taitel e Dukler, também considera o critério de instabilidade de Kelvin e Helmotz para o crescimento de uma onda, ajustado para uma condição de escoamento no interior de superfícies tubulares.
- *Intermitente – Anular:* Na impossibilidade de escoamento estratificado, o escoamento intermitente só é possível quando se tem líquido suficiente para permitir a formação de pistões de gás. Quando o nível do líquido é insuficiente para o estabelecimento de um escoamento intermitente, o líquido escoa junto à parede do tubo formando o padrão anular. Os autores sugeriram arbitrariamente uma relação $h_L/D = 0,5$ como condição de transição. Para valores superiores as ondas de líquido alcançam a região superior do tubo interrompendo a fase contínua do gás, formando assim pistões, em caso de razões h_L/D inferiores a 0,5, o surgimento de pistões não se verifica, ocorrendo a presença do padrão anular.
- *Estratificado Liso – Estratificado Ondulado:* Esta transição ocorre a partir do escoamento estratificado liso quando a velocidade da fase gasosa é suficiente para causar ondulações na superfície do líquido. Entretanto, tal velocidade é inferior àquela para a transição entre intermitente ou anular. Taitel e Dukler (1976) se basearam em uma equação empírica da literatura para a condição de formação de ondas.
- *Intermitente – Bolhas:* Esta transição ocorre quando as forças turbulentas são suficientemente intensas, superando as forças de empuxo responsáveis pelo fato das bolhas se concentrarem na região superior da tubulação, resultando na quebra dos pistões em bolhas menores que escoam dispersas na fase líquida

A solução das Eqs. 2.5 e 2.6 adimensionalizadas, somadas aos critérios de transição, permitem levantar um mapa de padrões de escoamento. O modelo de Taitel e

Dukler (1976) apresentou boa concordância com os dados experimentais para tubulações horizontais apresentados por Mandhane et al. (1974) e foi capaz de prever os efeitos de alterações do diâmetro, inclinação do tubo, e das propriedades dos fluidos.

Um trabalho experimental realizado por Barnea et al. (1980) demonstrou que o método de Taitel e Dukler (1976) era capaz de prever as transições com razoável exatidão para inclinações de até ±10°. Qualitativamente as tendências são previstas razoavelmente para inclinações até + 30°. Entretanto o método não foi capaz de prever razoavelmente a transição entre os padrões estratificado e estratificado ondulado para escoamentos descendentes com inclinações superiores a 10°.

Posteriormente, diversos estudos se basearam na metodologia desenvolvida por Taitel e Duckler (1976), buscando o desenvolvimento de métodos gerais. Entretanto, a maioria para faixas de inclinações reduzidas. Dentre estes estudos destacam-se os seguintes:

- Kadambi (1982) e Lin e Hanratty (1986), para tubulações horizontais e levemente inclinadas.
- Taitel et al. (1980) e Mishima e Ishi (1986), para escoamentos ascendentes em tubulações verticais.
- Barnea et al. (1982), para escoamentos descendentes em tubulações verticais e para escoamentos inclinados.
- Barnea et al. (1985), para escoamentos ascendentes e inclinados.
- Barnea (1987) apresentou um modelo unificado capaz de prever a transição entre regimes independente da inclinação da tubulação, reunindo de forma crítica e sistemática os mecanismos de transição propostos por seu grupo em estudos anteriores.

Kattan et al. (1998), baseados em resultados para refrigerantes halogenados, propuseram um método para previsão de escoamentos bifásicos a partir de modificações do método de Steiner (1993), também derivado do trabalho de Taitel e Dukler (1976). Kattan et al. (1998) incluíram em seu método os padrões de escoamento estratificado liso, estratificado ondulado, intermitente, anular, bolhas e névoa. O método foi proposto a partir de um banco de dados envolvendo resultados para os seguintes fluidos: R134, R123, R402A, R404A e R502. Os experimentos foram realizados para velocidades

mássicas entre 100 e 500 kg/m²s, títulos de vapor de 0,04 até vapor saturado, fluxos de calor entre 440 e 36500 W/m², pressões de saturação entre 112 e 888 kPa. O mapa de Kattan et al. (1998) identificou corretamente 96,2% do banco de dados utilizado em sua elaboração.

Considerando o fato deste método ter sido proposto com base em resultados para diâmetro de 13,84 mm, a sua aplicação para diâmetros inferiores deve ser cuidadosamente analisada.

A **Figura 2.6** ilustra o efeito do diâmetro do tubo na transição entre padrões segundo o método de Kattan et al. (1998). Segundo ela, alterações no diâmetro não afetam as transições intermitente/anular e estratificado liso/estratificado ondulado. Por outro lado, as transições entre os padrões estratificado ondulado/anular e intermitente e anular/névoa são drasticamente afetadas. O padrão névoa (não ilustrado na figura), segundo Kattan et al. (1998), ocorre para velocidades mássicas superiores a 1139 kg/m²s para D=3 mm. O padrão de escoamento bolhas só aparece para velocidades mássicas superiores às verificadas em aplicações de refrigerantes halogenados desta forma optou-se por não incluí-la na comparação.

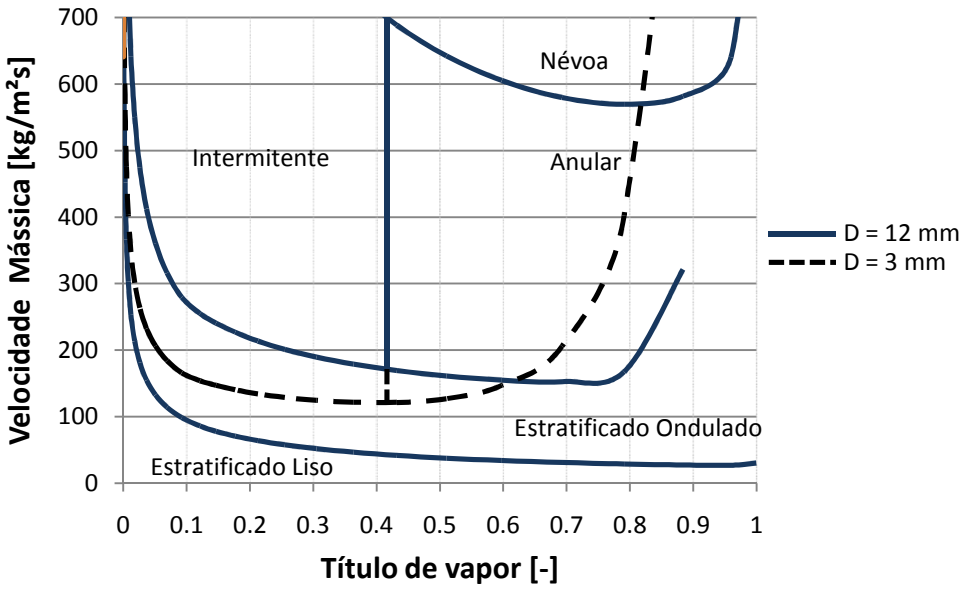


Figura 2.6 - Efeito do diâmetro na transição entre padrões de escoamento segundo o método de Kattan et al. (1998). R134a, T_{sat} = 31°C.

A **Figura 2.7** ilustra o efeito da temperatura de saturação na transição entre padrões de escoamento segundo o método de Kattan et al. (1998). Com o incremento de T_{sat} a transição entre intermitente e anular ocorre para títulos de vapor superiores, isto decorre do incremento da relação ρ_G/ρ_L, resultando na redução da fração de vazio e portanto necessitando um título de vapor superior para a transição. A transição névoa/anular desloca-se para velocidades mássicas superiores com o incremento da temperatura de saturação, efeitos reduzidos de T_{sat} são observados para as transições estratificado liso/estratificado ondulado e estratificado ondulado/intermitente/anular.

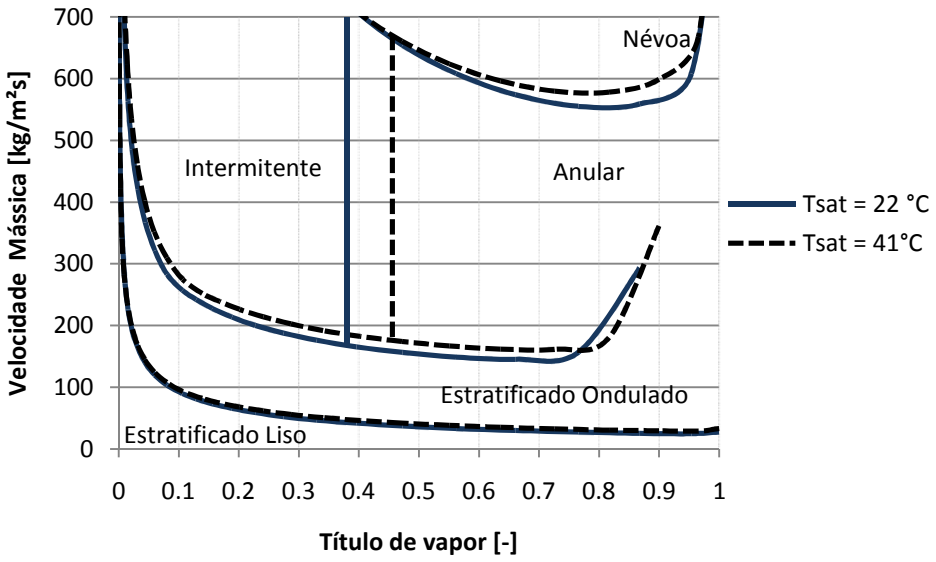


Figura 2.7 - Efeito da temperatura de saturação na transição entre padrões de escoamento segundo o método de Kattan et al. (1998), R134a ,D = 3 mm.

Wojtan et al. (2004) aprimoraram o método proposto por Kattan et al. (1998). Baseado em medições instantâneas da fração de vazio, os autores dividiram o escoamento estratificado ondulado nos seguintes padrões: estratificado ondulado, pistonado e uma combinação entre estratificado ondulado e pistonado. A divisão entre pistonado, estratificado ondulado – pistonado e intermitente não parece ser necessária, pois caracterizam padrões com características intermitentes e que promovem um molhamento contínuo de toda a superfície interna do tubo. Além dessa alteração, os autores adicionaram as transições entre os padrões anular/secagem de parede e secagem de parede/névoa. O padrão de secagem de parede se caracteriza conforme Wojtan et al. (2004) pela secagem progressiva do filme líquido a partir da região superior do tubo.

Wojtan et al. (2004) utilizaram resultados experimentais para os refrigerantes R22 e R410A para ajustar as curvas de transição entre padrões de escoamento em seu método.

A **Figura 2.8** ilustra o efeito do diâmetro na transição entre padrões de escoamento segundo Wojtan et al. (2004). Pode-se observar que com a redução do diâmetro a região do título de vapor no qual ocorre o padrão de secagem de parede se amplia. As transições pistonado/intermitente e anular/secagem de parede ocorrem para títulos inferiores com a redução do diâmetro de forma análoga a Kattan et al. (1998). O modelo de Wojtan et al. (2004) fornece uma transição entre intermitente e anular para um título de vapor constante. Wojtan et al. (2004) prevê uma transição para estratificado ondulado em velocidades mássicas próximas a 150 kg/m²s para um diâmetro de 3 mm. Tal comportamento diverge dos resultados de Tibiriçá e Ribatski (2010). Estes autores não observaram escoamento estratificado para diâmetros reduzidos. No presente banco de dados o escoamento estratificado também não foi observado.

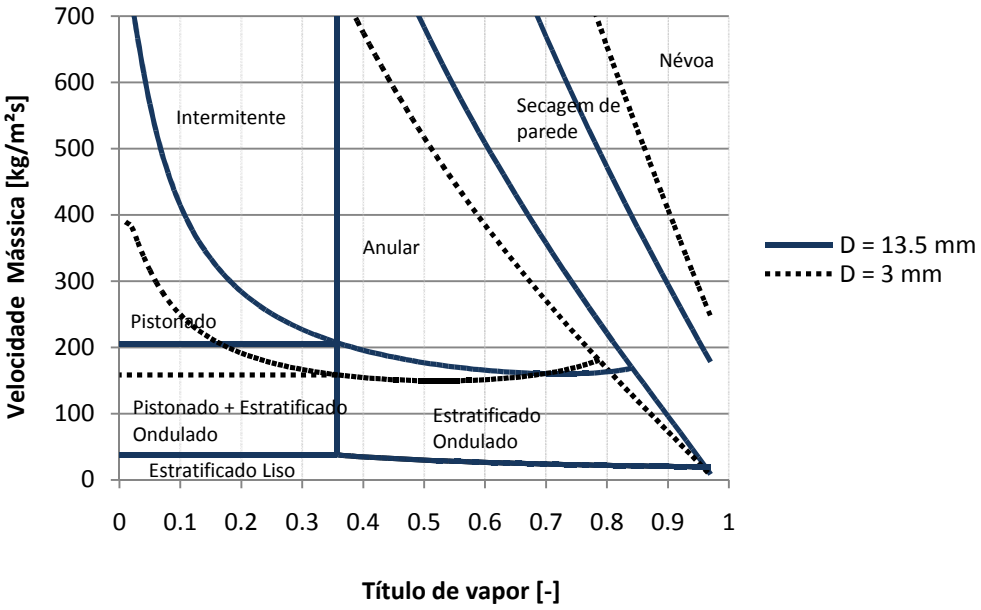


Figura 2.8 - Efeito do diâmetro na transição entre padrões de escoamento segundo Wojtan et al. (2004). R22, G = 300 kg/m²s, T_{sat} = 5 °C, ϕ = 57,5 kW/m².

A **Figura 2.9** ilustra os padrões de escoamento previstos por Wojtan et al. (2004) para temperaturas de saturação distintas. Pode-se observar que a transição intermitente/anular ocorre para títulos de vapor superiores para a temperatura de saturação de 41°C, comportamento similar ao observado por Kattan et al. (1998) e que

está relacionado ao decréscimo da relação ρ_G/ρ_L. As transições entre intermitente/anular, secagem de parede/névoa ocorrem para títulos superiores com o incremento de T_{sat}.

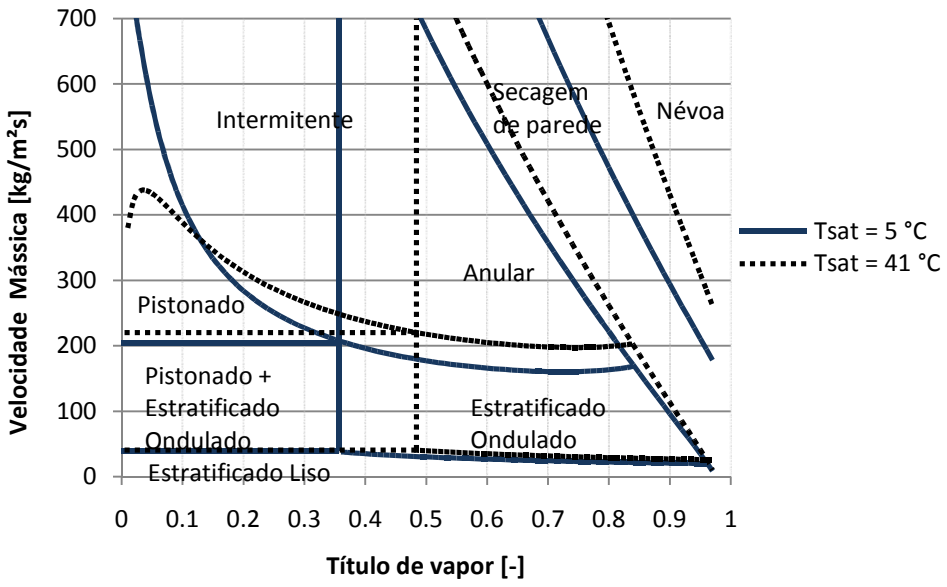


Figura 2.9 - Efeito da temperatura de saturação segundo o método proposto por Wojtan et al. (2004). R22, G = 300 kg/m²s, D = 13,5 mm, ϕ = 57,5 kW/m².

2.5.2 Métodos objetivos de identificação de padrões de escoamento

Métodos objetivos para a identificação dos padrões de escoamentos são baseados na análise de sinais característicos do escoamento através de técnicas estatísticas de agrupamento de dados e de inteligência artificial, independendo desta forma de critérios subjetivos de reconhecimento de imagens por um observador.

Neste item são descritos alguns dos métodos objetivos de reconhecimento até então utilizados. Uma descrição detalhada dos métodos foge ao escopo do presente estudo.

Os métodos estatísticos simples consideram características como o valor médio do sinal e seu desvio padrão e a função densidade de probabilidade, PDF, que é a função que representa a distribuição de probabilidade de uma variável. Outro parâmetro utilizado é a densidade espectral de energia, PSD, que descreve como a energia de um sinal esta distribuída com a frequência.

Entre os métodos de agrupamento utilizados estão os algoritmos que buscam identificar grupos com características similares. Entre os algoritmos de agrupamento encontram-se o K-Means e o Fuzzy C-Means. No algoritmo Fuzzy c-means, grupos de dados semelhantes são definidos a partir de determinado número de centróides. Os dados são agrupados segundo o centróide mais próximo. Entretanto um dado tem um certo grau de correspondência a um centróide ao contrario do método k-means, segundo o qual um dado corresponde totalmente a um determinado centróide. Uma descrição do algoritmo k-means encontra-se detalhada no item 4.2.2.

Na caracterização de padrões de escoamento também são utilizadas redes neurais artificiais, RNA, que consistem em sistemas computacionais estruturados de auto-aprendizado e auto-organizativos e estão inspirados nas estruturas do cérebro. É uma técnica de inteligência artificial indicada para previsões de processos não-lineares e demasiado complexos para serem modelados fenomenologicamente, segundo Willis et al. (1992).

Existem variações das redes neurais artificiais, entre elas podemos mencionar as RNA do tipo MLP (*Multilayer Perceptron*), SOM (*Self-Organizing Map*) e RNA com fuzzy ou lógica difusa. Uma rede neural artificial tipo fuzzy consiste em uma metodologia que combina a capacidade de filtro e interpolação de uma rede neural com as capacidades de agrupamento do fuzzy c-means. As redes neurais artificiais do tipo MLP (*Multilayer Perceptron*) são constituídas por um conjunto de nós fonte que formam a camada de entrada, uma série de camadas escondidas e uma camada de saída. Todas as camadas apresentam neurônios excetuando a camada de entrada, assim todas as outras camadas têm capacidade computacional e de auto-organização. Uma RNA do tipo SOM (*Self-Organizing Map – SOM*), também conhecida como mapa auto-organizativo de Kohonen, são redes neurais competitivas que possuem a habilidade de formar mapeamentos que preservam a topologia entre os espaços de entrada e de saída. As RNA do tipo SOM resolvem problemas não lineares de alta dimensionalidade, e estão baseadas no aprendizado competitivo, o que quer dizer que os neurônios "competem" entre si para serem ativados, segundo indicado por Castro e Castro (2010).

Durante o escoamento bifásico ocorrem variações instantâneas na perda de pressão, cujas características estão relacionadas aos padrões de escoamento. Hubbard e Dukler (1966), baseados em variações de distribuição espectral da pressão na parede da

tubulação, sugeriram que cada observação era representada por uma superposição dos seguintes padrões básicos que são: fases separadas, intermitente e disperso. Vale ressaltar, no entanto, que com esta suposição não é possível diferenciar os padrão de escoamento estratificado e anular, pois ambos seriam o padrão "fases separadas". Além disso, não ocorre uma diferenciação entre padrões com líquido disperso (névoa) e com gás disperso (bolhas).

Além da perda de pressão instantânea para um determinado comprimento de tubo e da pressão local, os padrões de escoamento podem ser caracterizados através da variação da fração de vazio local. Estudos foram realizados usando distintos métodos para a caracterização da fração de vazio. Entre as técnicas utilizadas encontram-se instrumentações sofisticadas como raios X e métodos simples como os sensores resistivos. Jones Jr e Zuber (1975) foram uns dos primeiros autores a desenvolver um mapa de padrões de escoamento baseado em critérios objetivos. Eles analisaram flutuações no sinal de fração de vazio medidas através de raios X. Jones Jr e Zuber (1975) identificaram os seguintes padrões de escoamento: bolhas, intermitente e anular.

As **Figuras 2.10** a **2.12** ilustram a imagem do padrão identificado com o respectivo sinal da fração de vazio com o tempo e sua função densidade de probabilidade (PDF).

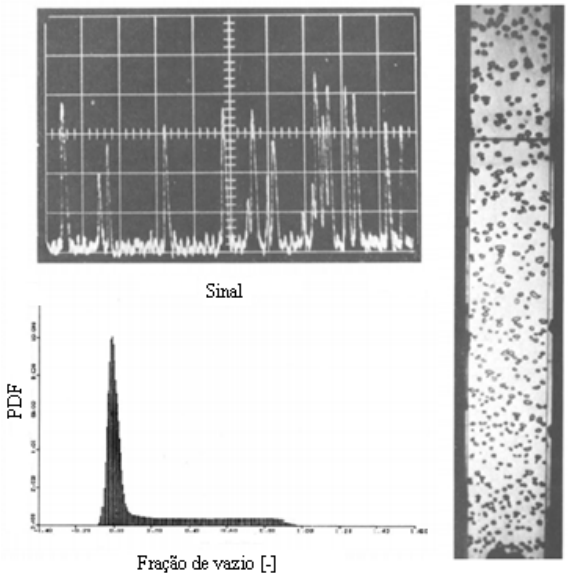


Figura 2.10 - Características do sinal para o padrão Bolhas, Jones e Zuber (1975).

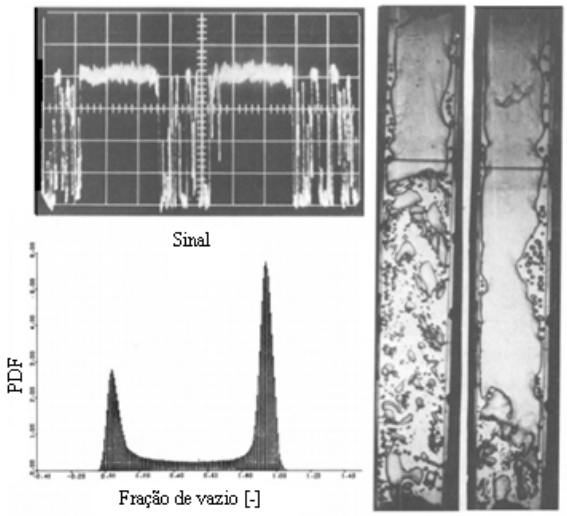


Figura 2.11 - Características do sinal para o padrão Intermitente, Jones e Zuber (1975).

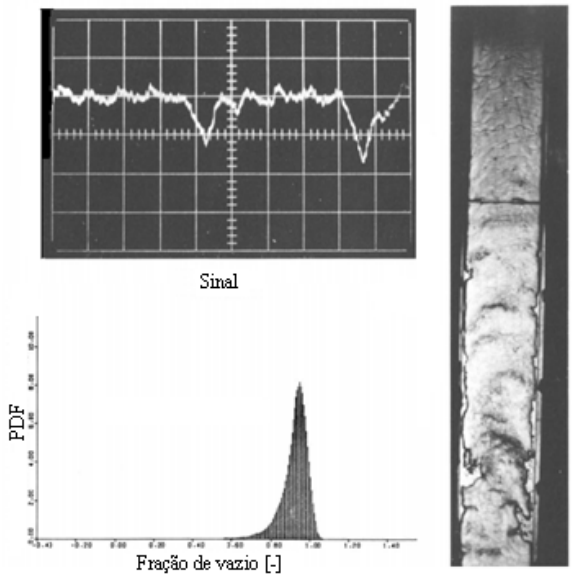


Figura 2.12 - Características do sinal para o padrão Anular, Jones e Zuber (1975).

A **Figura 2.13** ilustra o mapa de padrões de escoamentos levantados por Jones e Zuber (1975) a partir da análise dos sinais característicos de cada padrão e o tratamento estatístico.

Weisman et al. (1979) realizaram uma série de experimentos para diâmetros entre 12 mm e 51 mm visando identificar o efeito do diâmetro e das propriedades do fluido na transição entre os padrões de escoamento para tubos horizontais. Neste estudo os padrões foram determinados através de observações do escoamento e da análise do sinal relacionado à flutuação da perda de pressão. Através das observações foram

identificados os seguintes padrões de escoamento: bolhas, estratificado liso, estratificado ondulado, intermitente, anular e névoa. Com base em conceitos teóricos e em um banco de dados levantado, um método de previsão de padrões de escoamentos foi por eles desenvolvido. Baseados em seus dados experimentais, Weisman et al. (1979) também desenvolveram um mapa de escoamento tendo as velocidades superficiais nos eixos coordenados; este mapa apresentou concordância razoável com os resultados de Mandhane et al. (1974).

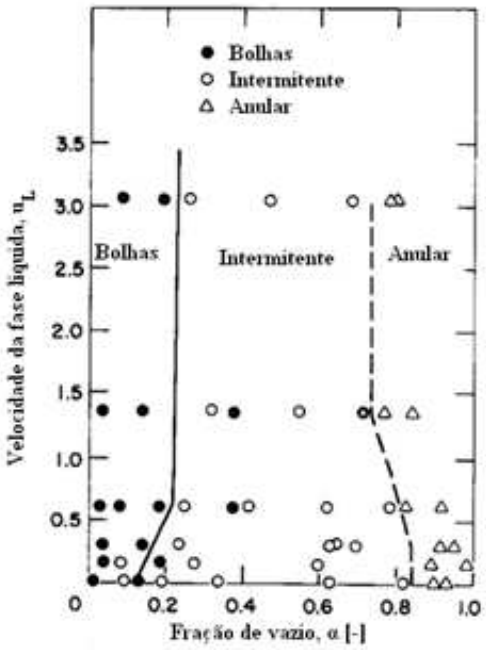


Figura 2.13 - Mapa de padrões de escoamento de Jones e Zuber (1975).

Spedding e Spencer (1993), para a identificação dos padrões para misturas ar-água em um tubo horizontal com diâmetro de 93,5 mm, utilizaram imagens do escoamento e características das flutuações dos sinais relacionados à pressão local e a perda de pressão ao longo de um determinado comprimento de tubulação.

Canière et al. (2009) desenvolveram um sensor de capacitância para o reconhecimento de padrões de escoamentos bifásicos. Este sensor foi aplicado a escoamentos horizontais ar - água em um tubo de 9 mm de diâmetro. A partir de uma análise multivariáveis (análise de 17 parâmetros do sinal) com o critério de Fisher e mediante coeficientes correlação dos 17 sinais com as velocidades mássicas do vapor e do líquido, foram determinados os seguintes dados de entrada como aqueles que identificam melhor os padrões: a média do sinal, a variância do sinal e a densidade

espectral da energia no domínio frequência de 10 a 100 Hz. Usando os parâmetros resultantes da análise multivariável, eles criaram um mapa de escoamento probabilístico classificando os dados através de um algoritmo de agrupamento (*c-means klustering*) e uma técnica de regressão polinomial para definir as linhas de transição entre distintos padrões de escoamento. A **Figura 2.14** ilustra uma comparação entre os dados experimentais e o mapa, ambos obtidos por Canière et al. (2009), e o método mecanistíco de Taitel e Dukler. Segundo a figura, o método captura razoavelmente a transição entre estratificado e anular, mas a transição entre estratificado e anular difere bastante dos dados experimentais. Foram apresentadas na figura duas curvas de transições, estando cada uma delas relacionadas a um diferente tipo de ajuste dos pontos previsto por este método objetivo, um deles uma regressão polinomial multivariáveis e o outro uma regressão vetorial. Infelizmente, nenhum dos métodos fornece uma predição ótima de todas as transições.

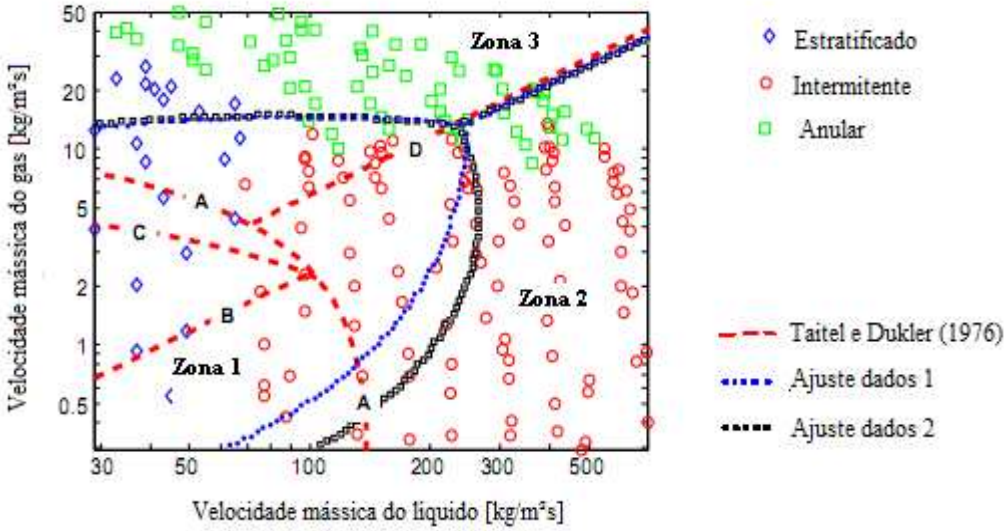


Figura 2.14 - Mapa de padrões de escoamento probabilístico desenvolvido por Caniere et al. (2009) comparado ao modelo de Taitel e Dukler (1976)

Seleguim e Herviu (1998) transcreveram no plano tempo – frequência através de uma transformada de Gabor sinais obtidos por uma sonda de condutividade aplicada ao escoamento bifásico horizontal ar – água. Através desta técnica, foram identificados os padrões estratificado liso, estratificado ondulado, intermitente, bolhas e anular. Os resultados demonstram que a técnica utilizada apresenta resultados satisfatórios na caracterização dos padrões de escoamento.

A **Tabela 2.4** apresenta uma recopilação de estudos da literatura que tratam da caracterização de padrões de escoamento através de métodos objetivos. A tabela indica os sinais característicos do escoamento utilizado pelos autores, os padrões identificados e a técnica utilizada.

Tabela 2.4 - Estudos envolvendo métodos objetivos existentes na literatura.

Autor (es)	Sinal analisado	Padrões de escoamento identificados	Técnica utilizada
Hubbard e Duckler (1966)	Pressão na parede da tubulação.	Fases separadas, intermitente e disperso.	PSD
Jones Jr. e Zuber (1975)	Fração de vazio através de raios X	Bolhas, intermitente e anular	PDF
Weisman et al. (1979)	Pressão diferencial	Estratificado, ondulado, intermitente, bolhas e anular	Combinação observações + análise sinal
Wang et al. (1991)	Pressão diferencial	Estratificado liso, ondulado, intermitente, bolhas e anular.	PDF
Spedding e Spencer (1993)	Pressão local e pressão diferencial	Combinações de estratificado, anular, pistonado e agitante	Combinação observações + análise sinal
Cai et al. (1994)	Pressão local	Bolhas, pistonado, agitante e anular	Redes Neurais Artificiais.
Tsoukalas et al. (1997)	Condutância do escoamento	Bolhas, pistonado, agitante e anular	Fuzzy com redes neurais
Seleghim e Hervieu (1998)	Sonda de condutividade	Estratificado liso, ondulado, intermitente, bolhas e anular.	Método estatístico
Mi et al. (2001)	Impedância do escoamento bifásico	Bolhas, pistonado, agitante e anular	Fuzzy c-means
Selli (2007)	Sonda de condutividade	Estratificado liso, ondulado, intermitente, bolhas e anular.	RNA tipo MLP
Yan et al. (2004)	Capacitância do escoamento	Estratificado, intermitente e anular	RNA tipo MLP
Oliveira (2004)	Pressão diferencial e local	Estratificado liso, ondulado, intermitente, bolhas e anular.	Redes Neurais Artificiais.
Hernandez et al. (2006)	Sensor de condutância	Bolhas, pistonado, agitante e anular	RNA tipo MLP
Juliá et al. (2008)	Condutividade do escoamento	Anular, bolhas, agitante, pistonado	RNA tipo SOM
Canière et al. (2009)	Capacitância elétrica	Estratificado, intermitente e anular	C-Means
Araújo et al. (2010)	Velocidade mássica, título de vapor e temp. de saturação	Bolhas, intermitente e anular	RNA tipo MLP

Entre os trabalhos que utilizaram Redes Neurais Artificiais (RNA) indicados na **Tabela 2.4** estão Cai et al. (1994) e Oliveira (2004). Outros autores preferiram usar variações das Redes Neurais Artificiais (RNA) de acordo com as vantagens proporcionadas por cada método. Entre os métodos com redes neurais utilizados encontram-se a combinação do RNA ao algoritmo de agrupamento Fuzzy C-Means, o RNA com SOM e o RNA tipo MLP. Dentre os autores que optaram por estas técnicas, encontram-se: Tsoukala et al. (1998), Selli (2007), Yan et al. (2004), Hernandez et al. (2006) e Juliá et al. (2008).

Recentemente, Araujo et al. (2010) desenvolveram uma rede neural com a velocidade mássica, título de vapor e temperatura de saturação como dados de entrada para o escoamento de R134a em tubos horizontais de diâmetro igual a 2.3 mm. As previsões através da rede neural apresentaram concordância razoável com as observações visuais apresentando um erro entre 2,63 % e 5,26 %.

2.6 Transição entre micro e macro escala para escoamentos bifásicos

A transição entre micro e macrocanais, embora comumente mencionada na literatura, não foi até então adequadamente caracterizada. Entretanto diversas classificações têm sido propostas, de maneira geral trocadores de calor envolvendo tubos com diâmetros hidráulicos superiores a 6 mm têm sido denominados de convencionais enquanto aqueles com diâmetros entre 1 e 6 mm de compactos. Segue uma descrição das principais caracterizações até então propostos.

Mehendal et al. (2000), baseados nos métodos de fabricação de tubos elaboraram a seguinte classificação: microcanais (1-100 µm), mesocanais (100 µm -1 mm), macrocanais (1 - 6 mm) e canais convencionais (D_H > 6 mm). Considerando que o interesse dos pesquisadores nesta transição é relacionar através de um método de previsão seus possíveis efeitos na queda de pressão, padrões de escoamento e no coeficiente de transferência de calor, uma classificação baseada em técnicas de fabricação não é um procedimento razoável para evidenciar tais efeitos.

Kandlikar e Grande (2003) consideraram em sua classificação, além dos métodos de fabricação, as aplicações e as características do escoamento referentes à rarefação de gases. Eles definiram como canais convencionais aqueles com diâmetro

hidráulico (D_H) superior a 3 mm. A faixa de diâmetro de canais utilizada em trocadores de calor compactos foi denominada por eles de minicanais com o D_H variando entre 200 µm e 3 mm. As demais classificações foram baseadas na rarefação dos gases, descrita através do número de Knudsen. Este adimensional é dado pela razão entre o comprimento do caminho livre molecular, que é a distância ou espaço entre duas colisões sucessivas das moléculas de um gás, e uma escala de comprimento fisicamente representativa. Esta escala de comprimento pode ser, por exemplo para escoamento no interior de canais circulares, o diâmetro do tubo. O número de Knudsen é dado por:

$$Kn = \frac{\lambda}{D_H} \tag{2.17}$$

$$\lambda = \frac{\mu\sqrt{\pi}}{\rho\sqrt{(2RT)}} \tag{2.18}$$

Não obstante este critério considere características apenas para escoamentos monofásicos, os autores recomendaram seu uso também para escoamentos líquidos e bifásicos. A **Tabela 2.5** apresenta a classificação proposta por Kandlikar e Grande (2003).

Tabela 2.5 - Classificação de canais proposta por Kandlikar e Grande (2003).

Denominação		**Faixa de Diâmetros**
Canais convencionais		D_H > 3 mm
Minicanais		3 mm > D_H > 200 µm
Microcanais		200 µm > D_H > 10 µm
Transição Canais		10 µm > D_H > 0,1 µm
Canais de transição	Microcanais	10 µm > D_H > 1 µm
	Nanocanais	1 µm > D_H > 0,1 µm
Nanocanais moleculares		0,1 µm > D_H

Kew e Cornwell (1997) propuseram um critério fenomenológico baseado no confinamento de uma bolha dentro de um canal relacionando o diâmetro hidráulico do canal ao diâmetro de desprendimento de uma bolha em um meio infinito, dado por:

$$D_{Tr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_L - \rho_G)}} \tag{2.19}$$

Para diâmetros hidráulicos superiores ao diâmetro de transição, D_{Tr}, os canais são definidos como macrocanais (ebulição em macro-escala), no caso de diâmetros hidráulicos inferiores, os canais são definidos como microcanais (ebulição em micro-escala). Segundo este critério e conforme indicado por Thome e Ribatski (2005) e ilustrado na **Figura 2.15**, a transição entre micro e macro-escala pode variar de 5 mm para água a reduzidos valores de p_r, até 1 mm para o CO_2 e pressões reduzidas superiores a 0,8.

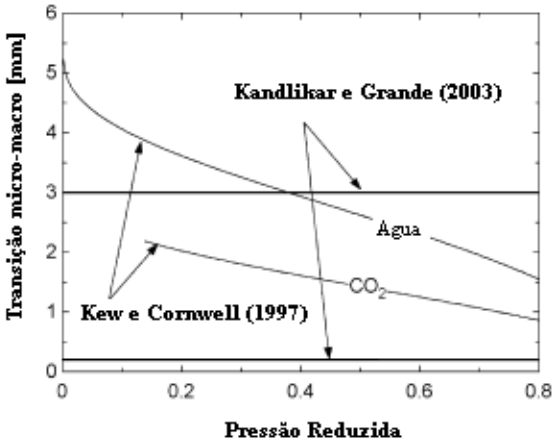


Figura 2.15 - Variação do diâmetro de transição entre micro e macroescala, Thome e Ribatski (2005)

Ullman e Brauner (2006), baseados na análise dos mecanismos de transição de padrões de escoamento, verificaram que um número de Eötvös inferior a 1,6 caracteriza a transição de micro para macro-escala. Este critério também considera as condições de confinamento de bolhas no interior do canal já que o número de Eötvös representa a relação existente entre efeitos de empuxo e de tensão superficial, e pode ser escrito como uma função do número de confinamento, considerado por Kew e Cornwell (1997) da seguinte forma:

$$E_O = \frac{1}{Co^2} \tag{2.20}$$

Celata (2008) menciona que critérios de caracterização baseados apenas em condições de confinamento de bolhas em condições de convecção natural, como os

propostos por Kew e Cornwell (1997) e Ullman e Brauner (2006), indicam comportamento em micro-escala em condições de microgravidade independentemente do diâmetro do tubo. Assim, Celata (2008) executou experimentos para em condições de microgravidade através de vôos parabólicos e verificou que o diâmetro de desprendimento de bolhas em microcanais e desta forma o grau de confinamento, também são influenciados pelo título de vapor e a velocidade mássica.

Como anteriormente mencionado, a literatura busca distinguir micro e macrocanais, entretanto surgem as seguintes questões: Seria realmente necessário realizar tal classificação? Esta transição realmente ocorre? Seria ela abrupta, ou progressiva? Desta forma, o objetivo de pesquisas neste tema deve ser identificar características do escoamento e comportamentos para o coeficiente de transferência de calor, fração de vazio superficial, perda de pressão e fluxo crítico que realmente diferenciem fenômenos em micro e macro-escala, indicando a necessidade de modelos distintos para estes parâmetros de projeto. Com base na revisão da literatura verificamos que as classificações de Mehendal (2000) e Kandlikar e Grande (2003) não observam tal preceito. Já Ullman e Brauner (2006) e Kew e Cornwell introduzem um conceito físico importante que é o confinamento das bolhas, considerando o desprendimento de bolhas em um meio infinito, mas que, segundo Celata (2008), não é o único parâmetro para caracterizar tal transição. Este autor acrescentou que as condições de confinamento não dependem apenas das propriedades do fluido e do diâmetro do canal, mas também do título de vapor e da velocidade da mistura bifásica.

2.7 Padrões de escoamento em microcanais

Considerando o fato da transição entre micro e macrocanais não estar razoavelmente definida, considera-se, para efeitos deste estudo, microcanais aqueles com diâmetros inferiores a 3 mm.

Os padrões de escoamento geralmente observados em microcanais são os seguintes: bolhas dispersas, pistonado, bolhas alongadas, agitante e anular. A **Figura 2.16** ilustra estes padrões de escoamento identificados por Triplett et al. (1999). Segundo a maioria dos estudos, em canais de diâmetro reduzido parece não ocorrer o padrão estratificado conforme demonstrado por Triplett et al. (1999), Damianides e Westwater (1988), Serizawa et al. (2002) e Tibiriçá e Ribatski (2010).

A **Tabela 2.6** descreve esquematicamente estudos sobre padrões de escoamento em microcanais. Nela são apresentadas as dimensões dos canais, a geometria, a faixa de velocidades e os fluidos utilizados. É interessante ressaltar que alguns destes estudos envolvem dimensões características superiores a 3 mm, isto é, superior ao valor de transição adotado no presente estudo.

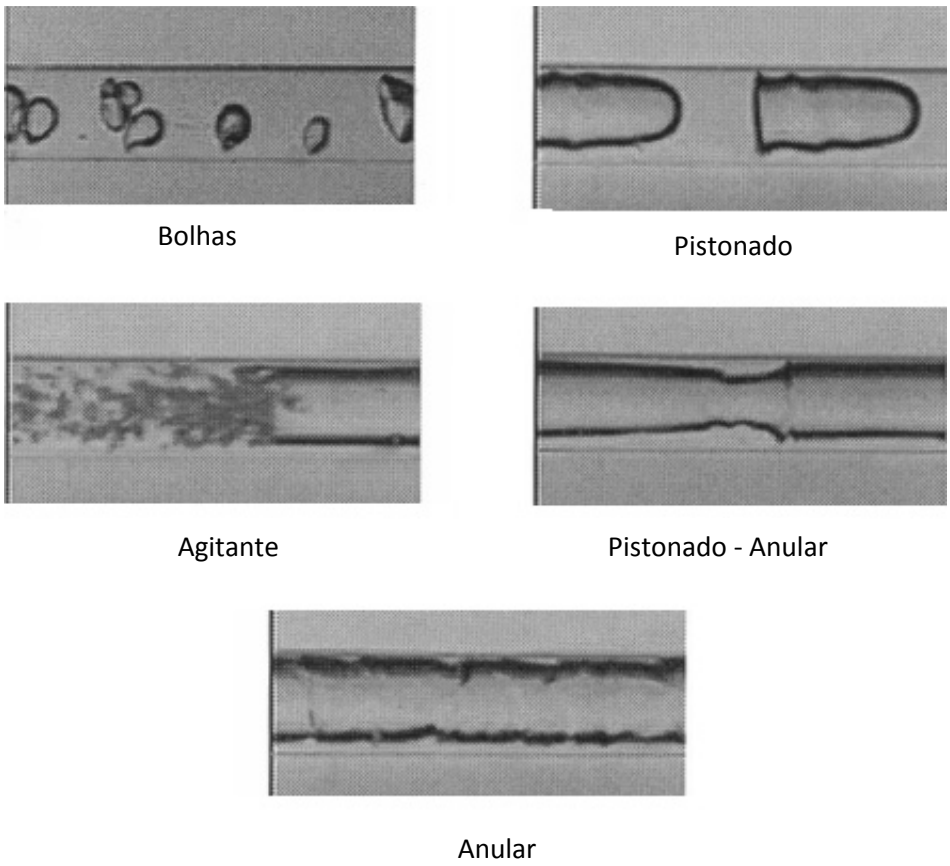


Figura 2.16 - Padrões de escoamento em microcanais, segundo Triplett et al. (1999) para ar-água e D = 1,097 mm.

Barnea et al. (1983) obtiveram resultados experimentais para canais horizontais e verticais com diâmetros entre 4 mm e 12 mm. Estes resultados foram comparados com os modelos para tubulações horizontais de Taitel e Dukler (1976) e para tubulações verticais de Taitel et al. (1980). A partir desta comparação, eles concluíram que com o decréscimo do diâmetro os desvios em relação ao método de Taitel e Dukler se elevam.

Assim, Barnea et al. (1983) foram os primeiros a propor um modelo para a previsão de padrões de escoamento em canais de dimensões reduzidas. Eles consideraram como ponto de partida a análise teórica desenvolvida por Taitel e Dukler (1976) para tubulações de diâmetros elevados. Taitel e Dukler (1976) consideraram o

mecanismo de instabilidade de Kevin-Helmotz como o critério de transição entre escoamentos estratificado e intermitente conforme mencionado no item 2.2.1.

Tabela 2.6 - Estudos sobre padrões de escoamento em microcanais.

Autores	**Geometria/ Orientação**	**Fluido Utilizado**	***D_H* [mm]**	**Velocidade superficial do líquido**	**Velocidade superficial do gás**
Suo e Griffith (1964)	Circular/H	Ar/água; N_2/Água; He/Heptano; N_2/Heptano	1,1 – 1,4	-	
Damianides e Westwater (1988)	Circular/H	Ar/Água	1;2;3;4;5	0,0024 – 5,72	0,015-125,3
Galbiati e Andreini (1992)	Circular/V	Ar/Água	0,5;1,1;2	0,001 - 1,0	1,0 - 10,0
Fukano e Kariyasaki (1993)	Circular/H, V	Ar/Água	1;2,4;4;9	0,02 – 2,2	0,07 – 30
Barajas e Panton (1993)	Circular/H	Ar/Água	1,6	0,003 - 2	0,01- 100
Wilmarth e Ishii (1994)	Retangular/H	Ar/Água	1;2	0,022 – 4,3	0,035 – 15
Mishima e Hibiki (1996)	Circular/V	Ar/Água	1;2;3;4	0,0116 - 2	0,09 – 79
Coleman e Garimella (1999)	Circular e Retangular/H	Ar/Água	1,3 a 5,5	0,01 - 10	0,1 – 100
Triplett et al. (1999)	Circular e Triangular/H	Ar/Água	1,1 e 1,45; 1,09 a 1,49	0,02 - 8	0,02 – 80
Yang e Shieh (2001)	Circular/H	Ar/Água; R134a	1;2;3	0,006 – 2,1	0,014 – 91,5
Zhao e Bi (2001)	Triangular/V	Ar/Água	0,87;1,44;2,87	0,08 - 10	0,1 – 100
Chen et al. (2002)	Circular/H	N_2/Água	1;1,5	0,399 – 3,52	0,502 – 11
Kawahara et al. (2002)	Circular/H	N_2/Água	0,1	0,02 - 4	0,1 – 60
Serizawa et al. (2002)	Circular/H	Ar/Água	0,02;0,025;0,1	0,003 – 17,52	0,0012 – 215,3
Chung e Kawaji (2004)	Circular/H	Vapor/Água N_2/Água	0,05;0,1;0,25; 0,53	0,01 – 5,77	0,02 – 73
Vaillancourt et al. (2004)	Circular/H		0,8;1;3	0,02 – 1	10 – 100
Cubaud e Ho (2004)	Retangular/H	Ar/Água	0,2;0,525	0,001 – 0,2	0,003 - 20
Hassan et al. (2005)	Circular/H	Ar/Água	0,8;1;3	0,02 – 3,82	10 - 100
Zobieri (2006)	Circular/H	Ar/Água	1;3;6	0,006 – 4	0,03 – 100
Haverkamp et al. (2006)	Retangular/H	Ar/Água Isopropanol	0,150 e 0,2945	0,001– 0,0074	0,001 - 22
Ide et al. (2007)	Circular e Retangular/H	Ar/Água	1;2,4;4,9 e 1;1,33;1,67;1,81	0,03 – 2,3	0,1 – 30
Lee e Lee (2008)	Circular/H	Ar/Água; Metanol	1,46 a 1,8	0,004 – 0,8	0,3 - 53
Yue et al. (2008)	Retangular/H	CO_2/Água	0,2;0,4;0,667	0,02 - 2	0,04 - 70

* H ➔ Horizontal; V ➔ Vertical

Ao contrário de Taitel e Duckler (1976) o método proposto por Barnea et al. (1983) considera efeitos gravitacionais e de tensão superficial na transição entre escoamento estratificado e intermitente. Como se pode observar na **Figura 2.17**, quando a velocidade do gás se eleva as ondulações do líquido podem atingir o topo da tubulação tendo como consequência a redução do nível de líquido na interfase líquido – gás.

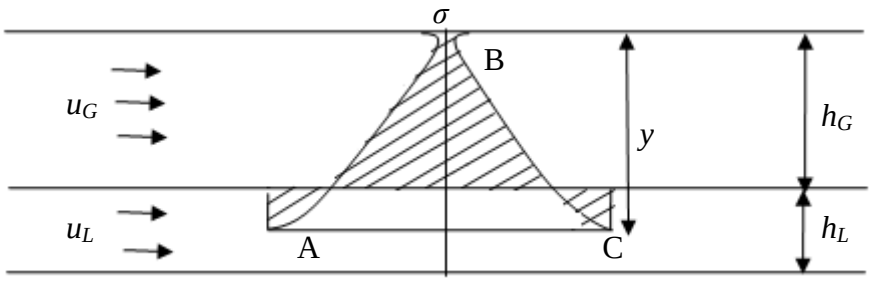


Figura 2.17 - Representação esquemática do critério de transição entre escoamento estratificado e intermitente segundo Barnea et al. (1983).

A partir da análise do esquema da **Figura 2.17** e mediante um balanço entre as forças gravitacionais e de tensão superficial na região ABC, têm-se as condições para transição entre os padrões de escoamento. Dadas por:

$$h_G \leq \frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho g\left(1-\pi/4\right)}}, \tag{2.21}$$

No caso de condições onde o valor máximo de "*y*" pode ser alcançado (*y = D)* adota-se a Eq. 2.11 já que a condição da Eq. 2.10 seria mais facilmente cumprida.

$$h_G \leq \frac{\pi}{4}D \tag{2.22}$$

Barnea et al. (1983) também propuseram para a transição intermitente – anular um novo valor igual a 0,35 para a relação h_L/D ao contrario do 0,5 adotado anteriormente por Taitel e Dukler (1976).

Revellin e Thome (2007) propuseram um mapa de padrões de escoamento tomando por base imagens do escoamento e a frequência de bolhas alongadas. Eles classificaram os padrões da seguinte forma: (i) padrão da bolha isolada, BI, caracterizado por uma velocidade de geração superior à velocidade de coalescência das

bolhas; (ii) padrão das bolhas coalescentes, BC, caracterizado por uma velocidade da coalescência superior à velocidade da geração de bolhas; (iii) padrão anular e (iv) padrão pós-secagem de parede. Partindo desta classificação, correlações empíricas foram ajustadas a um banco de dados para as transições entre os diferentes padrões de escoamento.

Posteriormente, Ong e Thome (2009) modificaram o método inicialmente proposto por Revellin e Thome (2007). Eles somaram ao banco de dados inicial resultados experimentais adicionais. Buscando generalizar o método para fluidos distintos daqueles presentes em seu banco de dados foi incorporado nesta nova correlação um parâmetro dado pela razão entre a pressão de saturação do fluido de trabalho com a pressão de saturação do R134a a mesma temperatura. O método de Ong e Thome (2009) é dado pelas seguintes equações:

$$x_{BI/BC} = 0{,}763\left(\mathrm{Re}_{Lo}\frac{Bo}{We_{Go}}\right)^{0{,}41} \tag{2.23}$$

$$x_{BC/Anular} = 0{,}00014\,\mathrm{Re}_{Lo}^{1{,}47}\,We_{Lo}^{-1{,}23}\left[\frac{p_{sat}\left(Fluido\right)}{p_{sat}\left(R134a\right)}\right]^{0{,}45} \tag{2.24}$$

$$x_{crit} = \frac{\phi_{crit}}{G\left(h_{LG}+h_{sub}\right)}\frac{4L}{D} \tag{2.25}$$

$$\phi_{crit} = 0{,}437\left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0{,}073}We_{Lo}^{-0{,}24}\left(\frac{L}{D}\right)^{-0{,}72}Gh_{LG} \tag{2.26}$$

A **Figura 2.18** ilustra o efeito da temperatura de saturação nas transições entre padrões de escoamento propostas por Ong e Thome (2009). O título de vapor para a transição entre Bolhas Coalescentes e Anular se eleva com a redução da temperatura de saturação, quando deveria ser o contrário, pois o volume específico do gás se eleva com o decréscimo da temperatura de saturação, e consequentemente, promove o incremento da velocidade do vapor facilitando a quebra das pontes de líquido resultando em um título de vapor de transição inferior. O título de transição entre Bolhas Isoladas e Bolhas Coalescentes tem seu valor elevado com o incremento da temperatura de saturação. Tal

comportamento concorda com o esperado, já que a tensão superficial decresce com o incremento da temperatura de saturação facilitando a coalescência das bolhas.

Felcar et al. (2007) modificaram o método desenvolvido por Taitel e Dukler (1976), de forma a adequar sua aplicação a canais de diâmetro reduzido. Efeitos de tensão superficial e ângulo de contato foram incluídos ao método de Taitel e Dukler (1976) mediante a introdução do número de Eotvos modificado. Para a elaboração deste método foram considerados dados da literatura para escoamentos ar-água em microcanais. Os autores definiram apenas os seguintes padrões de escoamento: bolhas dispersas, intermitente, compreendendo bolhas alongadas e agitante, anular e estratificado.

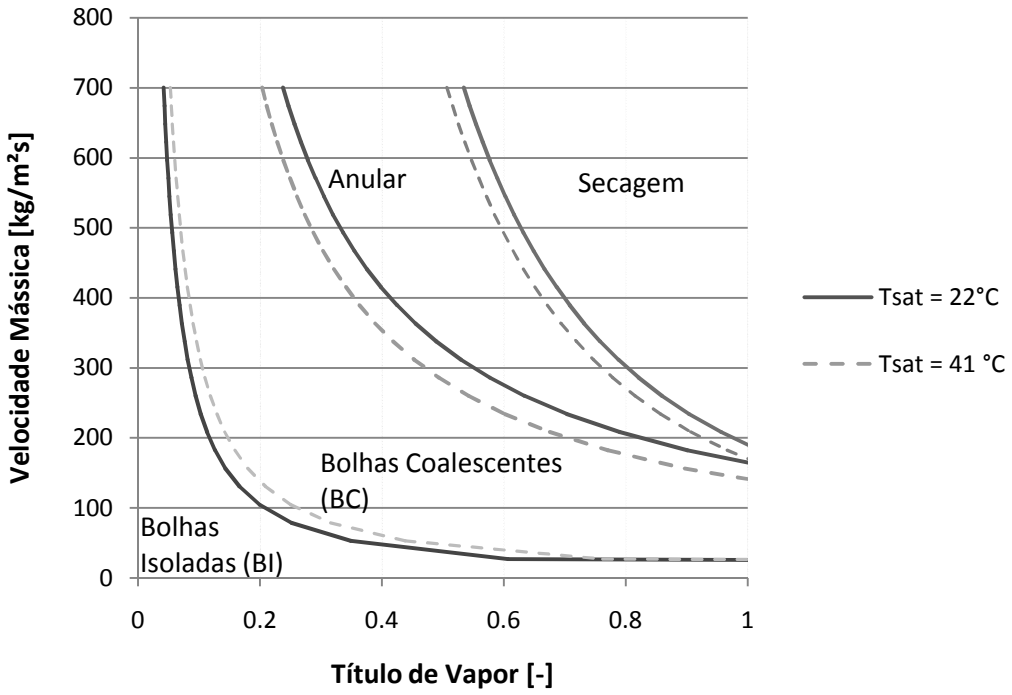


Figura 2.18 - Efeito da temperatura de saturação na transição entre padrões de escoamento segundo o método de Ong e Thome (2009), R134 a, D = 3 mm.

Para a transição entre escoamentos estratificado/intermitente e estratificado/ anular os autores acrescentaram um parâmetro Z ao critério de transição sugerido por Taitel e Dukler (1976). O número de Eotvos foi modificado para incluir nele efeitos de molhabilidade, através do ângulo de contato, θ. Assim, o parâmetro Z é função dos números de Eötvos modificado, incluindo efeitos de molhabilidade e gravitacionais, e

do número do Weber modificado que compreende efeitos de tensão superficial e inerciais do vapor em relação ao líquido através da velocidade relativa entre as fases. Para diâmetros elevados, o valor de Z se torna desprezível, e a linha de transição permanece como aquela dada por Taitel e Dukler (1976). Por outro lado, com a redução do diâmetro, Z tem seu valor incrementado e a transição passa a ter seu valor definido por Z. O parâmetro Z é dado pela seguinte correlação:

$$Z = -56 Eo_M^{-0,6} \left(1 - e^{-0,02 Eo_M^{-0,5} We_M}\right) \tag{2.27}$$

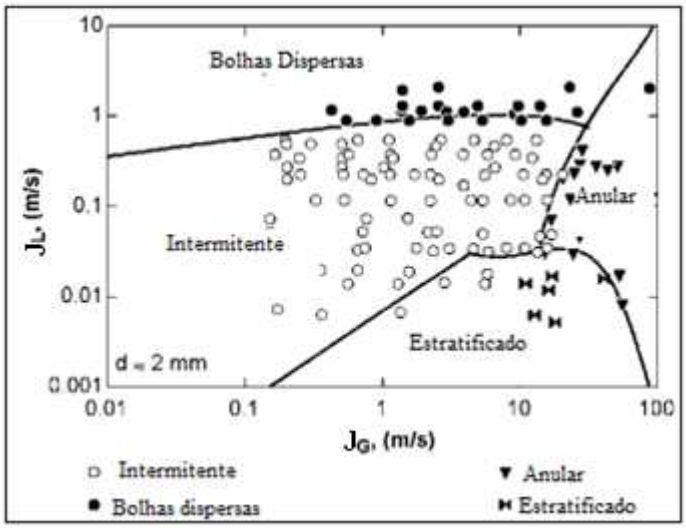
$$Eo_M = \frac{g\left(\rho_L - \rho_G\right) D^2}{\sigma \cos\theta} \tag{2.28}$$

$$We_M = \frac{\rho_G \left(u_G - u_L\right)^2 D}{\sigma} \tag{2.29}$$

Para a transição entre escoamento intermitente e anular, conforme anteriormente mencionado, Taitel e Dukler (1976) assumiram a transição para uma razão fixa de h_L/D. Felcar et al. (2007) obtiveram uma correlação empírica para a fração de vazio de transição que depende do número de Eotvos e Weber. Este critério baseia-se no mecanismo de rompimento das pontes de líquido, o qual depende dos efeitos da tensão superficial representado pelo número de Eotvos e a velocidade relativa da fase vapor representada pelo número de Weber. Esta transição é dada conforme a seguinte equação:

$$\alpha = 1,2 Eo_M^{-0,088} We_M^{-0,16} \tag{2.30}$$

Conforme ilustrado na **Figura 2.19** para o R134a, este modelo apresentou resultados satisfatórios quando comparados a dados independentes para fluidos distintos de ar-água, cujas propriedades de transporte e termodinâmicas diferem em uma ordem de grandeza a dos refrigerantes.



J

Figura 2.19 - Comparação entre o método de Felcar et al. (2007) e dados levantados por Yang e Shieh (2001) para o R134a.

CAPÍTULO 3 - APARATO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Este capítulo descreve o funcionamento do aparato experimental, seus equipamentos e a instrumentação utilizada no presente estudo. A bancada está localizada no departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC – USP) e foi construída visando o estudo da ebulição convectiva de refrigerantes halogenados no interior de canais de diâmetro reduzido.

A bancada experimental compõe-se basicamente do circuito do refrigerante (ou de testes) e o circuito auxiliar (ou de etileno-glicol/água) descritos a seguir.

3.2 Circuito de teste

No circuito do refrigerante, esquematicamente ilustrado na **Figura 3.1**, o fluido de trabalho escoa em circuito fechado. Este circuito inclui uma microbomba, responsável pelo deslocamento do fluido refrigerante, um medidor de vazão, uma seção de pré-aquecimento, seção de testes, seção de visualização um trocador de calor responsável por condensar o vapor produzido nas seções aquecidas e um reservatório de refrigerante. A vazão do fluido é controlada através de um variador de frequência que atua na rotação da microbomba. A **Figura 3.2** ilustra as condições do refrigerante escoando no circuito de teste num diagrama *p* vs. *i*. Nela, a numeração apresentada relaciona o estado do fluido à sua localização no circuito de testes da **Figura 3.1**.

A pressão de operação é determinada e controlada com o auxílio do reservatório através da retirada ou adição de fluido refrigerante ao circuito. A partir da linha conectada ao reservatório o fluido escoa por um trocador de calor, que tem como objetivo subresfriar o fluido de teste (1 → 2), e pelo filtro/secador (2 → 3). Após o filtro encontra-se um visor de líquido para verificar a presença de bolhas a montante da microbomba (3 → 4).

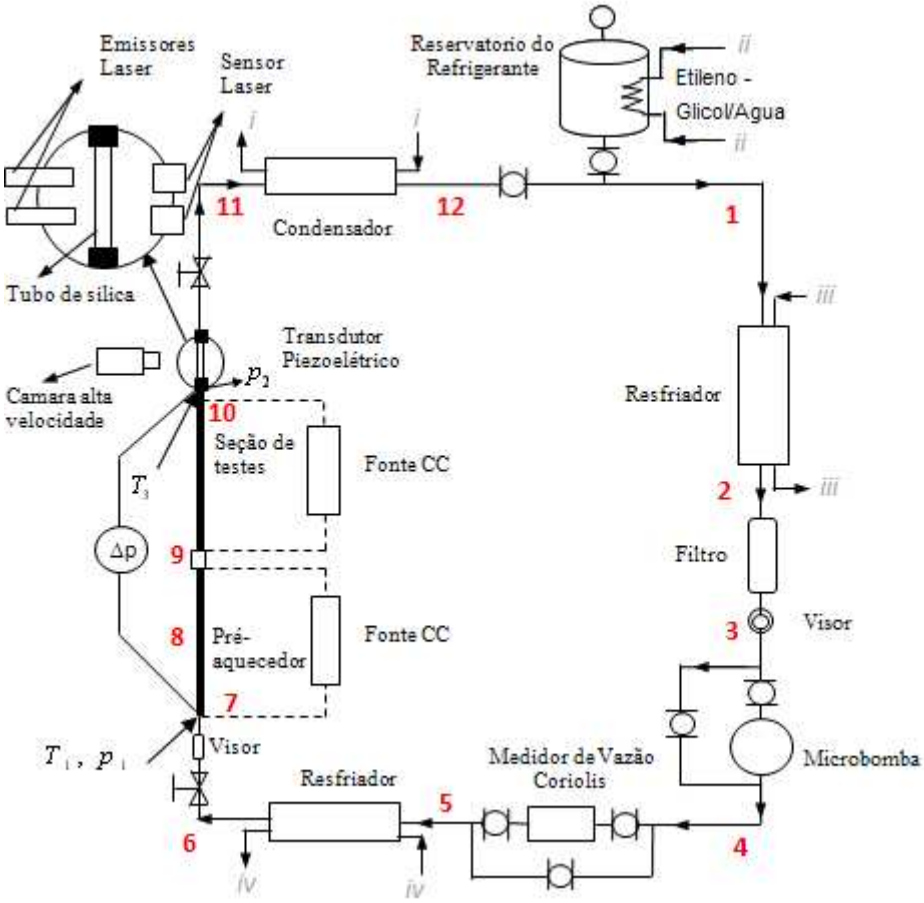


Figura 3.1 - Esquema do circuito do refrigerante.

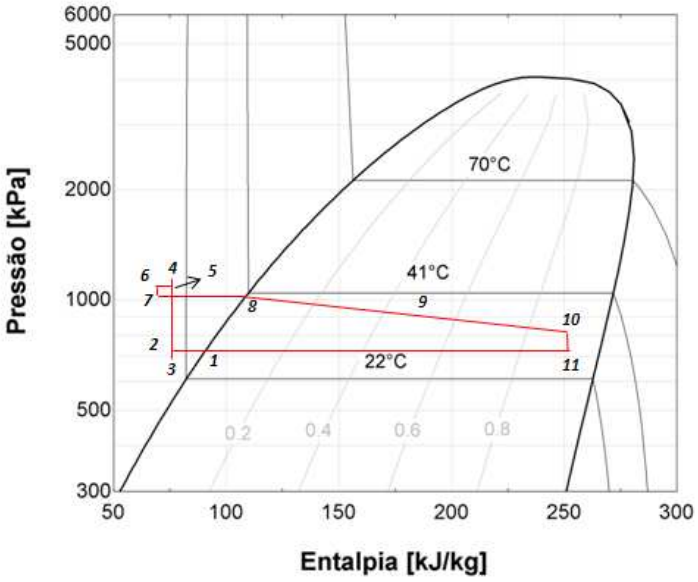


Figura 3.2 - Diagrama pressão vs. entalpia do refrigerante ao longo do circuito de testes para o R134a.

A jusante da microbomba encontra-se um medidor de vazão tipo Coriolis (4 → 5), cuja função é determinar a vazão mássica do fluido. Após este componente encontra-se um segundo trocador de calor (5 → 6) com a função de subresfriar o fluido de trabalho e assegurar a ausência de vapor. Logo depois do trocador, e a montante do pré-aquecedor, encontra-se uma válvula do tipo agulha (6 → 7) com a função de impor uma restrição ao escoamento através de uma perda de pressão local reduzindo, assim, a propagação de instabilidades a partir das seções aquecidas. Depois desta válvula encontra-se um visor, para assegurar a ausência de bolhas no escoamento. A montante do pré-aquecedor e em uma região com diâmetro similar ao da superfície aquecida são determinadas a temperatura, T_1, e a pressão do fluido de trabalho, p_1, permitindo estimar a entalpia do fluido na entrada da seção aquecida. A temperatura T_1 e a pressão P_1 são respectivamente fornecidas por um termopar tipo K com diâmetro de junção quente igual a 0,25 mm e um transdutor de pressão absoluta tipo piezoresistivo. Na seção de pré-aquecimento, (7 → 9) o fluido é aquecido por efeito Joule com a aplicação direta de corrente contínua à parede do tubo. Nesta seção o refrigerante é aquecido até a condição de saturação (8). A partir daí, o fluido escoa através da seção de teste, também aquecida por efeito Joule. A **Figura 3.2** ilustra a perda de pressão bifásica entre o estado saturado (8) e o fim da seção de testes (10), após a qual encontra-se a seção de visualização cujo registro fotográfico encontra-se na **Figura 3.3**.

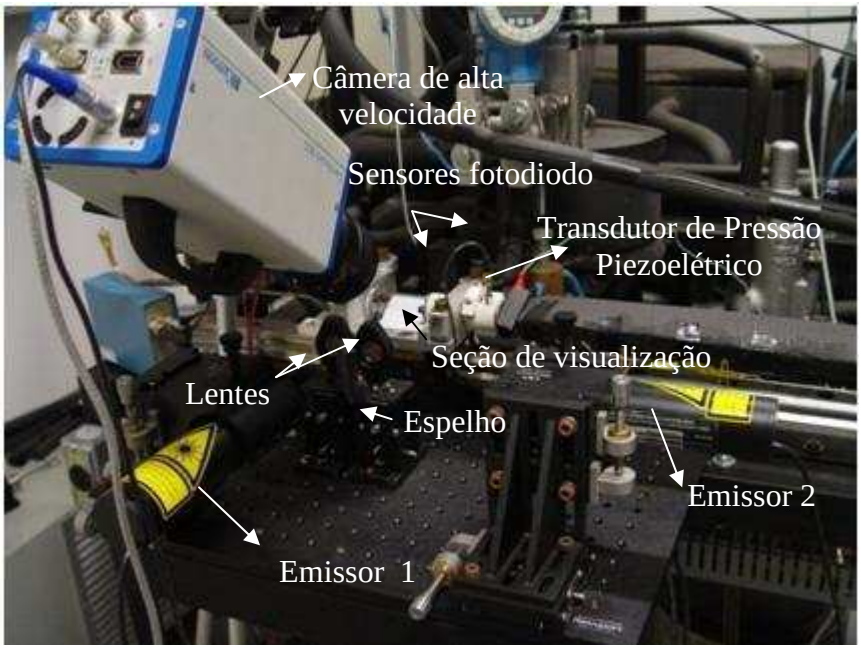


Figura 3.3 - Registro fotográfico da seção de visualização com os componentes utilizados na caracterização do escoamento.

Após a seção de visualização o refrigerante passa por uma segunda válvula do tipo agulha com funções similares à anterior, a jusante desta válvula o fluido é condensado em um trocador de calor tubo-em-tubo (11 → 1).

Ao final da seção de testes o fluido tem sua temperatura, T_2, determinada através de um termopar com diâmetro de junção quente igual a 0,25 mm. A pressão nesta região é estimada por intermédio de um transdutor de pressão diferencial que proporciona a perda de pressão entre a entrada da seção de pré-aquecimento e a entrada da seção de visualização, Δp. Conforme ilustrado na **Figura 3.3**, na entrada da seção de visualização encontra-se instalado um transdutor piezoelétrico de pressão. Este transdutor é utilizado na identificação dos padrões de escoamento. Na seção de visualização são realizadas filmagens do escoamento com uma câmara de alta velocidade e encontram-se instalados os pares de emissores/sensores lasers com suas respectivas lentes posicionadores e espelhos ilustrados na **Figura 3.3**.

3.3 Circuito auxiliar

O circuito de etileno-glicol/água tem como função condensar e subresfriar o fluido de testes. Nele circula uma solução de 60% de etileno-glicol em água, que opera como fluido intermediário num sistema composto por aquecedores elétricos atuado por controladores PID, três tanques para a solução etileno-glicol/água, trocadores de calor e um sistema de refrigeração de compressão de vapor. Um esquema completo deste circuito é ilustrado na **Figura 3.4**.

O Reservatório I é resfriado a partir de um sistema de refrigeração de compressão de vapor. Os Reservatórios II e III possuem resistências elétricas atuadas por controladores PID, as quais, em conjunto com os trocadores de calor no interior dos quais circula fluido bombeado a partir do Reservatório I, estabelecem a temperatura da solução contida nestes reservatórios. Válvulas de agulha também atuam no ajuste das temperaturas no interior dos Reservatórios II e III. O fluido armazenado no reservatório II é utilizado para controlar a temperatura de saturação do reservatório do refrigerante e o fluido contido no Reservatório III é usado como fonte de líquido frio para os trocadores de calor do circuito do refrigerante. Bombas centrífugas promovem o deslocamento da solução de água/etileno glicol a partir dos Reservatórios.

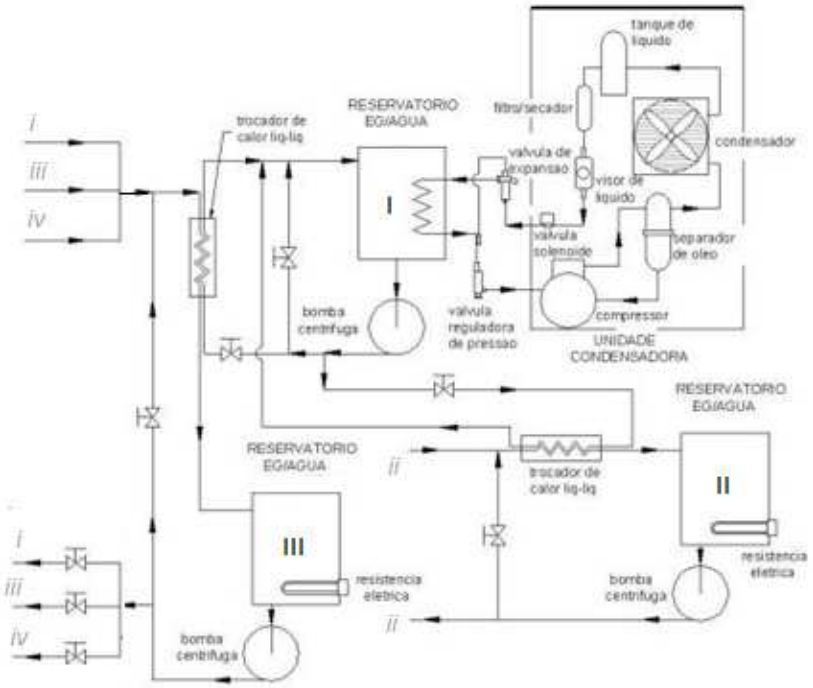


Figura 3.4 - Esquema do circuito auxiliar (ou de etileno glicol/água).

3.4 Descrição dos componentes e da instrumentação utilizada.

Esta seção apresenta uma descrição dos equipamentos e instrumentos de medição que compõe o circuito do refrigerante da bancada experimental.

3.4.1 Reservatório de refrigerante

O Reservatório do refrigerante possui aproximadamente 0,01 m³ e auxilia no controle da pressão de saturação do circuito de testes. Refrigerante é transferido do circuito para ele quando o objetivo é operar em condições de pressão de saturação elevadas, e no sentido oposto para operação em pressões de saturação reduzidas. A pressão de saturação no interior do Reservatório é controlada através da circulação da solução de etileno glicol/água do circuito auxiliar através de uma serpentina localizada em seu interior (linha ii na **Figura 3.4**). O Reservatório de refrigerante encontra-se suspenso através de um dinamômetro, o qual permite avaliar a quantidade do refrigerante no próprio Reservatório e também no circuito, através do registro

apropriado dos processos de carga e descarga de refrigerante. Este dinamômetro apresenta escala de 0 a 20 kgf em divisões de escala de 100 gf.

3.4.2 Microbomba

Uma microbomba da *Micropump* é utilizada para deslocar o fluido refrigerante através do circuito de testes. A bomba possui um par de engrenagens não metálicas onde o acoplamento transmite, através de um campo magnético, a energia necessária à engrenagem motriz. A vazão é controlada por um variador de frequência do modelo ABB-ACS150, atuando na rotação da bomba. A **Tabela 3.1** apresenta as principais características da microbomba utilizada.

Tabela 3.1 - Características operacionais da microbomba.

Característica	**Valor**
Pressão diferencial máxima	880 kPa
Vazão máxima	0,0007 m³/s
Temperatura máxima	260°C
Rendimento	61,90%
Viscosidade máxima	2,5 kg/m.s

3.4.3 Fonte de corrente contínua

Duas fontes de corrente contínua ilustradas na **Figura 3.5**, fabricadas pelo *Lambda/Genesys* do modelo GEN 20-38 com potência máxima de 750 W, encontram-se instaladas na bancada experimental, uma alimentando a seção de testes e a segunda o pré-aquecedor.

As duas fontes fornecem de 0 a 20 V e de 0 a 38 A. Elas possuem um dispositivo que permite corrigir a queda de tensão ao longo da fiação, conectores e alimentação mediante a regulação da tensão e corrente na saída. A fonte inclui uma interface digital (16 bit) R232.

Figura 3.5 - Fonte de corrente contínua.

3.4.4 Seções de teste e pré-aquecimento

A seção de teste e o pré-aquecedor consistem de superfícies tubulares em aço inoxidável com diâmetro interno de 2,32 mm, espessura de parede de 0,325 mm e rugosidade média de 0,33 μm medido através de um rugosímetro de Taylor e Robson. A seção de pré-aquecimento e a de testes apresentam comprimento de 500 mm cada.

As seções de pré-aquecimento, de testes e de visualização estão unidas mediante conexões constituídas por material isolante elétrico. Suas conexões foram especialmente desenvolvidas de forma a manter uma superfície interna contínua e sem ressaltos. A **Figura 3.6** ilustra as seções de testes e de pré-aquecimento.

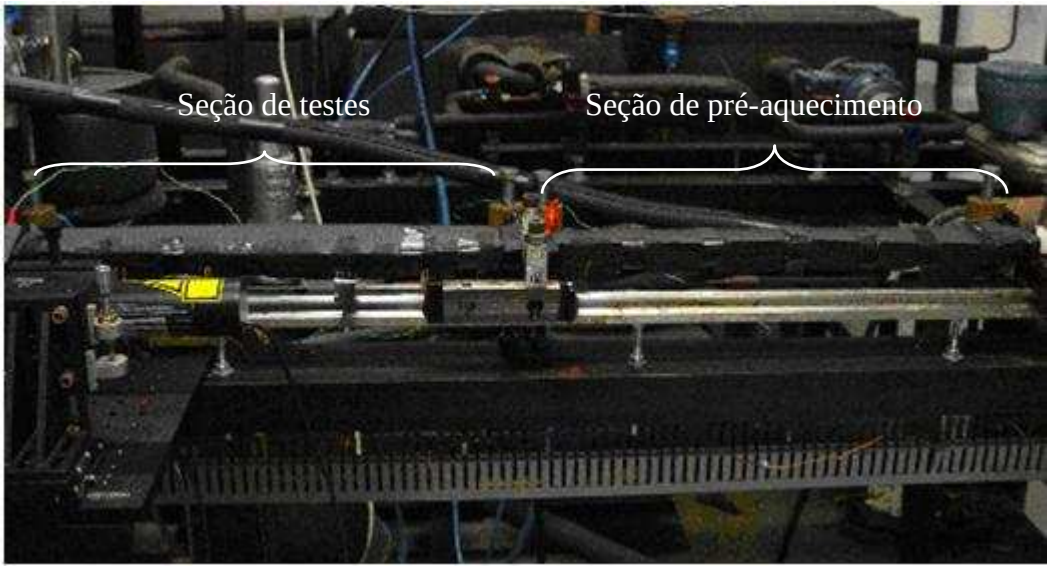


Figura 3.6 - Registro fotográfico das seções de testes e de pré-aquecimento.

A **Figura 3.7** ilustra um diagrama esquemático do pré-aquecedor e da seção de testes. Ela ilustra o posicionamento dos terminais de alimentação, dos transdutores de pressão e temperatura e as dimensões não aquecidas (L_1 e L_2).

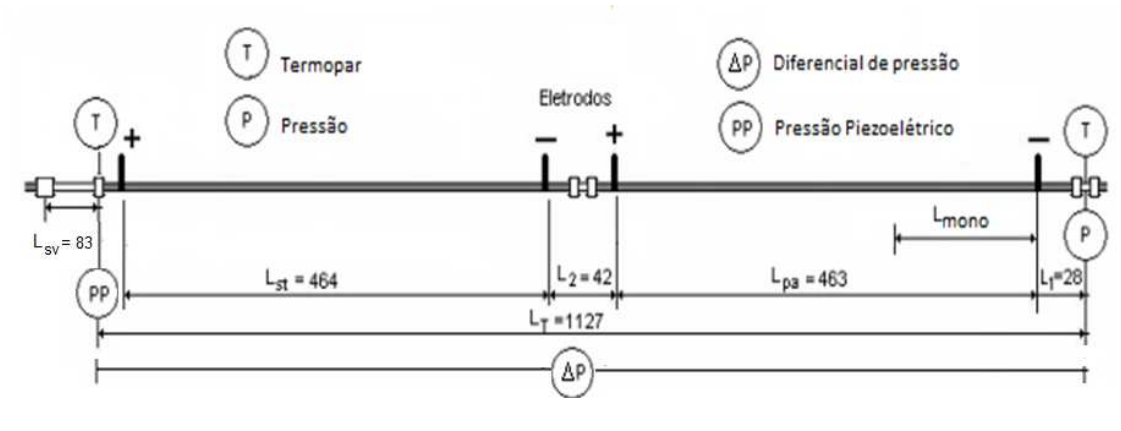


Figura 3.7 - Diagrama esquemático da seção de pré-aquecimento e de testes.

3.4.5 Seção de visualização

A seção de visualização, também ilustrada esquematicamente na **Figura 3.7**, consiste em um tubo transparente de sílica fundida com diâmetro interno de 2,1 mm, espessura de parede de 0,3 mm e comprimento de 83 mm. Ela é unida à seção de testes através de um flange de PVC que pressiona anéis de vedação contra a parede dos tubos. A seção de visualização está localizada a jusante da seção de testes.

3.4.6 Câmera de alta velocidade

A câmera utilizada para visualização do escoamento apresenta velocidade de captura de até 100.000 imagens/s. Ela é produzida pela Optronics e seu modelo é a *Cam Record 600*. A **Tabela 3.2** lista suas principais características.

Tabela 3.2 - Especificações da câmera de alta velocidade.

Imagem:	Monocromática
Resolução máxima:	1280 x 1024 pixels
Área Ativa/Pixels:	15,36 mm x 12,29 mm/12 µm x 12 µm
Sensitividade:	1600 bits
Sincronização:	Interna e externa
Peso:	1,7 kg
Condições de ambiente:	Temperatura: 0 a 40°C; umidade relativa <80%
Dimensões:	250 mm x 100 mm x 131,5 mm

A câmera utilizada é a AF Micro-NIKKOR 60 mm f/2,8D, a mais compacta das lentes da marca Nikon e com close-up com alcance muito elevado.

A resolução da câmera decresce com o incremento da velocidade de aquisição de imagens. Para a obtenção de imagens nítidas do padrão de escoamento é necessária uma resolução mínima de 1280 pixels na horizontal e 50 na vertical. Para esta resolução pode ser utilizada uma velocidade de captura entre 50 e 10000 imagens/s, conforme indica a **Tabela 3.3**. Tal condição é suficiente para identificar os padrões e para a observação de fenômenos do escoamento bifásico como ondulações da interface e a coalescência de bolhas.

Tabela 3.3 - Resolução da câmera em relação da frequência de aquisição de imagens.

Velocidade [imagens/s]	Resolução, H x V [pixels]
50 – 500	1280 x 1024
50 – 850	800 x 600
50 – 875	720 x 576
50 – 1000	1280 x 512
	640 x 480
50 – 2000	1280 x 256
	320 x 256
50 – 4000	1280 x 128
	160 x 128
50 – 10000	1280 x 50
	80 x 50
50 – 25000	1280 x 20
50 – 50000	1280 x 8
50 – 100000	1280 x 4

Um fator relevante para a obtenção de imagens nítidas é a iluminação, já que quanto maior a taxa de aquisição maior deve ser a intensidade da iluminação. O sistema de iluminação utilizado constou de 100 LED’s distribuídos uniformemente em duas placas. Tal dispositivo permite uma iluminação adequada com geração de calor

desprezível. Um possível aquecimento pelo sistema de iluminação é indesejável, pois poderia causar a evaporação do fluido refrigerante ao longo da seção de visualização.

3.4.7 Sensores e emissores laser

Foram utilizados dois pares de emissores/sensores laser. Os emissores são do tipo hélio-neon, da marca REO e modelo 31007. A **Tabela 3.4** indica as principais características do dispositivo utilizado.

Tabela 3.4 - Características dos emissores do laser.

Comprimento de onda	633 nm (vermelho)
Potência	0,8 mW
Diâmetro do raio	0,57 mm
Polarização	500:1
Frequência longitudinal	1082 MHz
Ângulo de divergência do raio	1,41 mrad

Os sensores do laser são da marca Newport, modelo 818-BB-21. Eles são detectores fotodiodo de alta velocidade, consistem em um detector de silicone de 0,4 mm de diâmetro e com tempo de resposta inferior a 300 ns. Características adicionais dos fotodiodos são descritas na **Tabela 3.5**.

Tabela 3.5 - Características dos sensores do laser

Faixa comprimento de onda	300 - 1100 nm
Material detector	Silicone
Tempo de resposta	<300 ps
Ângulo aceitação	30°
Conector de saída	BNC
Frequência de desligamento	>1,2 GHz
NEP	<1,5 pW/√Hz
Tipo de medição	Intensidade da radiação e, frequência

A radiação luminosa passa por duas lentes, as quais têm como função focar a luz na região central da seção de visualização. Posicionadores micrométricos são utilizados de forma a obter o devido alinhamento entre emissores, lentes, seção de visualização e fotodiodos. Um espelho foi instalado, conforme ilustrado na **Figura 3.8**, devido a restrição de espaço na região de medição.

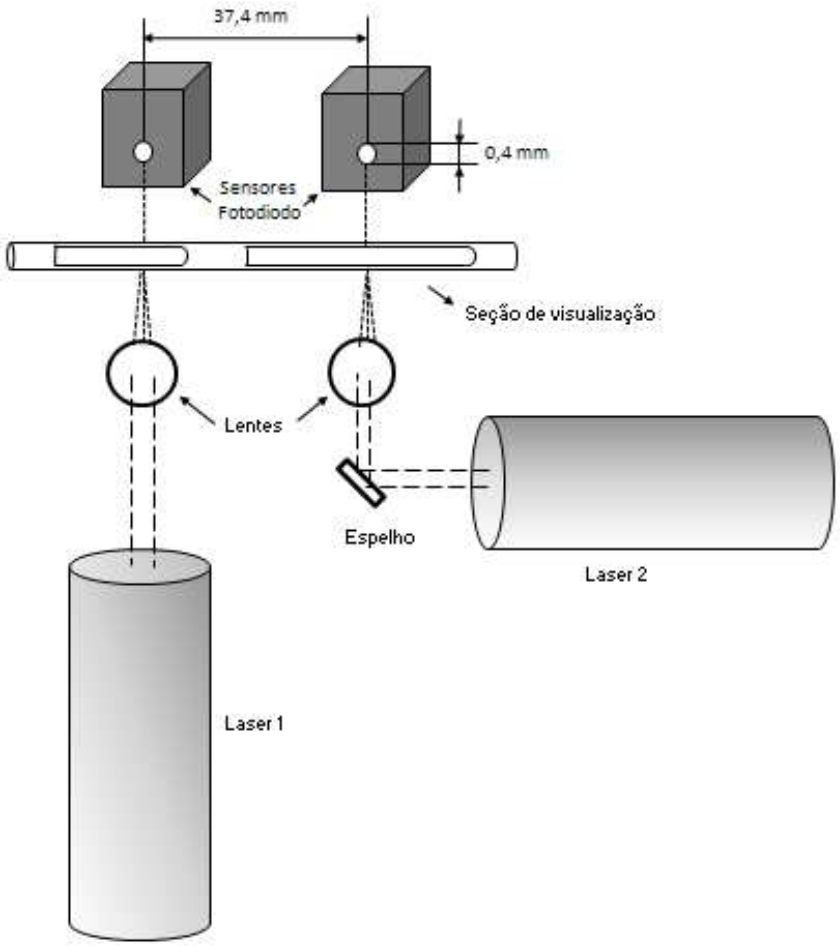


Figura 3.8 - Esquema da instrumentação do laser

3.4.8 Transdutores de pressão

Foram utilizados 2 transdutores de pressão absoluta tipo piezoresistivos, da marca Endress Hauser PMP 131, com erro máximo de 0,5% em relação ao fundo de escala. Um deles encontra-se na entrada da seção de teste e o outro no reservatório do refrigerante. Distintos transdutores foram utilizados conforme o refrigerante ensaiado. Para R245fa foi utilizado um transdutor com fundo de escala igual a 400 kPa e para o R134a igual a 1 MPa.

Um transdutor de pressão diferencial da marca Endress Hauser do modelo Deltabar S tipo piezoresistivo foi utilizado na determinação do diferencial de pressão entre a entrada do pré-aquecedor e a saída da seção de teste. Este transdutor de pressão diferencial apresenta sensor em cerâmica e abrange uma faixa de 0 a 300 kPa, com erro máximo de 0,075% do fundo de escala.

Um microsensor piezoelétrico foi instalado em contato com o fluido de trabalho na entrada da seção de visualização. O dispositivo é fabricado pela PCB Piezoeletronics, modelo 105C03. O transdutor de pressão opera dentro de uma faixa de 0 a 690 kPA, e tem uma sensibilidade de 7,3 mV/kPa. A **Figura 3.9** ilustra um esquema da instalação do transdutor. Segundo esta ilustração o transdutor foi conectado a um amplificador também da PCB Piezoeletronics que tem como função amplificar o sinal fornecido pelo transdutor e alimentá-lo. Este amplificador opera com faixas ganhos de 0,1x, 10x e 100x.

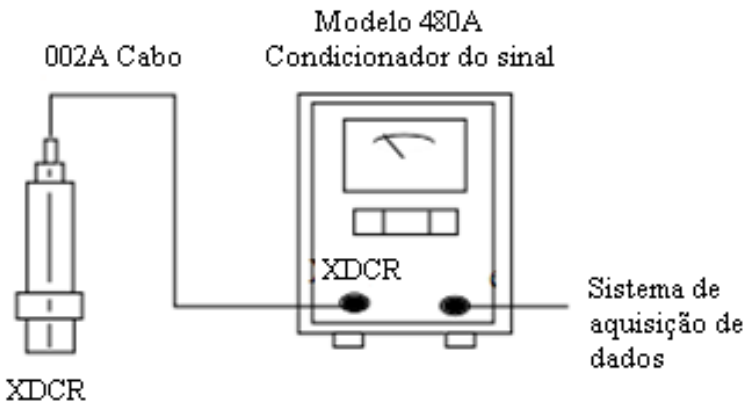


Figura 3.9 - Esquema de instalação do transdutor piezoelétrico.

3.4.9 Sistema de aquisição de dados e controle da bancada

A aquisição de dados e controle do sistema foi realizada através de um sistema de aquisição de dados e controle da *National Instruments*.

O sistema é composto da placa multifunção NI PCI-6221 acoplada ao chassis NI SCXI-1000. No chassis foi instalado o módulo condicionador de sinal NI SCXI-1140 de 8 entradas e aquisição simultânea, em cascata com o módulo de filtro passa baixa NI

SCXI-1142 de 8 entradas. Ao módulo NI SCXI-1140 foi acoplado o bloco terminal NI SCXI-1304 onde foram ligados o sensor piezoelétrico e os sensores fotodiodos.

No chassis foi também instalado o módulo condicionador de sinal NI SCXI-1102 de 32 entradas e aquisição multiplexada no tempo. Ao módulo NI SCXI-1102 foi acoplado o bloco terminal isotérmico SCXI-1303, para reduzir erros relacionados a gradientes de temperatura, onde foram ligados os termopares, os sensores de pressão absoluta, sensor de diferencial de pressão e o sensor de vazão.

No chassi foi ainda instalado o painel de passagem direta NI SCXI-1180 que fornecia uma conexão direta com os terminais da placa multifunção NI PCI-6221. Ao painel NI SCXI-1180 foi acoplado o bloco terminal SCXI-1302, e o variador de frequência que comandava a microbomba foi ligado ao terminal de controle da placa NI PCI-6221 através deste bloco terminal. A **Figura 3.10** ilustra um esquema de conexão ao sistema de aquisição dos sensores e atuadores utilizados:

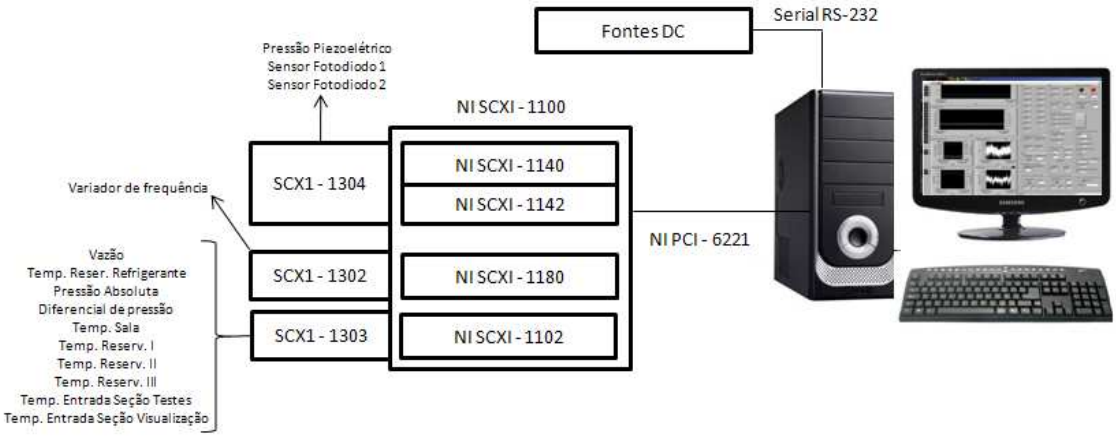


Figura 3.10 - Esquema de sensores e atuadores do sistema de aquisição.

No caso de sinais de transdutores que fornecem saída em corrente, resistores de precisão térmica de 249 Ω ±0,1%/°C foram ligados em serie com a saída dos transdutores com o objetivo de converter a corrente em tensão, para excitar as entradas do sistema de aquisição.

A **Tabela 3.6** apresenta os sensores e atuadores utilizados na bancada experimental.

Tabela 3.6 - Sensores e atuadores utilizados na bancada experimental.

Sensores e Atuadores	Modelo	Quantidade	Tipo de Sinal
Termopares (Sensor)	Tipo K-Omega	16	~ 40 µV/°C
Pressão Absoluta (Sensor)	Endress+Hauser PMP 131	2	4-20 mA
Pressão Diferencial (Sensor)	Endress+Hauser Deltabar S	1	4-20 mA
Pressão dinâmica (Sensor)	PCB Piezotronis 105C03	1	±5 V
Vazão Coriolis (Sensor)	Micromotion Modelo 2700	1	4-20 mA
Sensor Fotodiodo	NewPort Modelo 818-BB-12	2	-
Fonte Elétrica DC (Atuador)	Lambda Genesys 750W DC	2	Digital/RS-232
Inversor/Microbomba (Atuador)	ABB-ACS 150/cropump	1	0 – 5 V

Foi elaborado um programa em Labview para atuar como interface entre o sistema de aquisição e o operador da bancada. O programa se encontra no Apêndice A, e a interface de trabalho encontra-se ilustrada na **Figura 3.11**.

Através desta interface a temperatura de saturação, a vazão e a potência das fontes são controladas, determinando assim a condição de ensaio. Todos os outros parâmetros da bancada são monitorados em tempo real e podem ser registrados em arquivo para posterior análise. As propriedades do fluido são determinadas através do programa Refprop (2009)

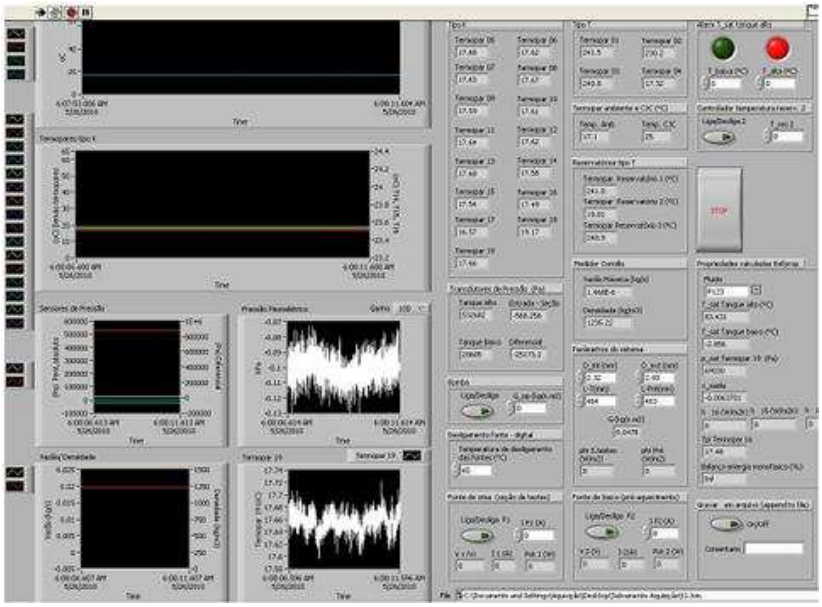


Figura 3.11 - Interface entre o sistema de aquisição e o operador da bancada.

CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Este capítulo descreve os procedimentos de redução de dados e apresenta uma validação dos resultados levantados no presente estudo, assim como as incertezas das medições realizadas.

4.2 Redução de dados

Nesta seção são descritos os procedimentos adotados para a determinação dos parâmetros gerais do escoamento bifásico, seus padrões e as características médias das bolhas alongadas.

4.2.1 Parâmetros gerais

Nestes itens são descritos os procedimentos e as hipóteses utilizadas no tratamento dos dados experimentais para caracterização das condições de ensaio.

Velocidade Mássica

A velocidade mássica é dada pela razão entre a vazão mássica fornecida pelo medidor tipo Coriolis e a área interna da seção transversal do tubo conforme a seguinte equação:

$$G = \frac{4\dot{m}}{\pi D^2} \tag{4.1}$$

Fluxo de Calor

O fluxo de calor na seção de pré-aquecimento, ϕ_{pa}, e na seção de teste, ϕ_{st}, é dado pela razão entre a potência elétrica aplicada e a área superficial interna do tubo (A_S). Nestes cálculos são considerados apenas os comprimentos aquecidos, isto é, as regiões compreendidas pelos terminais de alimentação de corrente contínua. A potência

elétrica aplicada é dada pelo produto entre a tensão e a corrente fornecidos pela fonte de corrente contínua. Os fluxos de calor no pré-aquecedor e na seção de teste são dados respectivamente pelas seguintes equações:

$$\phi_{pa} = \frac{P_{pa}}{A_{s,pa}} \tag{4.2}$$

$$\phi_{st} = \frac{P_{st}}{A_{s,st}} \tag{4.3}$$

Nestes cálculos, assume-se a superfície do tubo com espessura constante e homogênea. Desta forma, admite-se um fluxo de calor uniforme. Perdas de calor para o ambiente são consideradas desprezíveis.

Comprimento de escoamento monofásico na seção de pré-aquecimento

No presente estudo, a região a partir da qual o escoamento se torna bifásico é determinada como aquela em que o título de vapor de equilíbrio termodinâmico apresenta um valor nulo. Assim, o comprimento para o início do escoamento bifásico, L_{mono} (ver **Figura 3.7**), é calculado a partir da solução simultânea de três equações. A primeira considera um balanço de energia ao longo do comprimento do pré-aquecedor, no qual a potência fornecida pela fonte de corrente contínua é igualada à variação de calor sensível do fluido refrigerante. A segunda equação está relacionada à variação de pressão devido à perda de carga entre a entrada do pré-aquecedor e a região onde o fluido atinge a pressão de saturação e o escoamento se torna bifásico. A última equação envolve a relação entre a pressão e a temperatura de saturação, dada pela função "Temperatura de Saturação" do programa *Equation Engineering Solver*, EES (2009). As equações resultantes são as seguintes:

$$\phi_{pa} \cdot \pi \cdot D \cdot L_{mono} = G \cdot A_{in} \cdot \left[i_L \left(T = T_{sat} \right) - i_{L,ent} \right] \tag{4.4}$$

$$p_{sat} = p_{ent} - \frac{f \cdot (L_{mono} + L_1) \cdot G^2}{2 \cdot D \cdot \rho_{L,ent}} \tag{4.5}$$

$$T_{sat} = Temperatura_{sat}(p = p_{sat}) \tag{4.6}$$

Pressão de saturação local do fluido

A pressão de saturação ao longo da seção de testes é determinada assumindo gradiente de pressão constante ao longo da região bifásica. Para este cálculo são necessários p_{sat}, determinado a partir da solução das Eqs. 4.4 e 4.6, e a pressão na saída da seção de testes p_{sai}, determinado a partir de p_{ent} e o diferencial de pressão, Δp, entre a entrada e a saída.

A pressão ao longo do tubo é calculada segundo a equação abaixo, onde z é o comprimento a partir da seção de testes e L_{sat} é o comprimento de toda a seção onde o fluido encontra-se em condições de saturação.

$$p(z) = p_{sai} + \left(p_{sat} - p_{sai}\right) \cdot \frac{L_{sat} - (z + L_2 + L_{pa} - L_{mono})}{L_{sat}} \tag{4.7}$$

$$p_{sai} = p_{ent} - \Delta p \tag{4.8}$$

$$L_{sat} = L_T - \left(L_{mono} + L_1\right) \tag{4.9}$$

Temperatura do fluido na região saturada

A temperatura do fluido ao longo da seção de testes na região bifásica é obtido a partir da pressão local ao longo do tubo, $p_{sat}(z)$, através do programa EES (2009).

Título de vapor

O título de vapor, x, é estimado através de um balanço de energia ao longo das seções aquecidas, sendo dado pela seguinte equação:

$$x_{st,sai} = \frac{1}{i_{LG,sai}} \left[\frac{P_{st} + P_{pa}}{G \cdot A_i} + \left(i_{L,ent} - i_{L,sai}\right) \right] \tag{4.10}$$

Onde $i_{L,ent}$ é a entalpia do líquido subresfriado na entrada do pré-aquecedor, $i_{L,sai}$ é a entalpia do líquido saturado na temperatura de saída da seção de teste e $i_{LG,\,sai}$ o calor latente de vaporização à temperatura de saída.

4.2.2 Padrões de escoamento

Para a identificação de padrões de escoamento foram utilizadas técnicas objetivas e subjetivas. A análise de imagens obtidas a partir da câmera de alta velocidade foi o método subjetivo utilizado. E o agrupamento de dados com características similares a partir de sinais elétricos relacionados ao escoamento através do algoritmo *k-means* consiste no método objetivo. Ambos métodos são descritos a seguir.

Caracterização através da Câmera de Alta Velocidade

Os padrões de escoamento foram caracterizados baseados em análise das imagens do escoamento na seção de visualização obtidas através de uma câmera com velocidade de captura de 10.000 imagens/s. Baseados na terminologia usada por Barnea et al. (1983) e Felcar et al. (2007), os seguintes padrões para escoamentos horizontais foram caracterizados no presente estudo:

- Escoamento disperso, inclui as configurações de escoamento segundo bolhas e névoa;
- Escoamento anular, caracterizado por um escoamento contínuo de gás no centro do tubo e um filme de líquido junto à parede;
- Escoamento intermitente, quando uma determinada geometria característica do escoamento se apresenta de forma intermitente;
- Escoamento estratificado, é observado quando as duas fases escoam separadas com o líquido se concentrando na região inferior do tubo devido a efeitos gravitacionais.

As demais nomenclaturas usualmente adotadas foram classificadas dentro dos padrões acima mencionados. Escoamentos agitante, pistonado e bolhas alongadas foram segregados como escoamentos intermitentes. Os escoamentos anular e anular com névoa classificados como anular. Os padrões de escoamento de acordo com a nomenclatura adotada neste estudo são ilustrados na **Figura 4.1**.

Condições de secagem de parede não foram caracterizadas neste estudo devido à possibilidade de danificação da seção de testes, e ao fato da fonte de corrente contínua

ser desativada assim que algum dos termopares ao longo da superfície aquecida apresentasse uma temperatura superior a 60 °C.

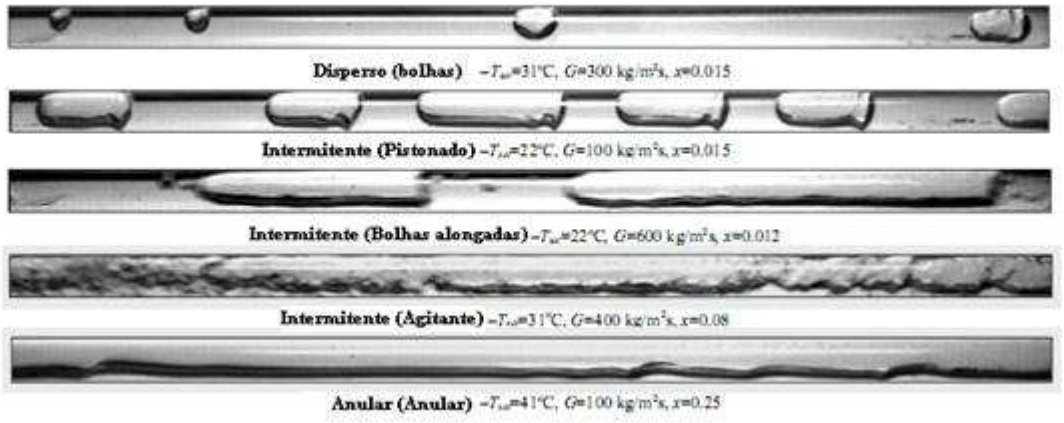


Figura 4.1 - Nomenclatura adotada no presente estudo para classificação de padrões de escoamento com base em visualizações.

Algoritmo k-means

Os métodos de agrupamento (ou *clusterização*) são técnicas que exploram semelhanças entre um grupo determinado de dados e os segregam em categorias ou grupos com base em características próximas.

Estes métodos de agrupamento utilizam técnicas de aprendizado não supervisionado e auto-organizável, isto significa que não precisam de um “professor” ou “alguém” que indique o grupo ao qual cada dado pertence.

Existem vários algoritmos de agrupamento conforme mencionado na seção 2.2.2. Os mais utilizados para a caracterização de padrões de escoamento são os métodos “k-means” e o “fuzzy c-means”.

No método de agrupamento k-means inicialmente são fornecidos aleatoriamente os valores dos elementos centrais ou centróides de cada grupo, a partir dos quais serão definidos os grupos (clusters) a serem identificados. A partir daí, as distâncias entre os dados e os centróides são calculadas, com cada dado sendo atribuído ao centróide mais próximo. Com os dados pertencentes a cada grupo definidos, novos centróides são determinados cujos valores nos eixos coordenados são a média aritmética dos valores correspondentes a cada ponto. Novamente, as distâncias entre os dados e os centróides

são calculadas, e, caso suas variações sejam inferiores a um critério de convergência, têm-se os centróides finais definidos e os dados atribuídos a cada centróide determinado. A **Figura 4.2** ilustra um fluxograma de implementação do algoritmo k-means.

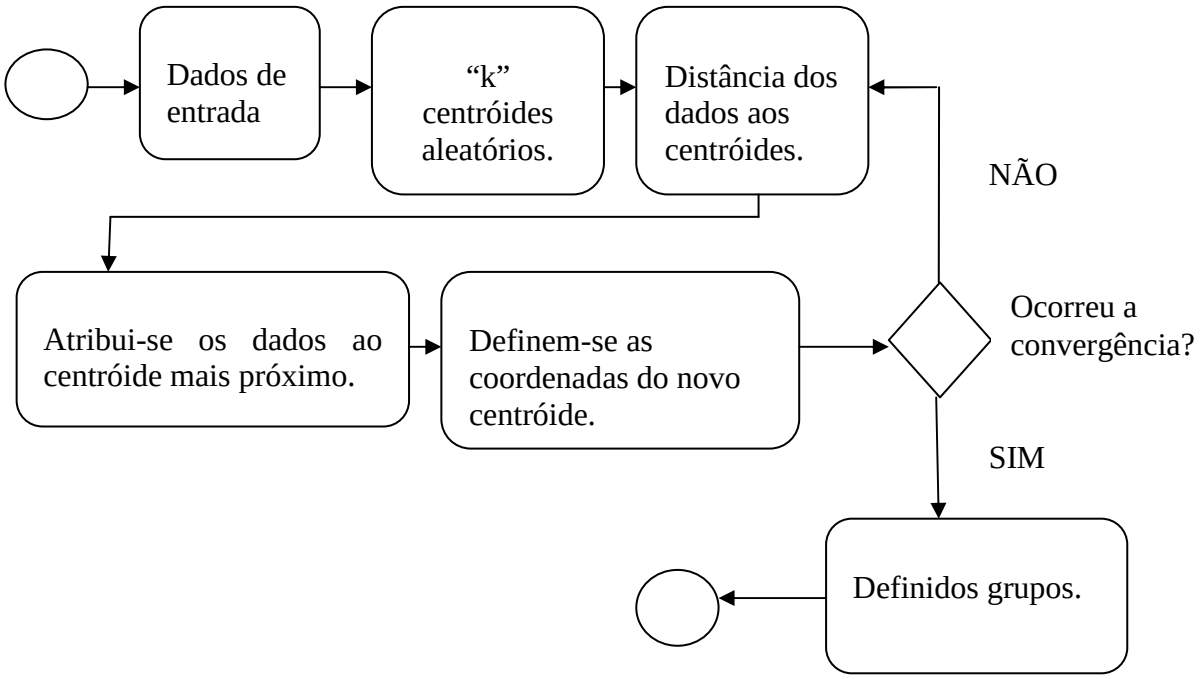


Figura 4.2 - Fluxograma de implementação do algoritmo *k-means*.

O programa elaborado no presente estudo para a implementação do método de clusterização k-means utiliza a linguagem de programação C++ e encontra-se no Apêndice B.

No presente estudo os dados de entrada foram definidos através da análise dos parâmetros estatísticos de sinais característicos do escoamento conforme descrito a seguir:

Média aritmética do sinal.- A média aritmética é obtida dividindo-se a soma dos valores medidos pelo número de medições. Ela representa o valor médio de todos os dados e caso estes apresentem uma variação elevada, a média tem sua importância reduzida como parâmetro de caracterização dos dados. A média aritmética das medições é calculada através da seguinte equação:

$$\bar{a} = \frac{(a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + \ldots\ldots\ldots\ldots + a_n)}{n} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} a_k \qquad (4.11)$$

<u>*Desvio padrão*</u>.- O desvio padrão caracteriza a dispersão dos dados de um determinado conjunto de observações. Ele é definido como a raiz quadrada da variância, que é também um parâmetro utilizado para indicar a dispersão dos dados em relação ao seu valor médio. O desvio padrão é dado pela seguinte equação:

$$s = \sqrt{\frac{(a_1 - \bar{a})^2 + (a_2 - \bar{a})^2 + \ldots\ldots\ldots\ldots + (a_n - \bar{a})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{k=1}^{n}(a_k - \bar{a})^2} \qquad (4\text{-}12)$$

<u>*Obliquidade*</u>.- É a medida de assimetria de uma determinada distribuição de frequência. A obliqüidade é definida por:

$$\gamma_1 = \frac{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(a_k - \bar{a})^3}{\sqrt{\left[\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(a_k - \bar{a})^2\right]^3}} \qquad (4.13)$$

Se a obliquidade é negativa, a distribuição está concentrada a direita (ver **Figura 4.3**), e significa que tem um número inferior de valores reduzidos. A obliquidade positiva significa que a distribuição se concentra a esquerda, indicando que os dados se concentram em valores reduzidos.

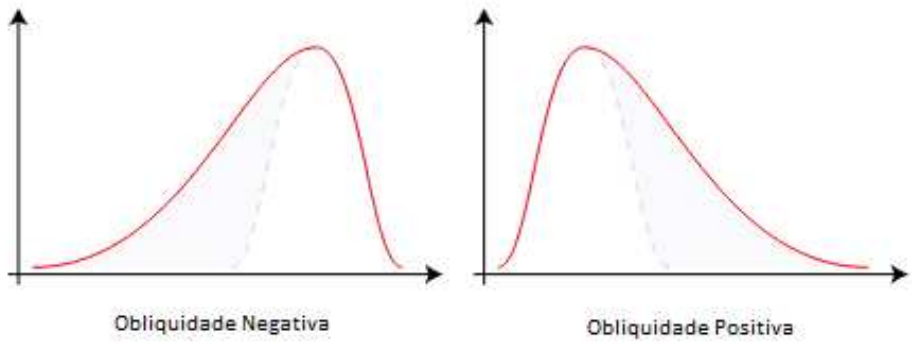


Figura 4.3 - Ilustração esquemática da obliquidade numa distribuição de frequências.

<u>*Curtose*</u>.- A curtose é uma medida de dispersão que caracteriza o achatamento da curva da função de sua distribuição. Ela é definida segundo a seguinte equação:

$$\gamma_2 = \frac{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(a_k - \bar{a})^4}{\left[\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(a_k - \bar{a})^2\right]^2} - 3 \qquad (4.14)$$

A **Figura 4.4** ilustra o significado da curtose com exemplos de distribuiçoes de frequências conhecidas. Como indica Barbosa (1975), se o valor da curtose for nulo, então tem o mesmo achatamento que a uma distribuição normal (linha vermelha da **Figura 4.4**). Se o valor da curtose for superior a 0 ($\gamma_2 > 0$), então a distribuição em questão é mais "afunilada" e concentrada que a distribuição normal, como é o caso da distribuiçao de Laplace ilustrada na figura. Se o valor for inferior a 0 ($\gamma_2 < 0$), a função de distribuição é mais "achatada" que a distribuição normal, como o caso da distribuição semicírculo, apresentada na **Figura 4.4** com curtose igual a -1.

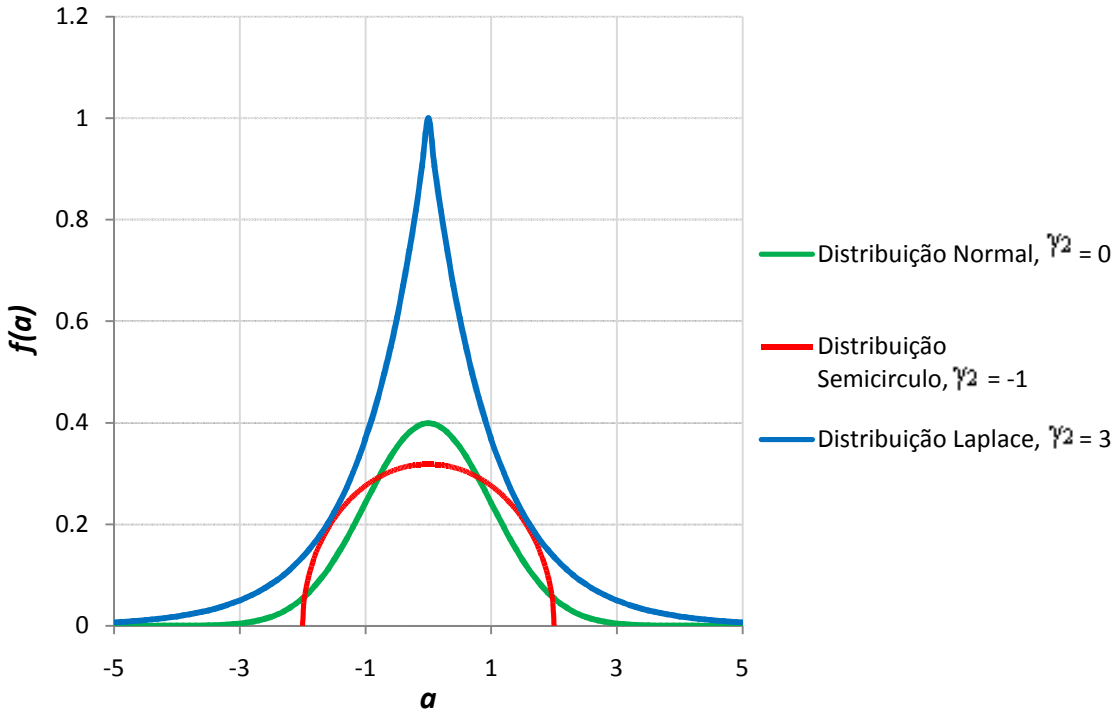


Figura 4.4 - Significado da curtose numa distribuição de frequências.

4.2.3 Características de bolhas alongadas

Nesta seção serão definidos os procedimentos adotados na caracterização de bolhas alongadas.

Frequência de bolhas

A freqüência de bolhas (bolhas/segundo) foi definida como a razão entre o número de bolhas e o tempo em que elas foram verificadas. A frequência de bolhas foi calculada a partir da seguinte equação:

$$fr_b = \frac{N_b}{t} \tag{4.15}$$

A **Figura 4.5** ilustra a variação do sinal do fotodiodo relacionado à alteração da intensidade da radiação (laser) com o escoamento após a aplicação de um filtro ao sinal original. Este filtro foi utilizado de forma que variações na intensidade do sinal observado, causadas por bolhas de tamanhos razoavelmente inferiores ao diâmetro do tubo não fossem detectadas, tais bolhas são geralmente observadas na estera de bolhas alongadas. Na **Figura 4.5**, o valor máximo corresponde à presença de apenas líquido na tubulação, e o valor mínimo representa a passagem de vapor. Assim, valores mínimos estão relacionados à presença de bolhas.

Mediante um programa em LabView foram contados os números de vezes que o sinal muda repentinamente do valor máximo (1) ao valor mínimo, representando o número total de bolhas, N_b. A escolha do tempo de análise do sinal é de real importância, pois um tempo de análise reduzido poderia resultar na adoção de um período não representativo, resultando em estimativas incorretas da frequência e do comprimento médio de bolhas. Mediante ensaios iniciais determinou-se 6 segundos (ou 3000 dados) como o tempo suficiente para a obtenção de valores precisos para frequência de bolhas e comprimento médio pois para períodos superiores a 6 segundos a variação da frequência e do comprimento médio tornou-se desprezível.

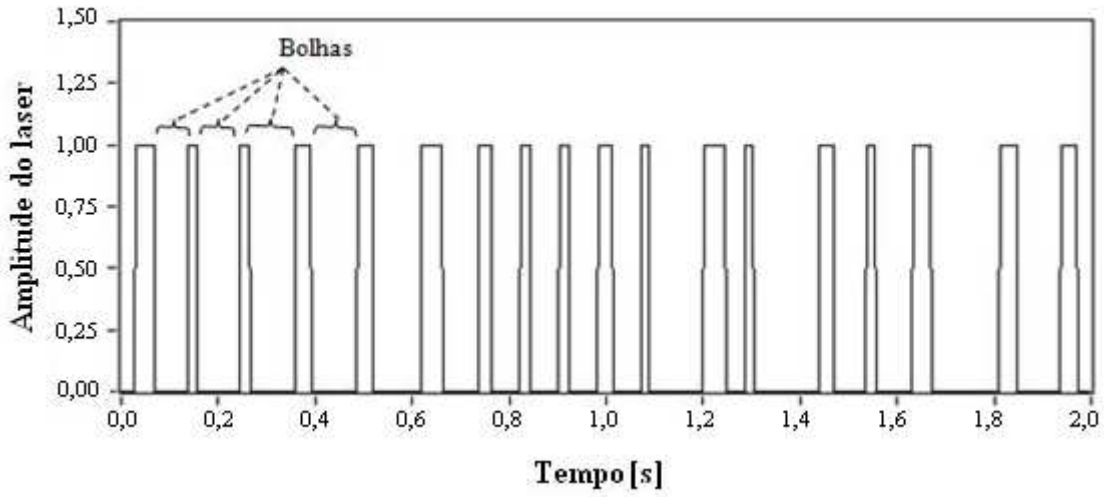


Figura 4.5.- Sinal filtrado da intensidade de radiação indicado pelo fotodiodo versus o tempo.

Velocidade das bolhas

A velocidade da bolha (m/s) é definida como a razão entre a distância percorrida pela frente da bolha em um intervalo de tempo, dada pela seguinte equação:

$$u_b = \frac{\Delta L}{\Delta t} \tag{4.16}$$

Para a determinação da velocidade da bolha, o tempo na Eq. 4.16 foi determinado mediante a correlação cruzada entre os sinais de radiação capturados pelos fotodiodos. Uma correlação cruzada é uma medida da similitude entre dois sinais e permite determinar o tempo necessário para que os sinais apresentem características semelhantes.

A **Figura 4.6** é uma correlação cruzada dos sinais capturados pelos dois fotodiodos. A diferença entre o número de dados analisados (no caso da figura são 2000) e o pico da correlação cruzada indica o desfasamento (em número de dados) entre os dois lasers. Este número de dados de desfasamento é convertido em tempo, dividindo seu valor pela frequência de aquisição de dados. Assim obtemos o período necessário para que as características de um sinal registradas pelo fotodiodo 1, relacionado à presença de bolhas, seja indicada pelo fotodiodo 2. Desta forma, determinado este período e a distância entre os sensores a velocidade média das bolhas é determinada. Este procedimento foi realizado através de um programa elaborado em LabView.

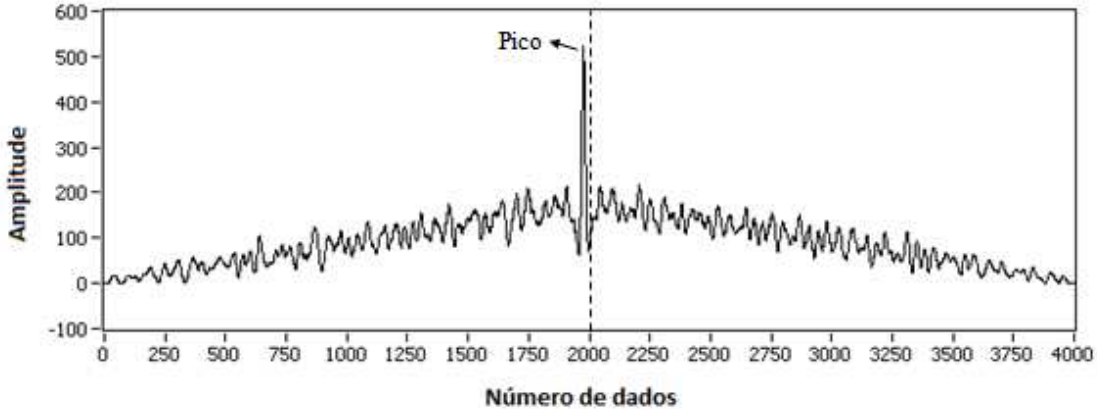


Figura 4.6 - Correlação cruzada dos sinais do laser.

Comprimento médio das bolhas

O comprimento da bolha (m) foi caracterizado como sua dimensão na direção do escoamento. Na **Figura 4.5** observa-se que através do procedimento para a determinação da frequência de bolhas é possível também determinar o período que a bolha alongada se verifica segundo a radiação incidente no fotodiodo. Assim, conhecendo-se a velocidade média das bolhas, cujo procedimento de determinação foi descrito no item anterior, e o seu tempo de residência têm-se o comprimento de cada bolha dada pela seguinte equação:

$$L_{b,i} = u_b \cdot t_{b,i} \tag{4.17}$$

Para encontrar o comprimento médio da bolha calculamos a média dos comprimentos de cada bolha, conforme a seguinte equação:

$$\bar{L}_b = \frac{1}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} L_{b,i} \tag{4.18}$$

Este cálculo também é realizado através de um programa em LabView, apresentado no Apêndice C.

4.3 Validação do aparato experimental

Nesta seção é apresentada a validação do aparato experimental e dos procedimentos de levantamento de dados. Destaca-se aqui a importância desta seção,

pois a validação dos procedimentos experimentais é necessária para que os dados levantados sejam confiáveis.

4.3.1 Balanço de energia

Um balanço de energia para o escoamento monofásico foi realizado com o objetivo de avaliar a taxa de calor efetivamente transferida das fontes de corrente contínua para o fluido de trabalho. Perdas de calor para o ambiente elevadas implicariam uma estimativa incorreta do título de vapor no qual um determinado padrão de escoamento se verifica.

Durante o levantamento experimental para escoamento monofásico os seguintes parâmetros podem ser variados: fluido refrigerante, velocidade mássica, pressão absoluta (p_{abs}), sub-resfriamento na saída da seção de teste (ΔT_{sub}) e fluxo de calor, ϕ. A **Tabela 4.1** apresenta a faixa em que estes parâmetros foram variados para a realização dos testes em escoamento monofásico.

Tabela 4.1 - Faixa de parâmetros experimentais para escoamentos monofásicos.

Di [mm]	**Fluido**	***G* [kg/m²s]**	**p_{abs} [kPa]**	**ΔT_{sub} [°C]**	**ϕ [kW/m²]**
2.32	R134a - R245fa	100 – 700	100 - 650	2 - 5 °C	1-35

Balanços de energia para escoamento monofásico envolvendo as seções de pré-aquecimento e de teste foram efetuados. Nestes balanços são comparadas a potência fornecida pelas fontes, $P_{pa} + P_{st}$ e a potência absorvida pelo fluido, calculada a partir da variação de entalpia ao longo da região aquecida. Foi utilizada como parâmetro para tal avaliação, a taxa de calor transferida para o ambiente em relação à potência fornecida as superfícies aquecidas, estimada segundo as seguintes equações:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\left[G \cdot A_{in} \cdot \left(i_{sai} - i_{ent}\right) - \left(P_{pa} + P_{st}\right)\right]}{P_{pa} + P_{st}} x100 \qquad (4.19)$$

A **Figura 4.7** ilustra a parcela de energia não transferida para o fluido, determinada a partir do balanço de energia para uma temperatura de entrada de 31 °C e uma temperatura exterior de aproximadamente 22 °C, dado que a sala de testes é climatizada. As perdas de calor para o ambiente são inferiores a 15% e seu valor relativo decresce com o incremento da velocidade mássica. Verifica-se uma perda máxima de 12% para G=100 kg/m²s.

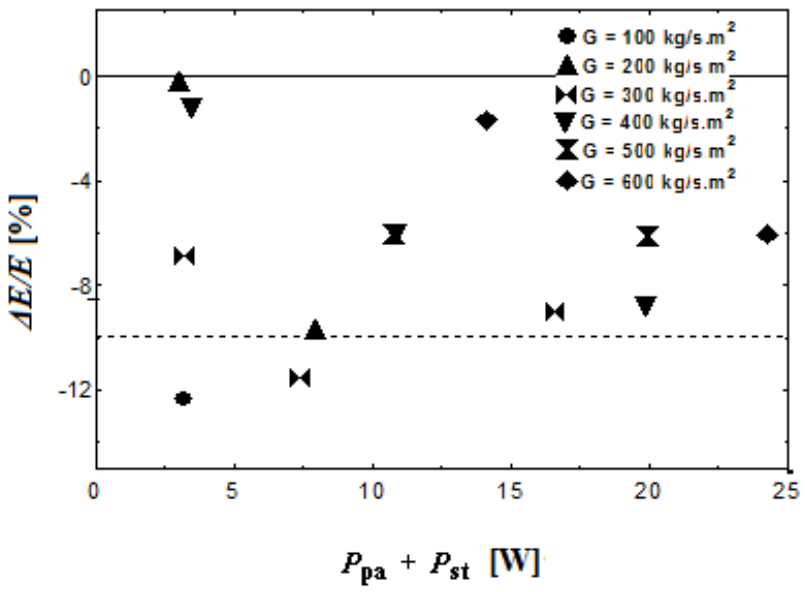


Figura 4.7- Avaliação da energia rejeitada para o ambiente, R245fa, T_{ent} = 31 °C.

Conforme esperado e ilustrado na **Figura 4.8**, as perdas para o ambiente se elevam com o incremento de temperatura de entrada, e isto se dá devido a um gradiente de temperatura superior entre as superfícies aquecidas e o ambiente externo. Os erros decrescem com o incremento da potência aplicada. Os fluxos de calor para escoamento monofásico são inferiores aos para bifásico de forma a garantir líquido subresfriado na saída da seção de testes, pelo qual se pode concluir que para escoamentos bifásicos os erros serão inferiores. Corrobora para a redução destes erros o fato do coeficiente de transferência de calor interno ser razoavelmente superior para a ebulição convectiva em relação ao escoamento monofásico.

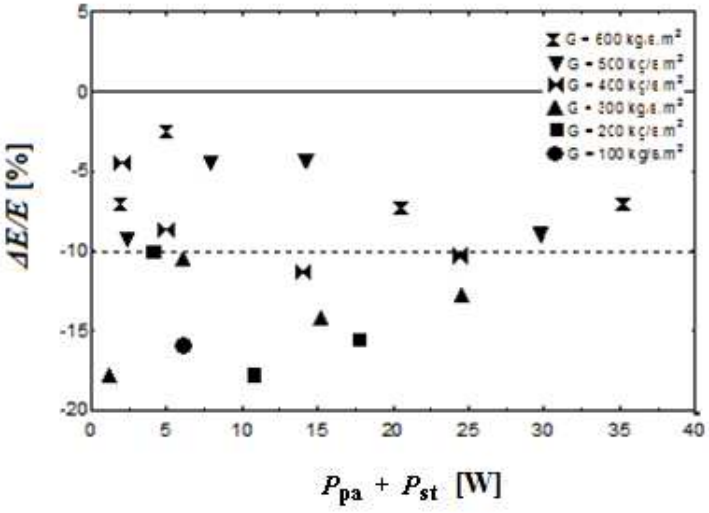


Figura 4.8 - Avaliação da energia rejeitada para o ambiente, R245fa, T_{ent} = 41 °C

4.3.2 Ensaios para perda de pressão e validação com correlações da literatura

Ensaios para a perda de pressão para escoamento monofásico foram realizados com o objetivo de verificar a presença de perdas de pressões locais relacionadas às conexões nas linhas do pré-aquecedor e da seção de teste, e assim validar a distribuição de pressão adotada e os resultados experimentais obtidos a partir do transdutor de pressão diferencial. A **Figura 4.9** ilustra, para o refrigerante R245fa, temperatura de entrada de 31°C e uma faixa de Reynolds entre 500<Re<4000, uma comparação entre a perda de pressão experimental e a perda de pressão calculada através da equação de Darcy-Weisbach com o fator de atrito dado pela equação de Darcy, considerando Re=2300 como o número de Reynolds de transição entre escoamento laminar e turbulento. Nesta figura a barra refere-se a um erro de ±10% do valor experimental.

A partir de dados experimentais para a perda de pressão avaliou-se uma rugosidade relativa interna (ε/D) para o tubo igual a 0,01062 com base na equação de Chen (1959), modificação da equação de Colebrook-White (COLEBROOK (1939)), adequada para a faixa de número de Reynolds mencionada e dada pela seguinte equação:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left[\frac{\varepsilon/D}{3,7065} - \frac{5,0452}{\mathrm{Re}} \cdot \log\left(\frac{\left(\varepsilon/D\right)^{1,1098}}{2,8257} + \frac{5,8506}{\mathrm{Re}^{0,8981}}\right)\right] \tag{4.20}$$

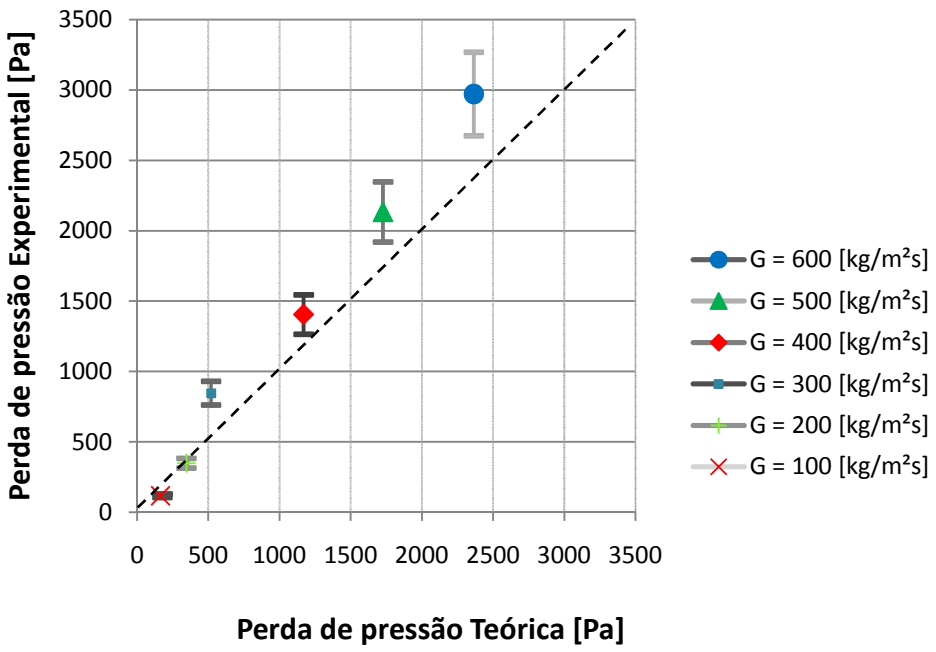


Figura 4.9 - Comparação da perda de pressão experimental com a teórica, R245fa.

A rugosidade relativa estimada foi utilizada no cálculo da previsão de perda de pressão e comparada com resultados experimentais independentes levantados no mesmo aparato experimental. A **Figura 4.10** ilustra a comparação, e nela verifica-se uma excelente concordância.

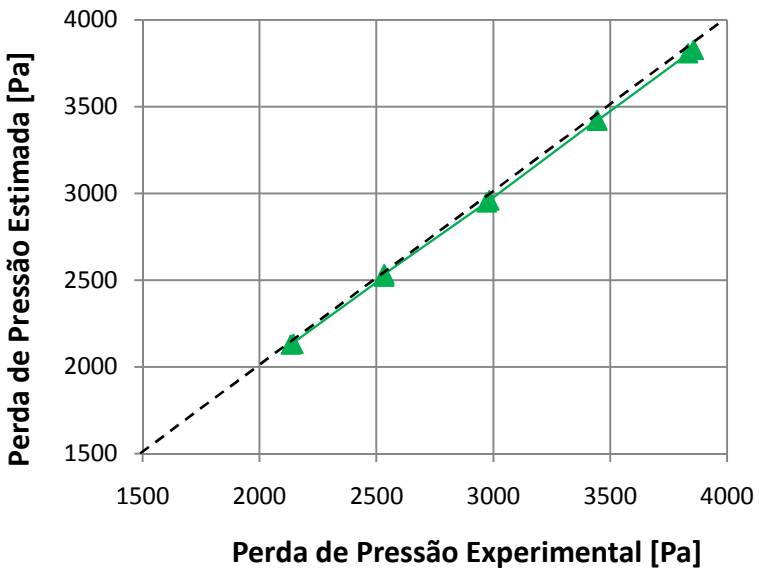


Figura 4.10 - Comparação da perda de pressão experimental com a teórica com base na rugosidade relativa estimada, R245fa e G = 500-600 kg/m²s.

4.3.3 Validação dos procedimentos de caracterização das bolhas alongadas

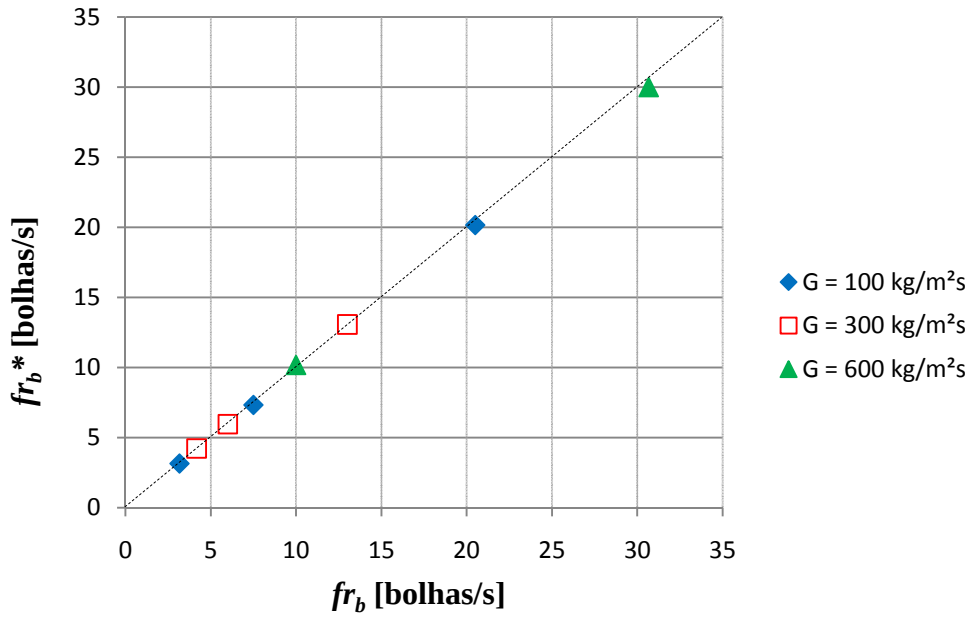
Os resultados para caracterização de bolhas baseado na atenuação da intensidade luminosa captado pelo fotodiodo foram validados através da análise das imagens do escoamento obtidas a partir da câmera de alta velocidade conforme descrito a seguir:

Frequência de bolhas alongadas

A partir de um filme de escoamento foram contados o número de bolhas com tamanho superior ao diâmetro do tubo, N_b. Conhecendo o número total de imagens (*frames*) do filme, N_{im}, e a velocidade de imagens capturadas, *IPS*, a frequência da bolha foi calculada segundo a seguinte equação:

$$fr_b = \frac{N_b}{N_{im}} IPS \tag{4.21}$$

A **Figura 4.11** compara resultados estimados a partir de imagens do escoamento (contagem visual de bolhas) e valores obtidos através dos sinais dos fotodiodos para escoamento do refrigerante R245fa e temperatura de saturação de 31°C, pelo observado na figura conclui-se que ambos métodos fornecem resultados similares.



*➔Valores estimados a partir da atenuação do sinal luminoso.

Figura 4.11 - Validação da frequência de bolhas alongadas, R245fa, T_{sat} = 31°C

Velocidade média das bolhas alongadas

Inicialmente uma escala de imagem (*EI*) é definida como a relação entre um comprimento de referência gravado junto com a imagem e o número de pixels por ele envolvido.

A velocidade de cada bolha (m/s) é estimada a partir do número de imagens necessárias para a bolha percorrer uma distância, ΔL, calculada a partir da escala de imagem *IE*, previamente definida. Assim, conhecido o número de imagens, N_{im}, e a velocidade de captura (*IPS*), a velocidade de cada bolha é dada pela seguinte relação:

$$u_{b,i} = \frac{\Delta L \cdot IPS}{N_{im,i}} \tag{4.22}$$

Determinada a velocidade de bolhas, calcula-se a velocidade média de acordo com a seguinte equação:

$$\overline{u}_b = \frac{1}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} u_{b,i} \tag{4.23}$$

A **Tabela 4.2** compara resultados estimados a partir de imagens do escoamento e obtidos através da análise dos sinais dos fotodiodos para três condições experimentais distintas. Através desta tabela conclui-se que ambos os métodos fornecem resultados similares.

Comprimento das bolhas alongadas

Se o comprimento da bolha é inferior ao comprimento longitudinal da imagem, conta-se o número de pixels ocupado pela bolha, N_p e, a partir daí, o comprimento de cada bolha é dado segundo a seguinte equação:

$$L_{b,i} = EI \cdot N_{p,i} \tag{4.24}$$

Caso a bolha apresente comprimento superior ao da imagem, sua dimensão longitudinal é dada por:

$$L_{b,i} = u_{b,i} \frac{N_{im,i}}{IPS} \tag{4.25}$$

A partir do comprimento de 50% das bolhas alongadas totais para uma condição experimental, determina-se o comprimento médio, encontrando-se boa concordância entre este método manual e o calculo feito através da análise do sinal da radiação luminosa.

Tabela 4.2 - Validação da velocidade média das bolhas.

T_{sat} = 22 °C , G=200 kg/m²s, x = 0,025 u_b*=0,65 m/s				
Bolha	**Escala Imagem (*EI*)**	**Imagens por segundo (*IPS*)**	**Numero de imagens (N_{im})**	**Velocidade [m/s]**
Bolha 1	2,36967E-05	3500	162	0,6553
Bolha 2	2,36967E-05	3500	164	0,6473
Bolha 3	2,36967E-05	3500	161	0,6594
Bolha 4	2,36967E-05	3500	162	0,6553
Bolha 5	2,36967E-05	3500	164	0,6473
				0,6529
T_{sat} = 31 °C , G=400 kg/m²s, x = 0,061 u_b*=1,885 m/s				
Bolha	**Escala Imagem(*EI*)**	**Imagens por segundo (IPS)**	**Numero de imagens (N_{im})**	**Velocidade [m/s]**
Bolha 1	2,36967E-05	3500	56	1,8957
Bolha 2	2,36967E-05	3500	57	1,8625
Bolha 3	2,36967E-05	3500	56	1,8957
Bolha 4	2,36967E-05	3500	56	1,8957
Bolha 5	2,36967E-05	3500	56	1,8957
				1,8891
T_{sat} = 41 °C , G=600 kg/m²s, x = 0,0175 u_b*=1,45 m/s				
Bolha	**Escala Imagem (*EI*)**	**Imagens por segundo (IPS)**	**Numero de imagens (N_{im})**	**Velocidade [m/s]**
Bolha 1	2,36967E-05	3500	72	1,4745
Bolha 2	2,36967E-05	3500	73	1,4543
Bolha 3	2,36967E-05	3500	74	1,4346
Bolha 4	2,36967E-05	3500	72	1,4745
Bolha 5	2,36967E-05	3500	74	1,4346
				1,4545

*➔Valores estimados a partir do método das correlações cruzadas (atenuação do sinal luminoso).

4.4 Incertezas de parâmetros medidos e estimados

Considerando a necessidade de garantir a qualidade das medições, validando assim os resultados apresentados na presente dissertação a seguir são apresentados as incertezas dos parâmetros medidos e estimados.

Para determinar os erros experimentais nas medidas foram utilizados os erros dos instrumentos de medição de acordo com as especificações técnicas e manuais de calibração de cada equipamento. A **Tabela 4.3** apresenta estas incertezas. Neste estudo levantou-se apenas a incerteza da medida da temperatura segundo o procedimento de cálculo proposto por Abernethy e Thompson (1973) descrito no Apêndice D.

Tabela 4.3 - Incerteza dos parâmetros medidos.

Parâmetro	Incerteza	Parâmetro	Incerteza
D	20 µm	Δp	150 Pa
L	1 mm	ϕ	0,80%
P	4,5 kPa	T	0,15 °C
M	0.10%		

O cálculo das incertezas do título de vapor, velocidade mássica e fluxo de calor foram realizadas através do método de propagação de incertezas descrito em Moffat (1988). Na **Tabela 4.4** são apresentadas as incertezas dos parâmetros calculados. Nota-se que a incerteza no título de vapor (x) apresenta um valor superior. Tal fato decorre de ter acumulado na sua estimativa a incerteza dos demais parâmetros (G, ϕ, T_{sat}).

Tabela 4.4 - Incerteza dos parâmetros estimados.

Parâmetro	Incerteza	Parâmetro	Incerteza
G	1,70%	x	<5%
ϕ	1,20%		

O procedimento de estimativa das incertezas encontra-se descrito no Apêndice D.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

Neste capítulo, encontra-se a apresentação e análise dos resultados da presente pesquisa. Dados experimentais referentes à caracterização de bolhas alongadas são ilustrados e discutidos. Mapas de padrões de escoamento da literatura são comparados com visualizações realizadas no presente estudo. Resultados determinados através do método objetivo de identificação dos padrões de escoamento são analisados. Finalmente, os mapas de padrões de escoamento levantados através do método objetivo desenvolvidos no presente estudo são apresentados.

5.2 Caracterização de bolhas

Esta seção trata da discussão dos resultados obtidos relacionados à caracterização das bolhas alongadas. Determinar as características das bolhas é fundamental no desenvolvimento de modelos de perda de pressão, transferência de calor e transição entre padrões de escoamento a partir do padrão bolhas alongadas.

A **Figura 5.1** ilustra o efeito da temperatura de saturação e da velocidade mássica na velocidade da bolha alongada. Conforme ilustrado nesta figura, a velocidade da bolha alongada se eleva com o incremento do título de vapor e da velocidade mássica. A figura também ilustra o decréscimo da velocidade da bolha alongada com o incremento da temperatura de saturação. Este comportamento se explica pela redução da relação entre volumes específicos do gás e do líquido com o aumento da temperatura de saturação. Resultando em um decréscimo da aceleração do escoamento com a mudança de fase e, portanto, em velocidades de bolha inferiores.

Na **Figura 5.2** a velocidade das bolhas alongadas é dada como uma função linear da velocidade superficial da mistura bifásica, de forma análoga ao modelo de deslizamento de fases (*Drift Flux Model*) proposto por Zuber e Findlay (1965). A partir desta função, é possível estimar a fração de vazio superficial, a velocidade de ambas as fases e, consequentemente, o inventário de refrigerante de um evaporador. Segundo este

modelo, a inclinação da reta se relaciona a não-uniformidade da fração de vazio e da velocidade das fases ao longo da seção transversal do canal, e o valor em que a velocidade intercepta o eixo *y* está relacionado à velocidade média de deslizamento da fase gás em relação à mistura. Para a elaboração da **Figura 5.2** assumiu-se a velocidade média do vapor igual a velocidade de deslocamento da bolha alongada, determinada através do tratamento de sinais de luminosidade captados pelo sensor óptico conforme descrito no capítulo 4.

A curva obtida prevê 86% dos dados dentro de uma faixa de erros de ±20%. Vale destacar que o coeficiente obtido neste estudo igual a 2,0 é próximo ao valor 1,88 determinado por Arcanjo et al. (2010), através apenas do tratamento de imagens do escoamento.

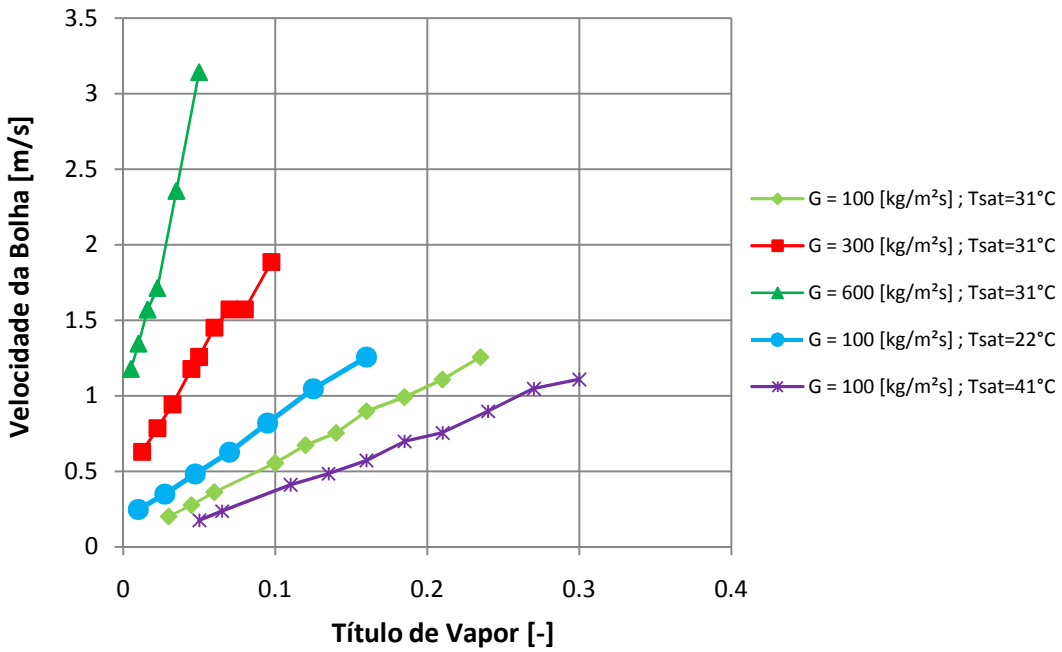


Figura 5.1 - Efeito da velocidade mássica e temperatura de saturação na velocidade da bolha alongada, R134a.

A **Figura 5.3** ilustra uma comparação entre a fração de vazio determinada a partir da velocidade do vapor dada pela equação apresentada na **Figura 5.2** e a fração de vazio segundo o modelo homogêneo dada pela Eq. 2.8. Segundo esta figura, e conforme esperado, a fração de vazio obtida neste estudo é inferior ao valor dado pelo modelo homogêneo. Além disso, com o incremento do título de vapor e da velocidade mássica tem-se o incremento da velocidade do vapor e da diferença entre a fração de vazio

estimada e a calculada segundo o modelo homogêneo. Tal comportamento está relacionado ao incremento da razão de deslizamento (*slip ratio*) entre as fases, que para o modelo homogêneo é igual a 1. Como mencionado na seção 2.3.2 vale ressaltar que este comportamento será alterado com a mudança para outro padrão, já que o gráfico foi traçado apenas para condições onde o padrão bolhas alongadas se verifica.

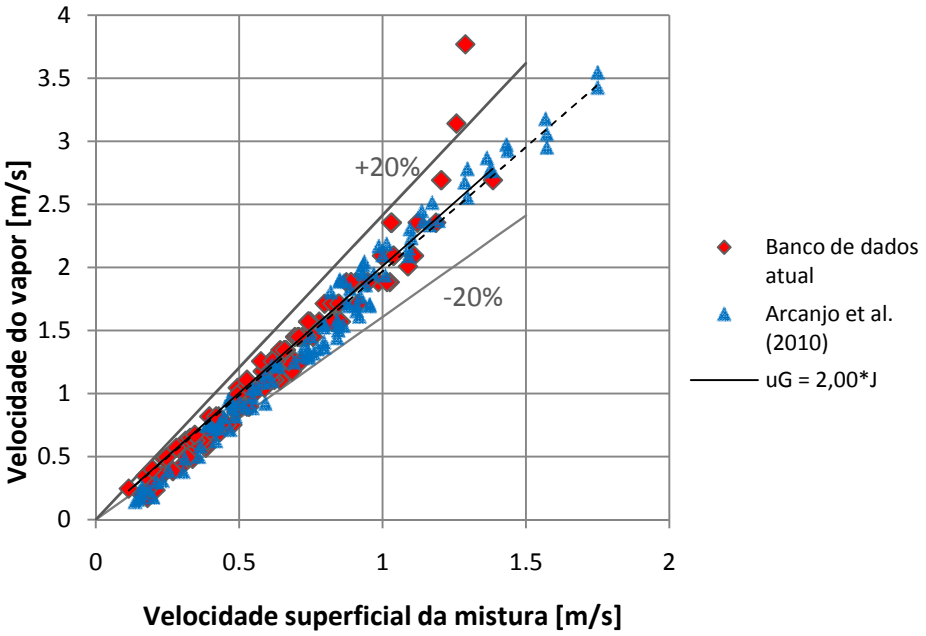


Figura 5.2 - Velocidade da bolha alongada como função da velocidade superficial do escoamento bifásico, R134a.

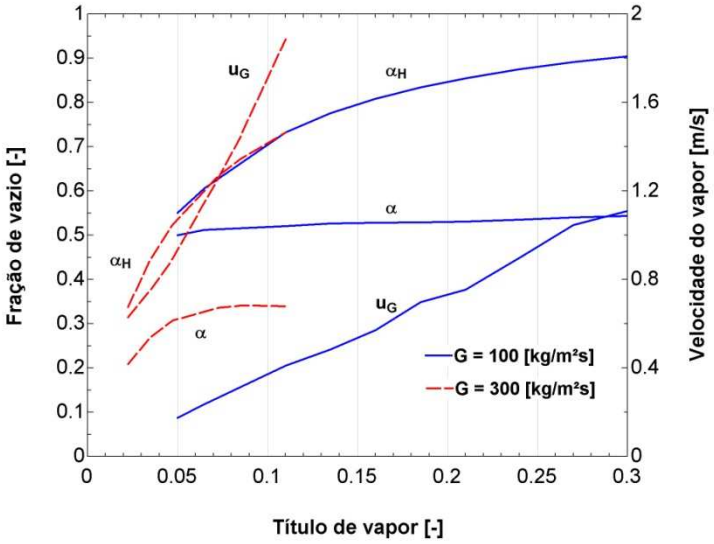


Figura 5.3 - Comparação entre as frações de vazio calculada a partir da velocidade das bolhas e do modelo homogêneo, R134a, T_{sat} = 22°C.

Com o aumento do título de vapor, a frequência de bolhas também se eleva até um valor a partir do qual a taxa de coalescência de bolhas supera a taxa de formação, resultando na diminuição da frequência de bolhas. Tal comportamento encontra-se ilustrado na **Figura 5.4** para diferentes condições experimentais. Esta figura ilustra também o incremento da frequência de bolhas com o aumento da velocidade mássica para temperatura de saturação e título de vapor fixos. Este fenômeno se explica pelo incremento de efeitos de turbulência com a velocidade mássica e suas consequências no processo de coalescência das bolhas. A **Figura 5.4** também ilustra que o pico de frequência de bolhas desloca-se para títulos de vapor inferiores com o incremento da velocidade mássica. Isto se explica pelo fato do número de bolhas e da fração de vazio superficial, conforme indicado pelos resultados levantados e o modelo de Rouhani e Axelson (1970), elevarem-se com o incremento da velocidade mássica. Ambos os comportamentos favorecem o incremento da coalescência em títulos inferiores.

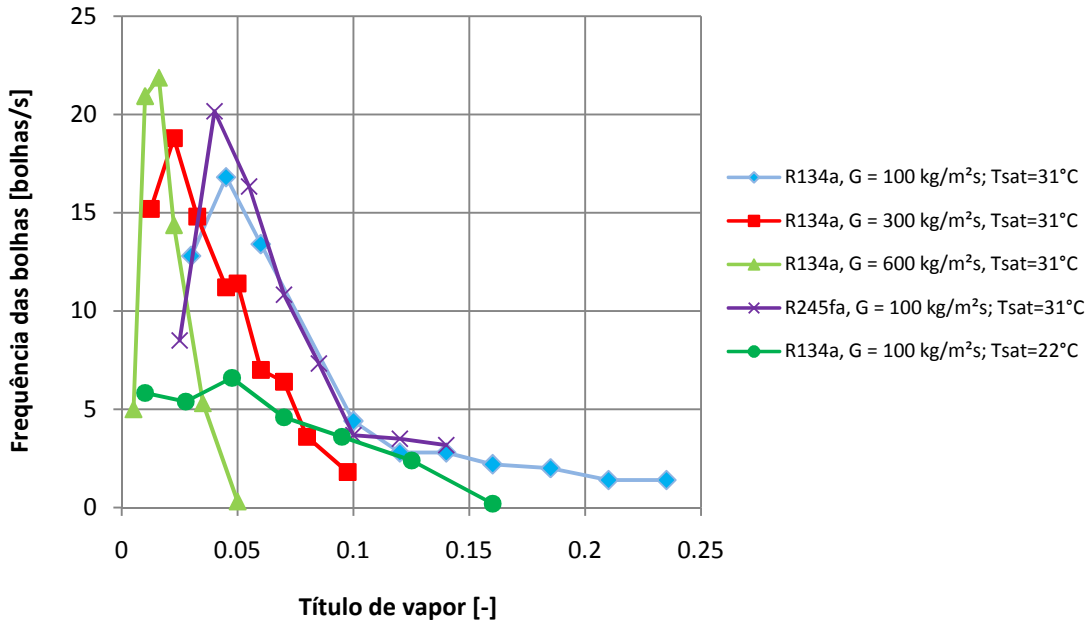


Figura 5.4 - Efeito da velocidade mássica, da temperatura de saturação e do refrigerante na frequência de bolhas.

Para velocidades mássicas similares, a **Figura 5.4** indica uma elevação no pico de freqüência de bolhas com o incremento da temperatura de saturação. Este comportamento é explicado pelo decréscimo da tensão superficial com o incremento da temperatura de saturação, facilitando os mecanismos de rompimento de bolhas.

A **Figura 5.5** ilustra o fato do título de vapor convergir assintoticamente para um valor com o incremento do comprimento médio das bolhas. Nesta figura, o título de vapor correspondente a um comprimento de bolhas infinito indica uma transição do padrão segundo bolhas alongadas (intermitente) para o padrão anular. Assim, com base neste comportamento e na **Figura 5.5**, é possível concluir que o título de vapor de transição entre estes padrões se eleva com o incremento da temperatura e a redução da velocidade mássica, conforme será indicado nos próximos itens apresentados neste capítulo, relacionados a padrões de escoamento.

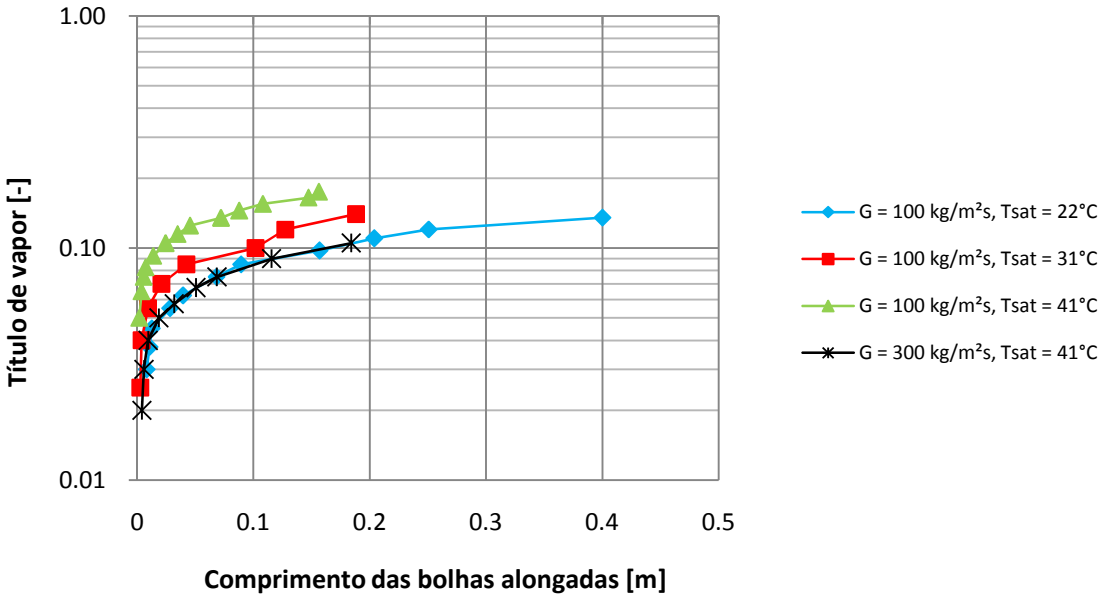


Figura 5.5 - Ilustração da convergência assintótica do título de vapor com o incremento do comprimento médio das bolhas, R245fa.

5.3 Padrões de escoamento baseados em visualizações

A **Figura 5.6** ilustra o efeito da temperatura de saturação na transição entre os padrões de escoamento bolhas, intermitente (bolhas alongadas + agitante) e anular. Segundo a figura, as linhas de transição se deslocam à direita com o incremento da temperatura de saturação e para o refrigerante R134a. Este comportamento está relacionado ao fato do volume específico do gás decrescer com o incremento da temperatura de saturação e apresentar valores inferiores para temperatura de saturação de 41°C. A velocidade da fase vapor se eleva com o aumento do volume específico, incrementando efeitos inerciais do escoamento e causando o rompimento das pontes de

líquido presentes durante os escoamentos segundo bolhas alongadas e agitantes, causando, para uma mesma condição experimental, a transição para escoamento anular em títulos de vapor inferiores no caso de temperaturas inferiores e para o refrigerante R245fa em relação ao R134a.

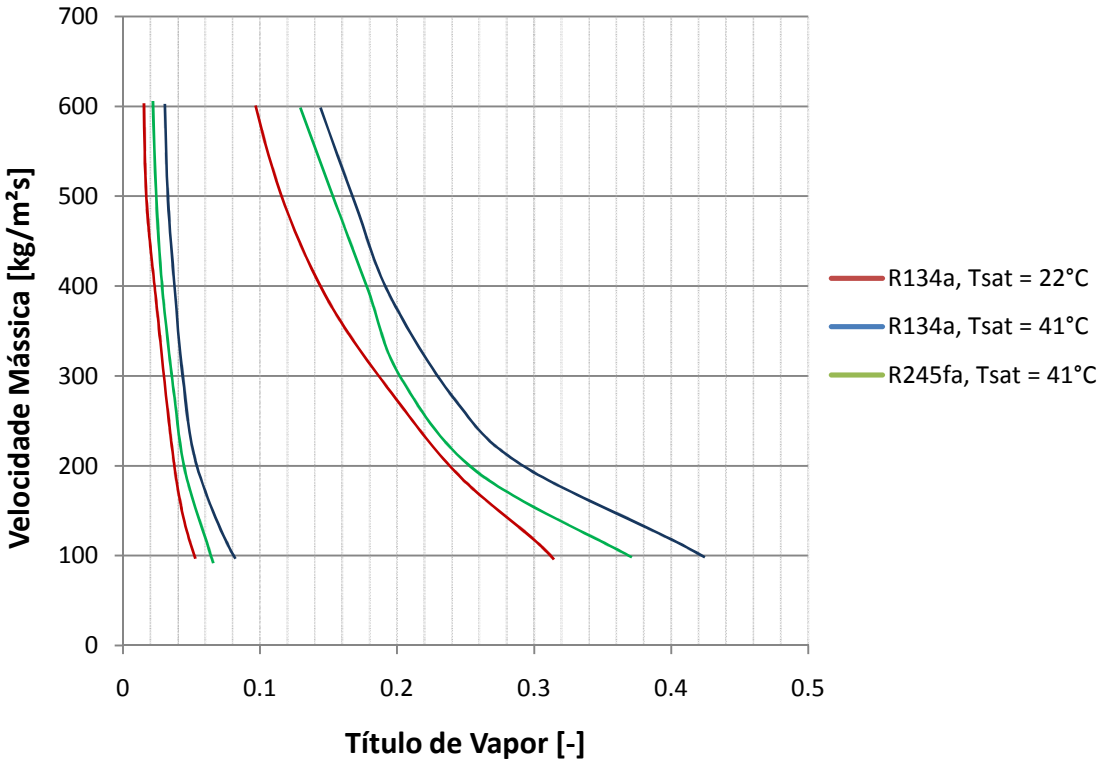


Figura 5.6 - Mapas de padrões de escoamento baseados em visualizações

5.4 Comparações entre transições baseadas em observações e métodos de previsão da literatura.

De acordo com a **Figura 5.7**, o método de Barnea et al. (1983) prevê adequadamente a ausência do escoamento estratificado para as condições experimentais consideradas. O escoamento estratificado não foi observado para todas as temperaturas de saturação. Segundo esta figura, o método de Barnea et al. (1983) não captura satisfatoriamente a transição entre os escoamentos anular e intermitente (bolhas alongadas e agitante). Tal resultado foi observado independentemente do fluido refrigerante e temperatura de saturaçao. O método de Barnea et al. (1983) também não prevê a redução do título de vapor de transição com o incremento da velocidade mássica, ao contrário, fornece um título de vapor de transição constante. Tal fato está

relacionado às hipóteses de uma relação linear entre as velocidades superficiais do líquido e do gás, e a uma fração de vazio de transição constante, o que resulta em um título de vapor de transição constante. A elevação da temperatura de saturação de 22 para 31 °C e posteriormente para 41 °C resulta no incremento da imprecisão do método, já que a intensidade da variação do título vapor de transição com o incremento da velocidade mássica se eleva com o aumento da temperatura de saturação.

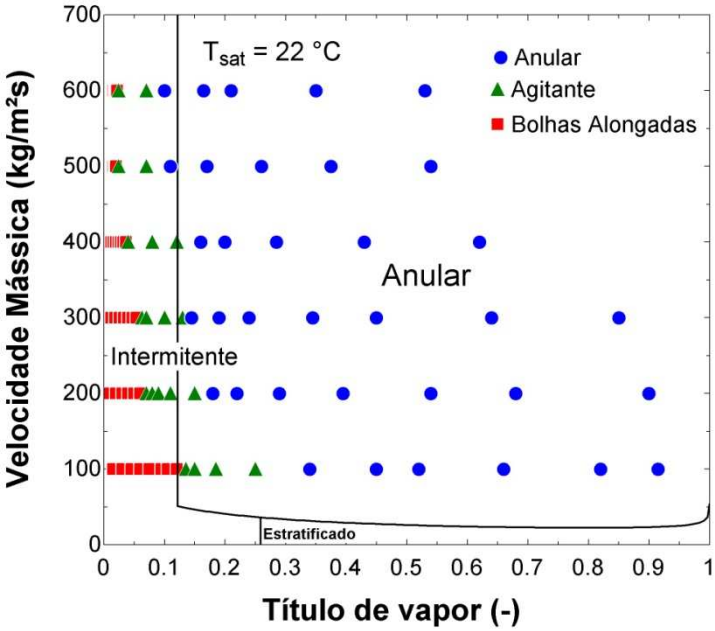


Figura 5.7 - Comparação entre o método de Barnea et al. (1983) (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R245fa, T_{sat} = 31°C, D=2,32mm.

A **Figura 5.8** compara os resultados deste estudo com as linhas de transição fornecidas pelo método proposto por Ong e Thome (2009). Nesta figura se observa que o método proposto por Ong e Thome (2009) prediz razoavelmente as transições levantadas no presente estudo. Além disso, o método captura apropriadamente a redução do título de vapor de transição entre intermitente e anular com o incremento da velocidade mássica. O método de Ong e Thome não prevê a existência do padrão de escoamento estratificado. Condições de secagem de parede não foram levantadas no presente estudo, entretanto vale ressaltar que segundo os resultados de Tibiriçá e Ribatski (2010) para uma superfície com diâmetro de 2,3 mm e os refrigerantes R134a e R245fa, a secagem de parede, constatada a partir da variação da temperatura superficial, foi verificada apenas para títulos de vapor superiores a 0,90.

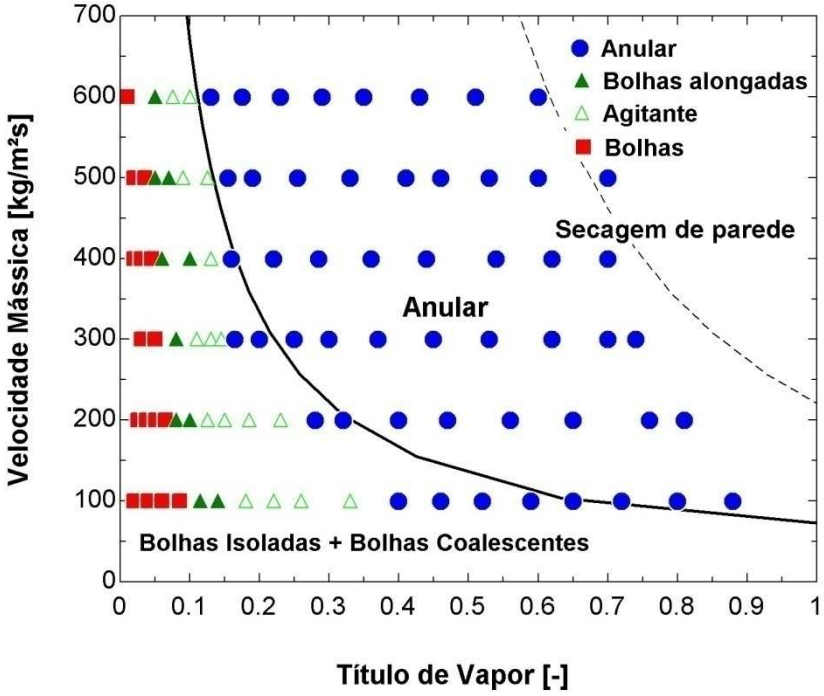


Figura 5.8 - Comparação entre o método de predição de Ong e Thome (2009) (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R245fa, D=2,32mm, T_{sat}=31°C.

A **Figura 5.9** compara os resultados obtidos no presente estudo com as transições entre padrões de escoamento previstas pelo método de Felcar et al. (2007) para temperaturas de saturação de 22 e 41°C. Este método, embora baseado em dados da literatura para escoamentos ar-água, prevê razoavelmente os resultados experimentais para refrigerantes halogenados deste estudo. Na transição de intermitente para anular a redução do título de vapor de transição com o incremento da velocidade mássica é capturada satisfatoriamente. O método de Felcar et al. (2007) também sugere a ausência do padrão estratificado para as condições experimentais do presente estudo. Entretanto, o método não prediz adequadamente resultados para títulos de vapor elevados e próximos à condição de secagem de parede com velocidades mássicas inferiores a 100 kg/m²s conforme ilustrado na **Figura 5.9**. Alterações no método são necessárias para que este proporcione resultados apropriados também para estas condições.

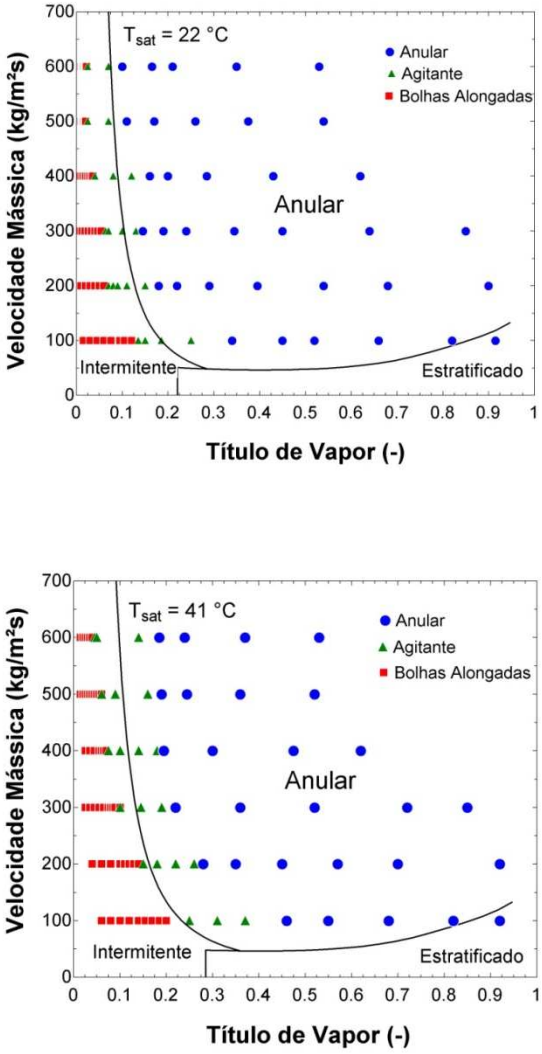


Figura 5.9 - Comparação entre o método de predição de Felcar et al. (2007) (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R245fa, *D*=2,32mm.

5.5 Avaliação objetiva dos padrões de escoamento

Inicialmente verificou-se a sensibilidade às características do escoamento do transdutor de pressão piezoelétrico, dos pares sensor/emissor de radiação luminosa e do termopar em contato com o fluido, conforme procedimento adotado por Sempértegui e Ribatski (2010). Para isto selecionou-se uma condição representativa de cada padrão de escoamento para os quais sinais dos transdutores mencionados foram devidamente analisados.

As **Figuras 5.10** a **5.16** apresentam a variação com o tempo da atenuação da radiação, da pressão e da temperatura. Elas também ilustram a Função Densidade de

Probabilidade ou PDF (*Probability Density Function*) e a Densidade Espectral de Energia ou PSD (*Power Spectral Density*) para cada sinal analisado segundo os distintos padrões de escoamento.

A **Figura 5.10b**, ilustra o resultado de atenuação do laser pelo escoamento segundo bolhas (dimensão característica inferior ao diâmetro do tubo). Para este padrão a presença das bolhas está relacionada ao valor mínimo capturado pelo fotodiodo. Tal comportamento decorre da reflexão da radiação luminosa na presença da interfase líquido/gás com a conseqüente atenuação do sinal captado pelo fotodiodo. O PDF deste sinal apresenta dois picos com amplitudes próximas. O primeiro pico está relacionado a passagem da fase vapor, isto é a bolha. O segundo se relaciona à presença apenas da fase líquida. O PSD deste sinal indica um pico a uma frequência aproximada de 10 Hz que corresponde a frequência de bolhas, conforme indicado pela análise de imagens concomitantes do escoamento adquiridas pela câmera de alta velocidade.

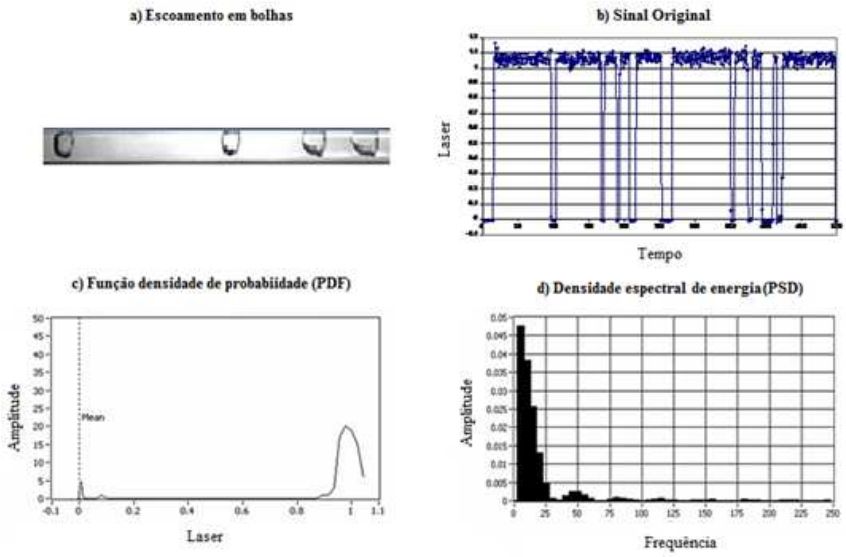


Figura 5.10 - Análise do sinal captado pelo fotodiodo para o padrão de escoamento segundo bolhas, T_{sat} = 31°C, G = 100 kg/m²s e x = 0,07, R245fa.

A **Figura 5.11** apresenta análise similar do sinal luminoso para o padrão de escoamento intermitente. Na **Figura 5.11b** se infere a existência de bolhas alongadas, indicadas por valores mínimos, intercaladas com pontes de líquido, caracterizadas por valores máximos na intensidade do sinal capturado. O PDF também apresenta dois picos que representam a presença das fases líquido e gás, mas, neste caso, o pico que

representa o gás apresenta amplitude superior devido a predominância temporal de bolhas alongadas.

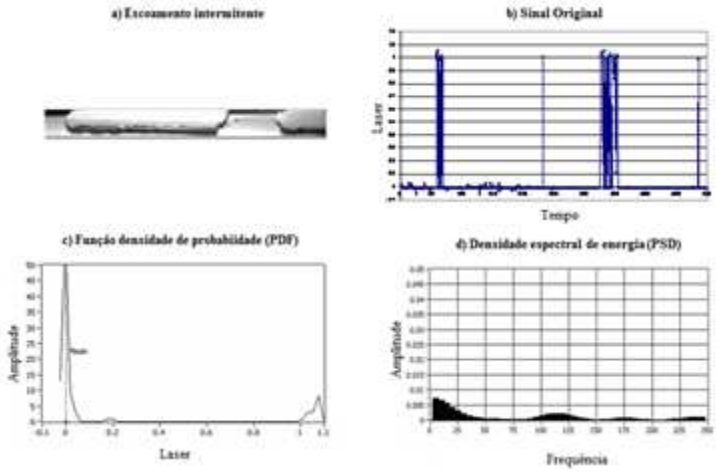


Figura 5.11 - Análise do sinal captado pelo fotodiodo para o padrão de escoamento intermitente, T_{sat} = 22°C, G = 300 kg/m²s, x = 0,13, R245fa.

Para o caso do padrão anular, a **Figura 5.12b** indica um valor aproximadamente constante e aproximadamente nulo para a intensidade da radiação capturada pelo fotodiodo. Após a transição de intermitente para o escoamento anular, o PDF apresenta um pico único para o valor mínimo e o PSD não indica a predominância de uma frequência.

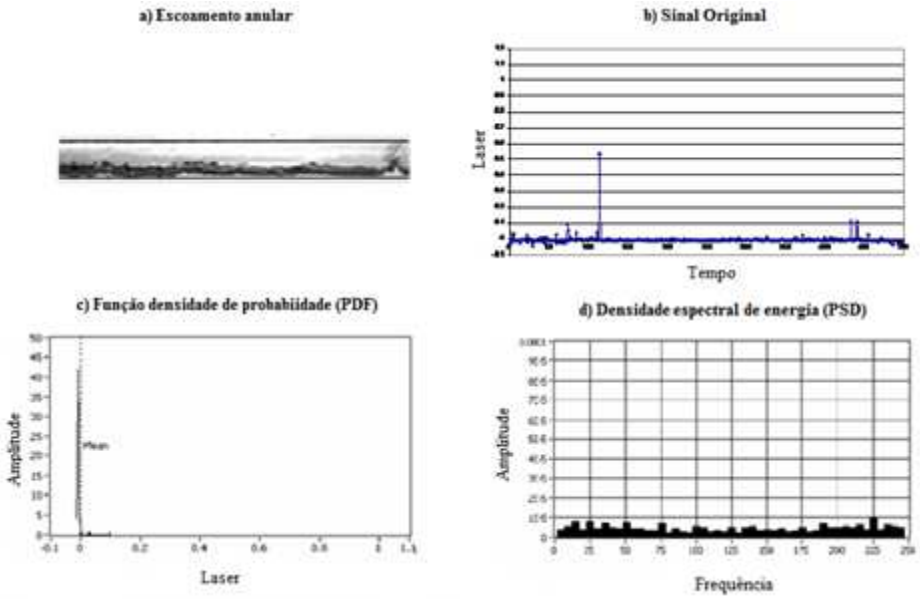


Figura 5.12 - Análise do sinal captado pelo fotodiodo para o padrão de escoamento anular, T_{sat} = 31°C, G = 600 kg/m²s, x = 0,37, R134a.

As **Figuras 5.13** a **5.15** apresentam uma análise do sinal capturado pelo transdutor piezoelétrico. Nelas são também ilustradas a variação da pressão local com o tempo, o PDF (*Probability Density Function*) e o PSD (*Power Spectral Density*) do sinal da pressão. Comparando a evolução da pressão local com o tempo para cada um dos padrões de escoamento ilustrados nas **Figuras 5.13b** a **5.15b**, constatam-se distinções entre os sinais conforme o padrão estabelecido. Para os padrões bolhas e bolhas alongadas (ou intermitente) o sinal apresenta oscilações superiores às verificadas no escoamento anular. Mediante a análise do diagrama PDF para os três padrões de escoamento não se verificam informações relevantes. Para escoamento segundo bolhas, verifica-se um pico no diagrama PSD próximo a 125 Hz, este valor é superior à frequência de bolhas avaliada através de imagens do escoamento igual a 9 bolhas/s. Para o escoamento segundo bolhas esperava-se que a combinação de forças atuando nas bolhas não afetaria a pressão local determinada pelo transdutor de pressão pois a dimensão característica das bolhas é razoavelmente inferior ao diâmetro do tubo. O PSD do escoamento anular ilustrado na **Figura 5.15d** não apresenta pico já que a sinal não apresenta oscilações relevantes.

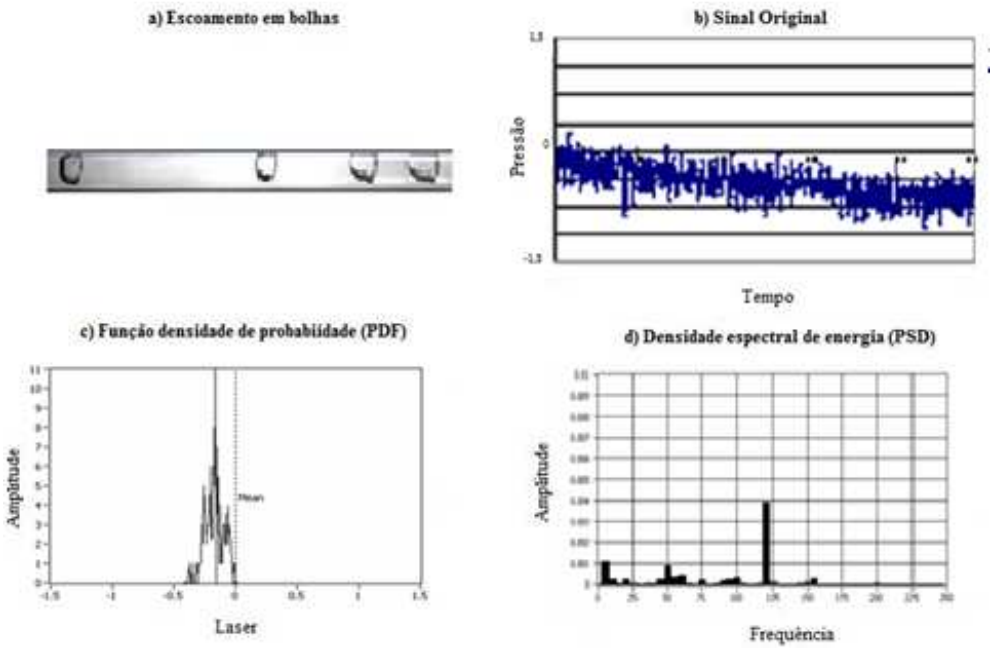


Figura 5.13 - Análise do sinal da pressão para o padrão bolhas. T_{sat} = 22°C, G = 100 kg/m²s, x = 0,07, R245fa.

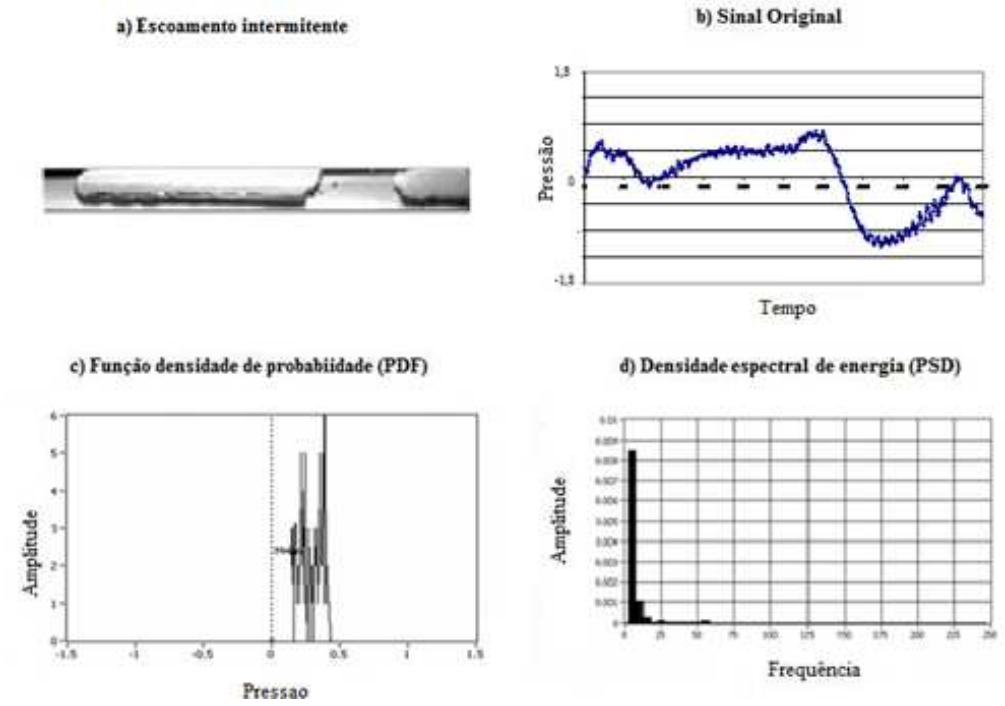


Figura 5.14 - Análise do sinal da pressão para o padrão intermitente, T_{sat} = 22°C, G = 300 kg/m²s, x = 0,13, R245fa.

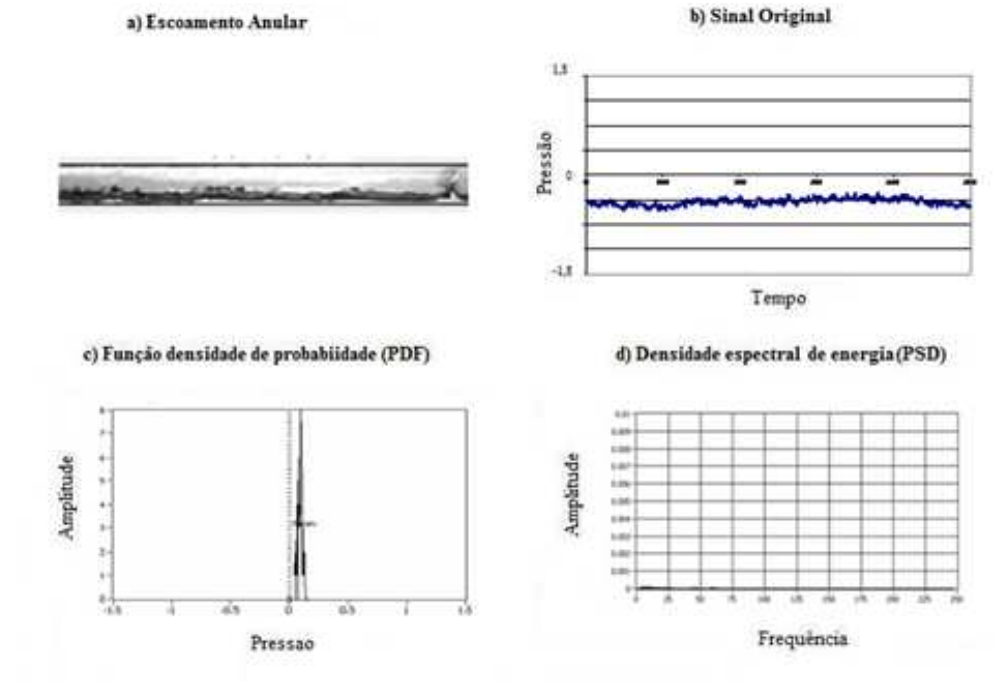


Figura 5.15 - Análise do sinal da pressão para o padrão anular. T_{sat} = 31°C, G = 600 kg/m²s, x = 0,37, R134a.

A **Figura 5.16** ilustra a mudança da temperatura local com o tempo para cada padrão de escoamento. Segundo ela, a temperatura apresenta um valor

aproximadamente constante, com a variação observada estando dentro da faixa de incertezas de sua medida. Com base no método de capacitância concentrada, o tempo de resposta do termopar foi estimado em 0,3 s, deste modo ele é incapaz de capturar oscilações da temperatura em frequências elevadas, explicando o fato do sinal capturado ser aproximadamente constante independentemente do padrão do escoamento.

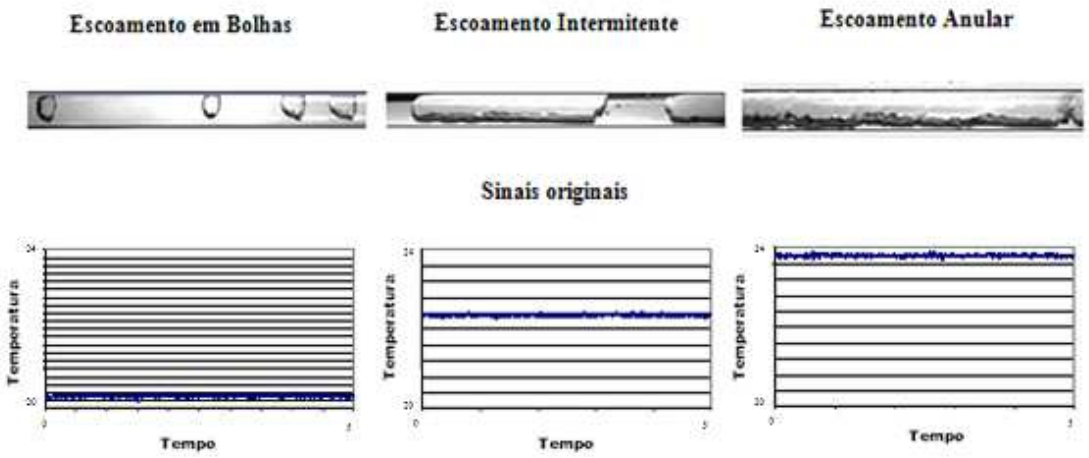


Figura 5.16 - Análise do sinal da temperatura para os três padrões de escoamento.

5.6 Mapas de padrões de escoamento bifásico

Baseado na análise apresentada no item 5.5, foram selecionados os sinais capturados pelo fotodiodo e pelo transdutor de pressão piezoelétrico para identificar os padrões de escoamento mediante o algoritmo *k-means*. A média, o desvio padrão, a obliqüidade e a curtose foram calculadas para ambos os sinais. Verificou-se que os seguintes parâmetros permitem uma melhor caracterização do padrão: média do sinal do sinal luminoso (Me_L), desvio padrão do sinal luminoso (Dp_L), média do sinal da pressão (Me_P) e o desvio padrão do sinal da pressão (Dp_P).

Tendo estes parâmetros como dados de entrada, as quatro combinações possíveis de grupos de três parâmetros foram avaliadas no algoritmo do método de agrupamento *k-means*. Estes dados foram fornecidos ao algoritmo gerando mapas de padrões de escoamento. A combinação dos parâmetros Me_L, Dp_L e Dp_P foi a que proporcionou resultados mais próximos aos padrões caracterizados através de visualizações.

A **Figura 5.17** ilustra uma comparação entre o mapa de padrões de escoamento elaborado a partir do algoritmo e os resultados experimentais baseados na classificação de padrões através de visualizações. Nela as linhas representam as fronteiras entre os 3 grupos (*clusters*) e os símbolos representam os padrões visualizados. As linhas contínuas na **Figura 5.17** representam as transições entre os grupos (padrões de escoamento) obtidos pelo algoritmo *k-means*. Elas foram traçadas através de equações ajustadas às transições segundo a classificação baseada nos métodos de agrupamento. A transição entre agitante (também denominado de intermitente) e anular baseada no método de agrupamento coincide razoavelmente com os resultados baseados em visualizações. Conclusão similar é observada para a transição entre bolhas e bolhas alongadas e conforme aos resultados descritos por Sempértegui e Ribatski (2010).

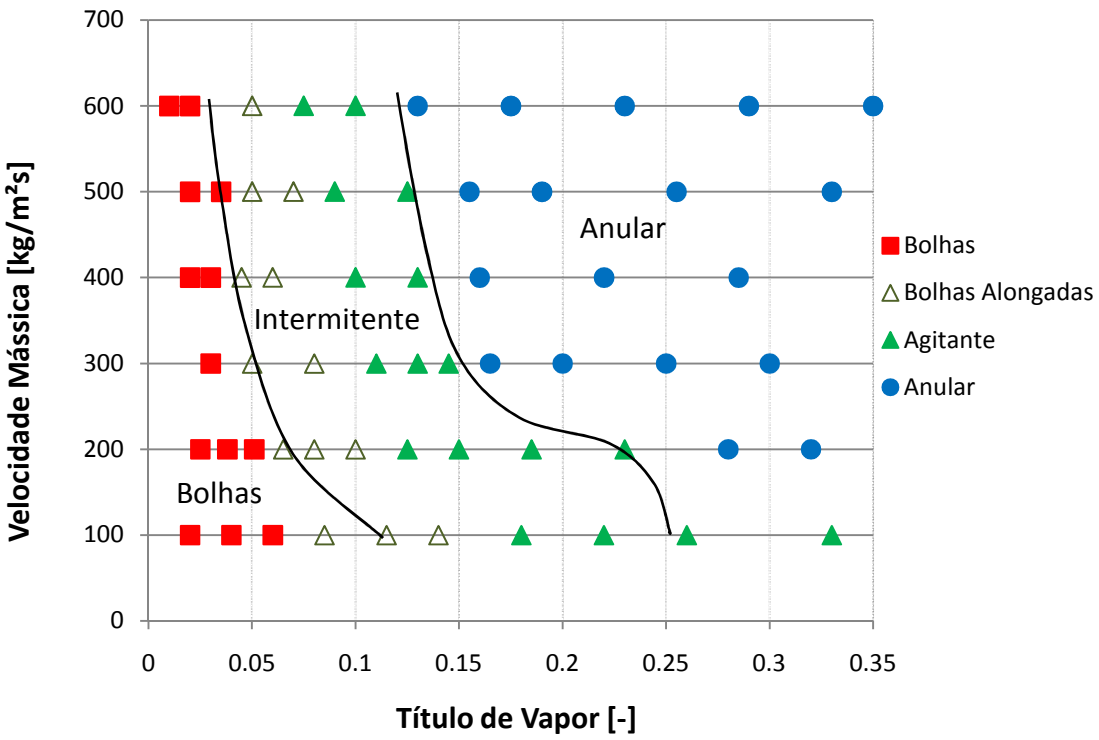


Figura 5.17 - Comparação entre o método proposto com 3 centróides (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R245fa, T_{sat} = *31°C*.

A **Figura 5.18** e a **Figura 5.19** apresentam os resultados com três centróides para o fluido R134a, para temperaturas de saturação de 22 e 31°C, respectivamente. A transição entre o padrão agitante (intermitente) e anular e a transição do padrão bolhas e bolhas alongadas obtidas pelos métodos objetivos coincidem razoavelmente com os resultados baseados em visualizações independentemente da temperatura. Nestas

figuras, as linhas de transição entre os grupos (ou clusters) também foram determinadas mediante ajuste de curvas exponenciais e polinomiais.

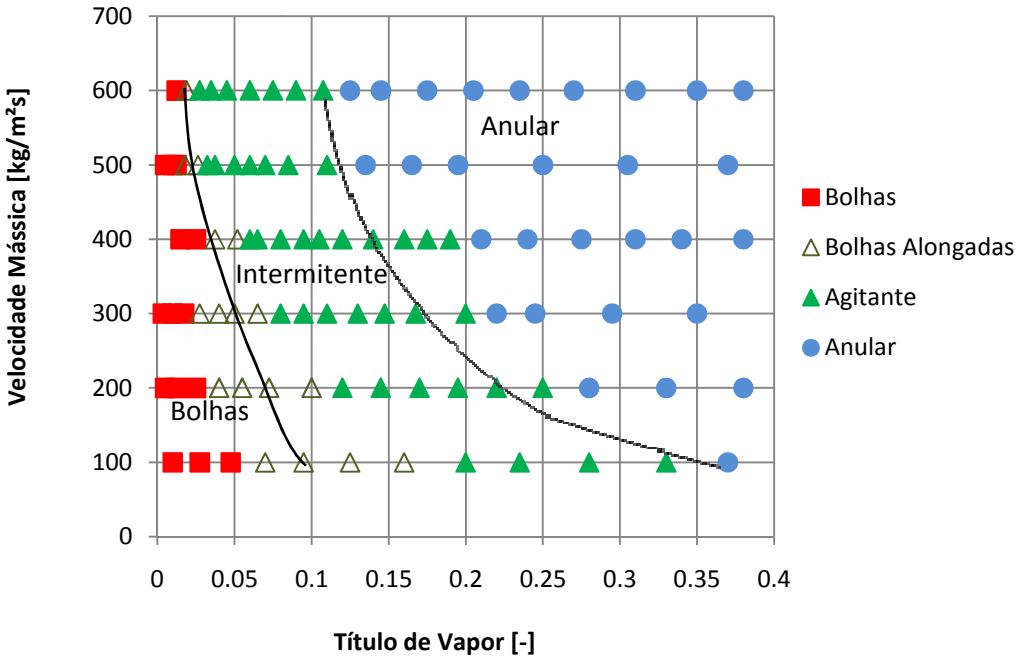


Figura 5.18 - Comparação entre o método proposto com 3 centróides (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R134a, T_{sat} = 22°C.

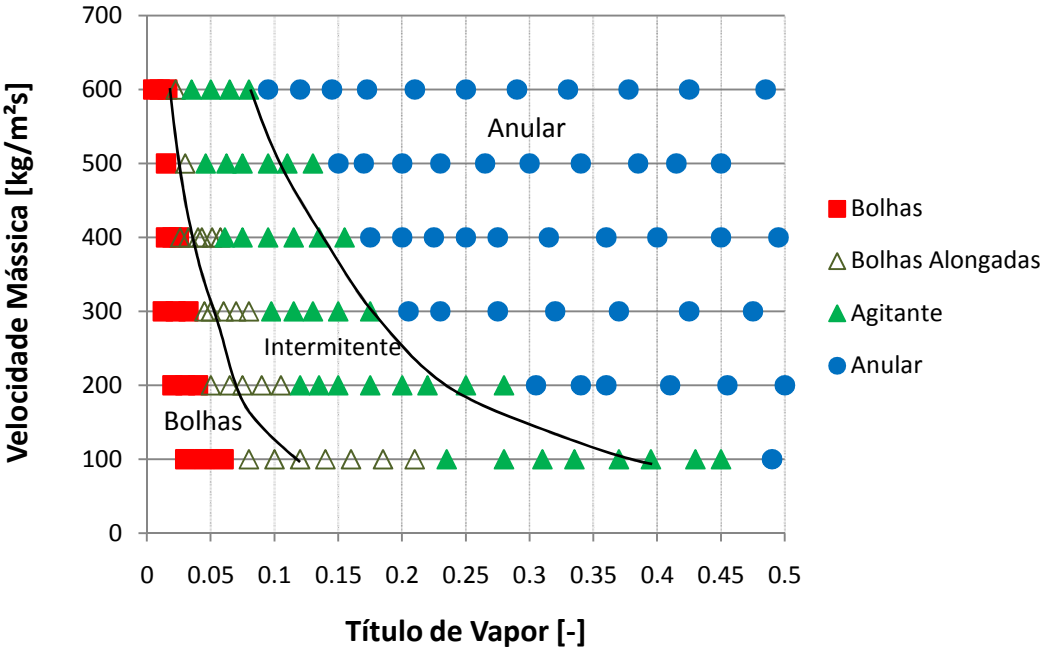


Figura 5.19 - Comparação entre o método proposto com 3 centróides (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R134a, T_{sat} = 31°C.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Considerações gerais

A presente pesquisa dedicou-se ao estudo de padrões de escoamento durante a ebulição convectiva em um tubo horizontal com diâmetro igual a 2,32 mm. A importância deste estudo decorre do fato do padrão de escoamento afetar o coeficiente de transferência de calor, a perda de pressão e o fluxo crítico de calor e, desta forma, ser necessário ao desenvolvimento de correlações e modelos para estes parâmetros.

Além da caracterização dos padrões de escoamento através da visualização e de técnicas objetivas foram estudadas as características das bolhas alongadas durante o escoamento bifásico em tubos de diâmetro reduzido.

Foi também realizado um extenso estudo da literatura sobre padrões de escoamento gás – líquido. A partir do estudo teórico – experimental realizado são apresentados, neste capítulo, as conclusões desta dissertação e recomendações para estudos futuros.

6.2 Conclusões

As seguintes conclusões foram levantadas a partir dos resultados experimentais e da análise da literatura efetuada:

- As classificações baseadas em observações visuais são subjetivas, e desta forma estão sujeitas ao julgamento de um operador. Além disso, podem não apresentar relação alguma com os processos de transferência de calor, perda de pressão, fração de vazio e fluxo crítico de calor, estes sim relevantes aos projetos de trocadores;
- Os métodos objetivos baseados na análise de sinais relacionados ao escoamento permitem incorporar aspectos relevantes ao projeto de trocadores de calor inerentes aos padrões de escoamento. Os sinais utilizados estão relacionados a variações da pressão local, fração de vazio, a transferência de calor e topologia da distribuição de fases;

- A literatura não apresenta até o momento um critério definitivo e amplamente adotado para a transição durante a ebulição convectiva entre macro- e micro-escala. Entretanto, parece que tal critério, caso necessário, deve conter aspectos de efeitos de confinamento de bolhas, inerciais, molhabilidade e gravitacionais. Neste último caso a presença ou não do escoamento estratificado deve ser considerada;
- Os métodos para previsão de padrões de escoamento levantados na literatura foram discutidos e amplamente analisados. Conclui-se que em sua maioria, apesar da pretensão genérica, eles proporcionam resultados típicos das condições experimentais nas quais são baseados e incorporam a subjetividade da interpretação de seus autores;
- Os resultados experimentais levantados no presente estudo foram comparados com métodos de previsão de padrões de escoamento para microcanais existentes na literatura. Em geral, o método proposto por Felcar et al. (2007) prevê razoavelmente o banco de dados obtidos no presente estudo caracterizado a partir de imagens do escoamento capturadas por uma câmera de alta velocidade;
- Sob condições de desenvolvimento do padrão de escoamento a partir do processo de evaporação, o padrão estratificado parece não ocorrer para canais com diâmetro interno igual a 2,32 mm ou inferiores, conforme já indicado por Tibiriçá e Ribatski (2010);
- A variação da pressão local e a atenuação da radiação luminosa pelo escoamento capturada por um fotodiodo permitem caracterizar satisfatoriamente os padrões de escoamento;
- O mapa de padrões de escoamento propôs a partir de um algoritmo de agrupamento “k-means” apresentou razoável semelhança com o mapa levantado a partir das visualizações;

6.3 Recomendações para trabalhos futuros

O presente estudo envolveu uma análise ampla de vários aspectos dos padrões de escoamento em microcanais. Entretanto, diversos temas não explorados podem ser considerados para trabalhos futuros, entre os quais se destacam:

- A presente pesquisa foi realizada para o escoamento através de um único canal, entretanto trocadores de calor são constituídos por múltiplos canais os quais interagem buscando uma distribuição de pressão uniforme entre eles, afetando a vazão instantânea através de cada canal e, consequentemente, o padrão de escoamento;
- Realização de ensaios para novas geometrias de canais (quadrado, retangular e triangular), pois estas são as configurações de seções transversais verificadas em dissipadores de calor baseados em microcanais devido à facilidade em serem fabricadas. A importância deste estudo se dá também pelo fato de seções caracterizadas por cantos, ao contrário da verificada em canais tubulares, resultarem em uma espessura do filme líquido não uniforme com acumulo de líquido nos cantos devido a efeitos capilares. Este comportamento provavelmente afeta a transferência de calor, perda de pressão e transição entre padrões de escoamento;
- Realização de ensaios com outros refrigerantes e para diâmetros inferiores;
- A utilização de termopares, em contato com o fluido refrigerante, com diâmetros de junta quente menores para assim obter melhores tempos de resposta. Assim, características relacionadas à variação temporal da temperatura do fluido poderiam ser incorporadas a um mapa de escoamento baseadas em técnicas de agrupamento de dados. Tal mapa incluiria não apenas características da geometria interfacial do escoamento bifásico e da variação da pressão, como no presente estudo, mas também aspectos relacionados diretamente aos mecanismos de transferência de calor.

BIBLIOGRAFIA

ABERNETHY, R. B.; THOMPSON, J. W. **Handbook uncertainty in gas turbine measurements.** Arnold Engineering Development Center, A. A. F. Station, Tennessee. 1973.

ALVES, G. E. Cocurrent liquid-gas flow in a pipeline contractor. **Chem. Eng. Prog.**, v. 50, p. 449-456, 1954.

ARAÚJO, D. C.; NASCIMENTO, F. C.; ARCANJO, A. A.; TIBIRIÇÁ, C. B.; RIBATSKI, G. Neural networks approach for prediction of gás-liquid two-phase flow pattern during convective condesation in microscale channels. In: **7th International Conference on Heat Transfer**, Antalya-Turkey. 2010.

ARCANJO, A. A.; TIBIRIÇÁ, C. B.; RIBATSKI, G. Evaluation of flow patterns and elongated bubble characteristics during the flow boiling of halocarbon refrigerants in a micro-scale channel **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 34, p. 766-775, 2010.

BAKER, D. Simultaneous flow of oil and gas. **Oil and Gas Journal**, v. 53, p. 183-195, 1954.

BARAJAS, A. M.; PANTON, R. L. The effects of contact angle on two-phase flow in capillary tubes. **Int. J. Multiphase Flow** v. 19, p. 337-346, 1993.

BARBIERI, P. E. L. **Estudo teórico-experimental da ebulição convectiva do refrigerante R134a em tubos lisos** 2005. 302. (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

BARBOSA, R. M. **Estatística Elementar (Estatística descritiva).** Livraria Nobel S.A., O. Edição, São Paulo. 1975.

BARNEA, D. A unified model for predicting flow-pattern transitions for the whole range of pipe inclinations. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 13, p. 1-12, 1987.

BARNEA, D.; LUNINSKI, Y.; TAITEL, Y. Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes. **J. Chem. Eng.**, v. 61, p. 617-620, 1983.

BARNEA, D.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y. Flow pattern transition for downward inclined two phase flow; horizontal to vertical. **Chemical Engineering Science**, v. 37, p. 735-740, 1982.

BARNEA, D.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y. Gas-liquid flow in inclined tubes: flow pattern transitions for upward flow. **Chemical Engineering Science**, v. 40, p. 131-136, 1985.

BARNEA, D.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes. Comparison of experimental data with theory. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 6, p. 217-225, 1980.

BERGELIN, O. P.; GAZLEY, C. Cocurrent gas-liquid flow, I. Flow in horizontal tubes. In: **Proc. Heat Transfer and Fluid Mech. Inst.**, 1949.

CAI, S.; TORAL, H.; QIU, J.; ARCHER, J. S. Neural network-based objective flow regime identification in air-water two-phase flow. **Can. J. Chem. Eng.**, v. 72, p. 440-445, 1994.

CANIÈRE, H.; BAUWENS, B.; T'JOEN, C.; PAEPE, M. D. Probabilistic mapping of adiabatic horizontal two-phase flow by capacitance siganl feature clustering. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 35, p. 650-660, 2009.

CASTRO, F. C. C.; CASTRO, M. F. F. **Redes neurais artificiais.** PUCRS, Porto Alegre. 2010.

CELATA, G. P. Single- and two-phase flow heat transfer in micropipes. In: **5th European Thermal-Science Conference**, Netherlands. 2008.

CHEN, N. S. Charts give tubeside pressure drop. **Chemical Engineering**, v., p. 111-115, 1959.

CHEN, W. L.; TWU, M. C.; PAN, C. Gas-liquid two-phase flow in micro-channels. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, p. 1235-1247, 2002.

CHUNG, P. M. Y.; KAWAJI, M. The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteritics in microchannels. **International Journal of Multiphase Flow** v., p. 735–761, 2004.

COLEBROOK, C. F. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. **J. Instn. Civ. Engrs**, v. 11, p. 133-156, 1939.

COLEMAN, J. W.; GARIMELLA, S. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 42, p. 2869–2881, 1999.

COLLIER, J. G.; THOME, J. G. **Convective boiling and Condensation.** Osford Science Press., New York. 1996.

CUBAUD, T.; HO, C. M. Transport of bubbles in square microchannels. **Phys. Fluids** v. 16, p. 4575–4585, 2004.

DAMIANIDES, C. A.; WESTWATER, J. K. Two-phase flow in a compact heat exchanger and in small tubes. In: **Proc. 2nd UK National Conference on Heat Transfer**, 1988.

EATON, B. A.; ANDREWS, D. E.; KNOWLES, C. R.; SILLBERBERG, I. H.; BROON, K. E. The prediction of flow patterns, liquid holdup and pressure losses

occurring during continuous two-phase flow in horizontal pipelines. **J. Petrol Technol**, v. 19, p. 815-828, 1967.

EES. Engineering Equation Solver. 2009. F-chart Software. ver. 8.9.

FELCAR, H. O. M.; RIBATSKI, G.; SAIZ-JABARDO, J. M. A gas-liquid flow pattern predictive method for macro- and mini-scale round channels. In: **Proc. 10th UK Heat Transfer Conference**, Edinburgo, Escocia. 2007.

FUKANO, T.; KARIYASAKI, A. Characteristics of gas–liquid two-phase flow in a capillary. **Nucl. Eng. Des**, v. 141, p. 59-68, 1993.

GALBIATI, L.; ANDREINI, P. Flow pattern transition for vertical downward two-phase flow in capillary tubes. Inlet mixing effects. **Int. Commun. Heat Mass Transfer** v. 19, p. 791-799, 1992.

GALEGAR, W. C.; STOVALL, W. B.; HUNTINGTON, R. L. More data on two-phase vertical flow. **Petroleum Refiner**, v. 33, p. 208-217, 1954.

GOVIER, G. W.; OMER, M. M. The horizontal pipeline flow of air-water mixtures. **Can. J. Chem. Eng.**, v. 40, p. 93-104, 1962.

HASSAN, I.; VAILLANCOURT, M.; PEHLIVAN, K. Two-phase flow regime transitions in microchannels: a comparative experimental study. **Microscale Thermophys. Eng.** , v. 9, p. 165–182, 2005.

HAVERKAMP, V.; HESSEL, V.; LÖWE, H.; MENGES, G.; WARNIER, M. J. F.; REBROW, E. V.; CROON, M. H. J. M. D.; SCHOUTEN, J. C.; LIAUW, M. A. Hydrodynamics and mixer-induced bubble formation in micro bubble columns with single and multiple-channels. **Chem. Eng. Technol.**, v. 29, p. 1015–1026, 2006.

HERNANDEZ, L.; JULIA, J. E.; CHIVA, S.; PARANJAPE, S.; ISHII, M. Fast classification of two-phase flow regimes based on conductivity signals and artificial neural networks. **Meas. Sci. Technol.** , v. 17, p. 1511-1521, 2006.

HEWITT, G. F.; ROBERTSON, D. N. Studies of two-phase flow patterns by simultaneous X-ray and flash photography. In: **Rept AERE-M2159**, Harwell. 1969.

HOOGENDORN, C. S. Gas-liquid flow in horizontal pipes. **Chem. Eng. Sci.**, v. 9, p. 205-217, 1959.

HUBBARD, M. G.; DUKLER, A. E. The characterization of flow regimes for horizontal two-phase flow: I. Statistical analysis of wall pressure fluctuations. In: **Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute**, Stanford. 1966.

IDE, H.; KARIYASAKI, A.; FUKANO, T. Fundamental data on the gas-liquid two-phase flow in minichannels. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 46, p. 519-530, 2007.

JOHNSON, H. A.; ABOU-SABE, A. H. Heat transfer and pressure drop for turbulent flow of air-water mixtures in a horizontal pipe. **Journal of Heat Transfer**, v. 74, p. 977-987, 1952.

JONES JR, O. C.; ZUBER, N. The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 2, p. 273-306, 1975.

JULIÁ, J. E.; LIU, Y.; PARANJAPE, S.; ISHII, M. Upward vertical two-phase flow local flow regime identification using neural network techniques. **Nuclear Engineering and Design**, v. 238, p. 156-169, 2008.

KADAMBI, V. Stability of annular flow in horizontal tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 8, p. 311-328, 1982.

KANDLIKAR, S. G.; GRANDE, W. J. Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology. **Heat Transfer Eng.**, v. 24, p. 3-17, 2003.

KATTAN, N.; THOME, J. R.; FAVRAT, D. Flow boiling in horizontal tubes. Part 1: Development of a diabatic two-phase flow pattern map. **Journal of Heat Transfer**, v. 120, p., 1998.

KAWAHARA, A.; CHUNG, P. M. Y.; KAWAJI, M. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel. **International Journal of Multiphase Flow** v. 28, p. 1411–1435, 2002.

KEW, P.; CORNWELL, K. Correlations for prediction of boiling heat transfer in small diameter channels. **Appl. Thermal Eng.**, v. 17, p. 705-715, 1997.

KOSTERIN, S. I. An investigation of the influence of diameter and inclination of a tube on the hydraulic resistance and flow structure of gas-liquid mixtures. **Izvest. Akad.**, v. 12, p. 1824-1830, 1949.

KRASIAKOVA, L. Y. Some characteristics of movements of two-phase mixtures in a horizontal pipe. **Zhur Tech Fig 22**, v. 5, p. 656, 1952.

LEE, C. Y.; LEE, S. Y. Influence of surface wettability on transition of two-phase flow pattern in round mini-channels. **International Journal of Multiphase Flow** v. 34, p. 706–711, 2008.

LIN, P. Y.; HANRATTY, T. J. Prediction of the initiation of slugs with linear stability theory. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 12, p. 79-98, 1986.

MANDHANE, J. M.; GREGORY, G. A.; AZIZ, K. A flow pattern map for gas--liquid flow in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 1, p. 537-553, 1974.

MEHENDAL, S. S.; JACOBI, A. M.; SHAH, R. K. Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design. **Appl. Mech. Rev.**, v. 53, p. 175-193, 2000.

MI, Y.; ISHII, M.; TSOUKALAS, L. H. Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase models. **Nuclear Engineering and Design**, v. 204, p. 87-100, 2001.

MISHIMA, K.; HIBIKI, T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 22, p. 703-712, 1996.

MISHIMA, K.; ISHI, M. Theoretical prediction of onset of horizontal slug flow. **J. Fluids Eng**, v. 102, p. 441-444, 1986.

MOFFAT, R. J. Describing the uncertainties in experimental results. **Exp. Therm. Fluid Sci.** , v. 1, p. 3-17, 1988.

NISHIGAWA, K.; SEKOGUCHI, K.; FUKANO, T. On the pulsation phenomena in gas-liquid two-phase flow. **Bull. JSME**, v. 12, p. 1410-1416, 1969.

OLIVEIRA, K. C. **Utilização de redes neurais auto-organizativas para identificação de regimes de escoamento bifásico horizontal ar-agua.** 2004. (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ONG, C. L.; THOME, J. R. Flow boiling heat transfer of R134a, R236fa and R245fa in a horizontal 1.030 mm. circular channel. **Exp. Therm. Fluid Sci.**, v. 33, p. 651-663, 2009.

REFPROP. National Institute of Standards and Technology. 2009. ver.

REVELLIN, R.; THOME, J. R. A new type of diabatic flow pattern map for boiling heat transfer in microchannels. **J. Micromech. Microeng.**, v. 17, p. 788–796, 2007.

ROUHANI, S. Z.; AXELSON, E. Calculation of void volume fractions in subcooled and quality boiling regimes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 13, p. 383–393, 1970.

ROUHANI, S. Z.; SOHEL, M. S. Two-phase flow pattern: A review of research result. **Progress in Nuclear Energy**, v. 11, p. 217-259, 1983.

SELEGHIM, P.; HERVIEU, E. An objective indicator for two-phase flow pattern transition. **Nuclear Engineering and Design**, v. 184, p. 421-435, 1998.

SELLI, M. F. **Identificação de padrões de escoamento horizontal bifásico gás-líquido através de distribuição tempo-frequência e redes neurais.** 2007. (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SEMPÉRTEGUI, D.; RIBATSKI, G. Micro-scale flow pattern classification based on the k-means clustering algorithm. In: **Proceedings of the 8th International Conference of Nanochannels, Microchannels and Minichannels**, Montreal, Canadá. 2010.

SERIZAWA, A.; FENG, Z.; KAWARA, Z. Two-phase flow in microchannels. **Exp. Therm. Fluid Sci.**, v. 23, p. 703-714, 2002.

SIMPSON, H. C.; ROONEY, D. H.; GRATTON, E.; AL-SAMARREL, F. Two-phase flow in large diameter horizontal lines. In: **European Two-Phase Flow Group Meeting**, Grenoble. 1977.

SPEDDING, P. L.; CHEN, J. J. J. A simplified method of determining flow pattern transition of two-phase flow in a horizontal pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 7, p. 729-731, 1981.

SPEDDING, P. L.; NGUYEN, V. T. Regime maps for air-water two-phase flow. **Chemical Engineering Science**, v. 35, p. 779-793, 1980.

SPEDDING, P. L.; SPENCER, D. R. Flow regimes in two-phase flow gas-liquid flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 19, p. 245-280, 1993.

STEINER, D. Heat transfer to boiling saturated liquids. In: **Verein Deutscher Ingenieure**, Dusseldorf. 1993.

SUO, M.; GRIFFITH, P. Two-phase flow in capillary tubes. **J. Basic Eng.**, v. 86, p. 576-582, 1964.

TAITEL, Y.; BARNEA, D.; DUKLER, D. Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid low in vertical tubes. **AIChE Journal** v. 26, p. 345-354, 1980.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transition in horinzontal and near horizontal gas liquid flow. **AIChE Journal**, v. 22, p. 47-55, 1976.

THOME, J. R.; RIBATSKI, G. State-of-the-art of two-phase flow and flow boiling heat transfer and pressure drop of CO2 in macro- and micro-channels. **International Journal of Refrigeration**, v. 28, p. 1149-1168, 2005.

TIBIRIÇÁ, C. B.; RIBATSKI, G. Flow boiling heat transfer of R134a and R245fa in a 2.3 mm tube **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, p. 2459-2468, 2010.

TRIPLETT, K. A.; GHIAASIAAN, S. M.; ABDEL-KHALIK, S. I.; SADOWSKI, D. L. Gas-liquid two-phase flow in microchannels Part I: two-phase flow patterns. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 25, p. 377-394, 1999.

TSOUKALAS, L. H.; ISHII, M.; MI, Y. A neurofuzzy methodology for impedance-based multiphase flow identification **Eng. Applic. Artif. Intell.**, v. 10, p. 545-555, 1997.

UEDA, T. Studies of the flow of air-water mixtures. **Bull. JSME 1(2)**, v., p. 139-145, 1958.

ULLMAN, A.; BRAUNER, N. The prediction of flow pattern maps in minichannels. In: **44th european two phase flow group meeting**, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne. 2006.

VAILLANCOURT, M. P.; HASSAN, I. G.; PEHLIVAN, K. K. Two-phase flow regime transitions in microchannels. In: **Proc. 5th International Conference on Multiphase Flow**, ICMF'04, Yokohama, Japan. 2004.

WANG, M. J.; LU, Z. Q.; FENG, J. K. Statistical identification of flow patterns and the transition for horizontal two-phase flow. v., p., 1991.

WEISMAN, J.; DUNCAN, D.; GIBSON, J.; CRAWFORD, T. Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 5, p. 437-462, 1979.

WEISMAN, J.; KANG, S. Y. Flow pattern transitions in vertical and upwardly inclined lines. **Int Journal Multiphase Flow**, v. 7, p. 271-280, 1981.

WHITE, P. D.; HUNTINGTON, R. L. Horizontal co-current two-phase flow of fluid in pipe lines. **The Petroleum Engineer**, v. 27, p. 40, 1958.

WILLIS, M. J.; MONTAGUE, G. A.; MASSIMO, C. D. Artificial neural networks in process estimation and control. **Automatica**, v. 28, p. 1181-1187, 1992.

WILMARTH, T.; ISHII, M. Two-phase flow regimes in narrow rectangular vertical and horizontal channels. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 37, p. 1749-1758, 1994.

WOJTAN, L.; URSENBACHER, T.; J.R., T. Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I – A new adiabatic two-phase flow pattern map. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, p. 2955-2969, 2004.

YAN, H.; LIU, Y.; LIU, C. T. Identification of flow regimes using back-propagation networks trained on simulated data based on a capacitance tomography sensor. **Meas. Sci. Technol.**, v. 15, p. 432-436, 2004.

YANG, C. Y.; SHIEH, C. C. Flow patten of air-water and two-phase R-134a in small circular tubes. **Int. J. Mult. Flow**, v. 27, p. 1163-1177, 2001.

YUE, J.; LUO, L.; GONTHIER, Y.; CHEN, G.; YUAN, Q. An experimental investigation of gas–liquid two-phase flow in single microchannel contactors. **Chem. Eng. Sci.** , v. 63, p. 4189–4202, 2008.

ZHAO, T. Z.; BI, Q. C. Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 27, p. 765-782, 2001.

ZOBIERI, A. **Flow pattern characterization for air-water flow by high speed visualization, optical measurement and dynamic pressure signal.** 2006. (Master degree) - École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland, 2006.

ZUBER, N.; FINDLAY, J. A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. **J. Heat Transfer**, v., p. 453-468, 1965.

APÊNDICE A - PROGRAMA DE AQUISIÇÃO

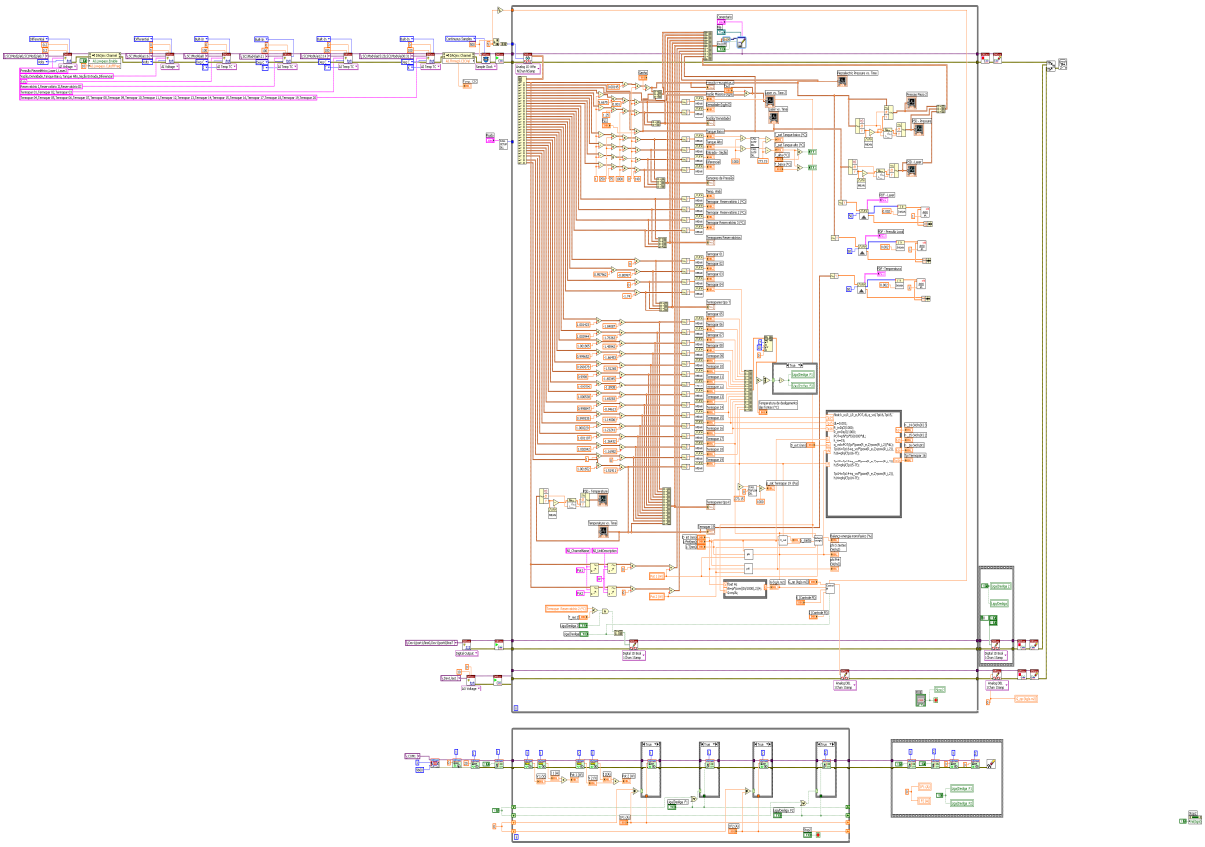


Figura A.1 - Programa em LabView para o sistema de aquisição

APÊNDICE B - IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO K-MEANS

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main(int argc, char *argv[])
{
  const Nc = 3;   // número de centróides
  const No = 80;  // número de observações
  const Nm = 3;   // número de medidas

  char saux[100];
  float Observ[80][3],Observ2[80][3];
  float Peso[3],Contador[3],Cont[3];
  int GrupoObserv[80];
  float Centroide[3][3], CentroideAnterior[3][3];
  float Distancia[3];
  float aux, Soma,Soma2,Soma3,soma4, MenorDistancia, Erro;
  FILE * pFile;
  int i, j, k, l,m,a,b,c,d,e, NPontosCluster, Menor;

// Lê as observações

  pFile = fopen ("dados.txt","r");
  for (j=-1;j<Nm;j++)
  {

    fscanf (pFile, "%s", saux);
  }
  for (i=0;i<No;i++)
  {
    for (j=-1;j<Nm;j++)
    {
      fscanf (pFile, "%f", &aux);
      if (j>=0) Observ[i][j] = aux;
    }
  //   printf("banana %.3f\n", aux);
  }

   for (m=0;m<No;m++)
    {
      printf("Observ[%d]=%.3f,%.3f, 3f\n",m,Observ[m][0],Observ[m][1],Observ[m][2]);
    }

// Posiciona randomicamente os centróides

  srand(time(NULL));
 for (k=0;k<Nm;k++)
  {
     for (j=0;j<Nc;j++)
  {
```

```
  Centroide[k][j]=(float)(rand())/RAND_MAX;  //Geraçao de Nc numero de centroides
 }
 }

// Salva centroides
 for (k=0;k<Nc;k++)
 {
  for (j=0;j<Nm;j++)
  {
   fprintf (pFile, "%.3f\t", Centroide[k][j]);
  }
  fprintf (pFile, "\n");
 }

// Define pesos

 Peso[0] = 1.0;
 Peso[1] = 1.0;
 Peso[2] = 1.0;
 Soma = Peso[0]+Peso[1]+Peso[2];
 Peso[0] = Peso[0]/Soma;
 Peso[1] = Peso[1]/Soma;
 Peso[2] = Peso[2]/Soma;

// Loop principal repetido ate os centróides convergirem para uma posição

 l = 0;
 Erro = 9999999;
  while (Erro > 0.001)
 {


  printf ("\nIteracao %d:\n",l);
  for (k=0;k<Nc;k++)
  {
   printf("Centroide[%d]=%.3f,%.3f,
%.3f\n",k,Centroide[k][0],Centroide[k][1],Centroide[k][2]);
  }

  for (i=0;i<No;i++)
  {
   MenorDistancia = 999999;
   Menor = -1;
   for (k=0;k<Nc;k++)
   {
    Soma = 0;
    for (j=0;j<Nm;j++)
    {
     Soma = Soma + Peso[j]*(Observ[i][j]-Centroide[k][j])*(Observ[i][j]-
Centroide[k][j]);
    }
    Distancia[k] = Soma; // Calcula a distancia entre a observação i e o centroide k
    printf("Dist %d-%d %.3f\t", i, k, Soma);
    if (Distancia[k] <= MenorDistancia)
    {
```

```
            MenorDistancia = Distancia[k];
            Menor = k;
          }
        }
        // Descobre a que grupo pertence a observação i

        GrupoObserv[i] = Menor;
        printf("Menor %d-%d %.2f Grupo %d\n", i, Menor, MenorDistancia, Menor);
      }

      a=0;

    for (j=0;j<Nc;j++)
     {
      for(i=0;i<No;i++)
      {
        if (GrupoObserv[i]==j)
        {
         a++;
        }
        Contador[j]=a;
      }
     }

    for (j=1;j<Nc;j++)
     {Cont[j]=Contador[j]-Contador[j-1];}
     Cont[0]=Contador[0];

   for (k=0;k<Nc;k++)
      {printf ("Cont[%d]=%.3f\n",k,Cont[k]);}

     b=0;
    for (j=0;j<Nc;j++)
    {
   if (Cont[j]==0)
     {b=b+1;}
   }

  //  }
    printf("Numero de centroides q nao tem pontos   %d\n",b);
        if (b||0)

      {
        for (k=0;k<Nm;k++)
        {
          for (j=0;j<Nc;j++)
          {
          Centroide[k][j]=(float)(rand())/RAND_MAX;      //Geraçao de Nc numero de
centroides
          }
        }

      }
       else
```

```
{

for (k=0;k<Nc;k++)    // Calcular as médias de cada medida das observações que pertencem ao centroide
{
 for (j=0;j<Nm;j++)
 {
  Soma = 0;
  NPontosCluster = 0;
  for (i=0;i<No;i++)
  {
   if (GrupoObserv[i] == k)
   {
    Soma = Soma + Observ[i][j];
    NPontosCluster++;
   }
  }
  CentroideAnterior[k][j]=Centroide[k][j];
  Centroide[k][j]=Soma/NPontosCluster;   // Substitui a medida do centroide pela média
 }
}
l++;

// Imprime centroides

for (k=0;k<Nc;k++)
{
 printf ("Centroide[%d]=%.3f, %.3f, %.3f\n",k,Centroide[k][0],Centroide[k][1],Centroide[k][2]);
}

// Salva centroides

for (k=0;k<Nc;k++)
{
 for (j=0;j<Nm;j++)
 {
  fprintf (pFile, "%.3f\t", Centroide[k][j]);
 }
 fprintf (pFile, "\n");
}

// Verificação da convergência dos centróides

Erro = 0;
for (k=0;k<Nc;k++)
{
 for (j=0;j<Nm;j++)
 {
  Erro = Erro + (Centroide[k][j] - CentroideAnterior[k][j])*(Centroide[k][j] - CentroideAnterior[k][j]);
 }
}
printf ("Erro=%.3f\n",Erro);
```

```
    system("PAUSE");
  }
}
  fclose (pFile);

  return 0;
}
```

APÊNDICE C - PROGRAMA DE CARACTERIZAÇÃO DE BOLHAS ALONGADAS

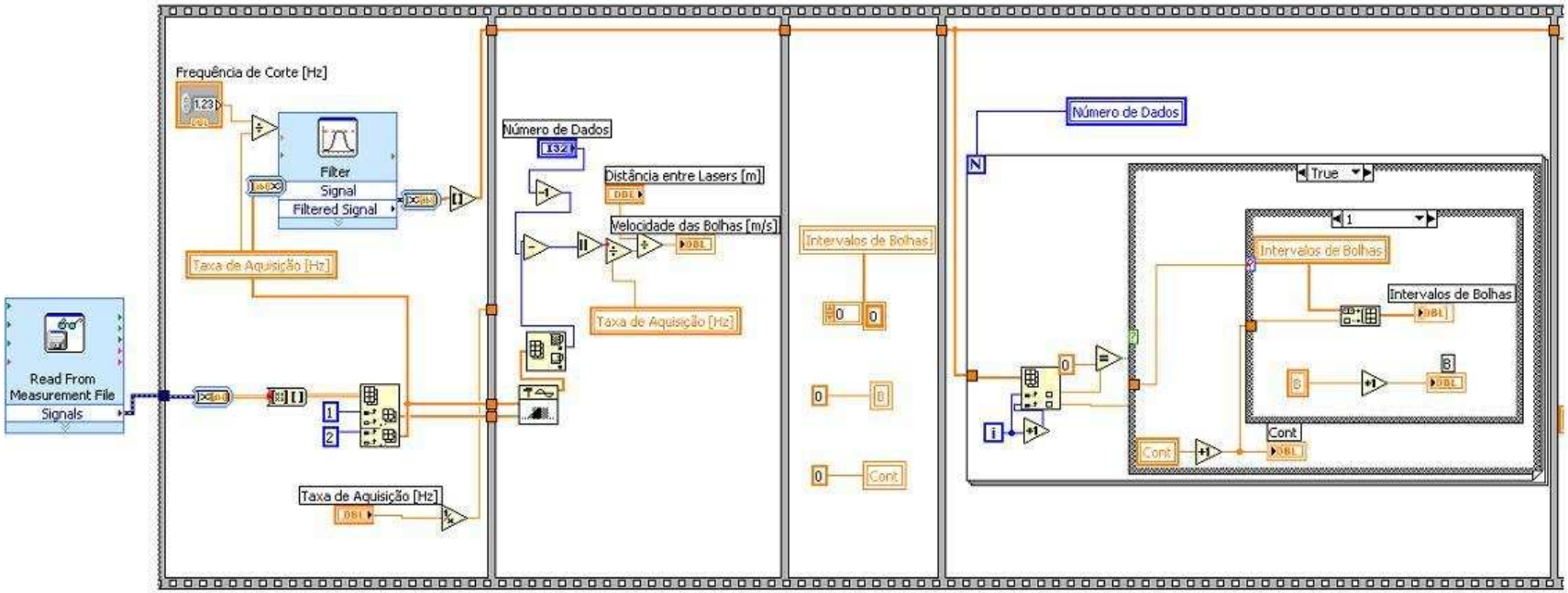


Figura C.1 - Programa em LabView para caracterização de bolhas alongadas (continua)....

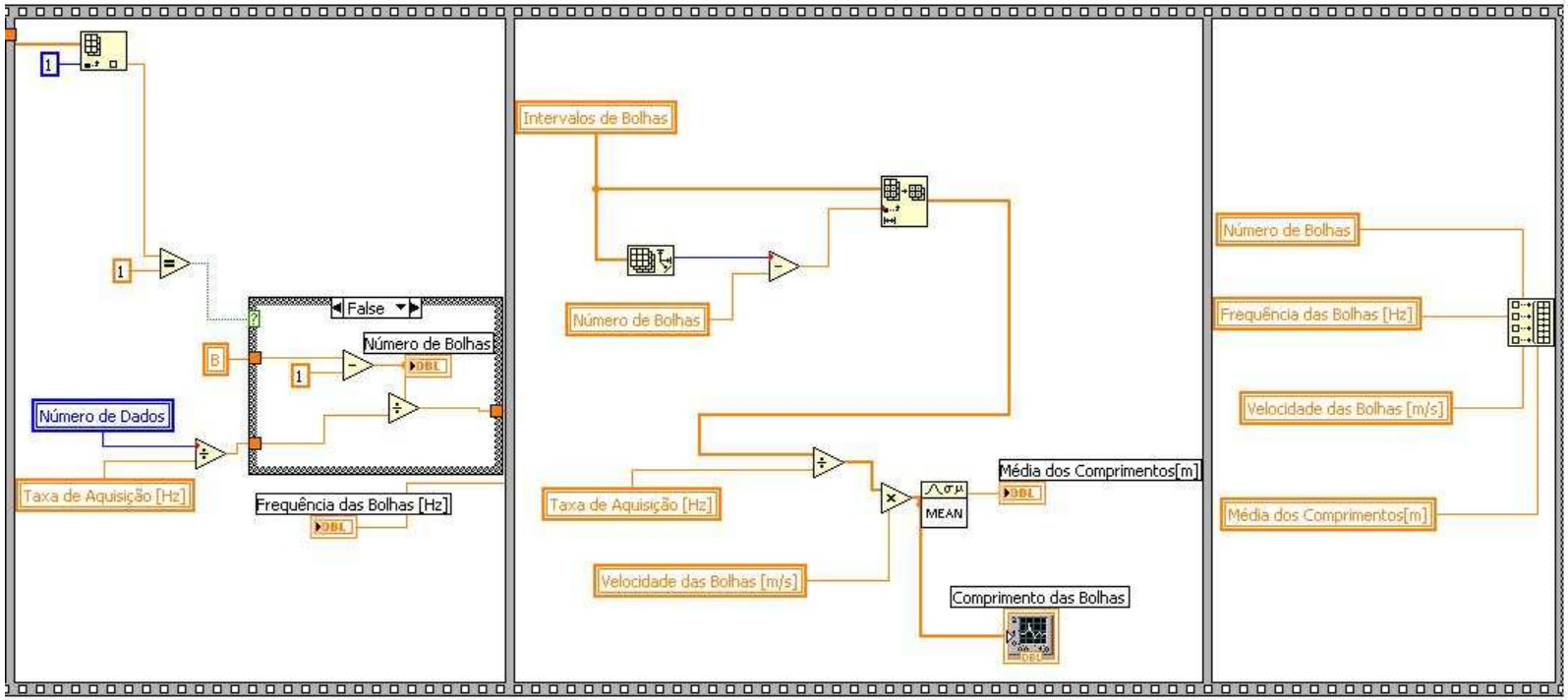


Figura C.2 - Programa em LabView para caracterização de bolhas alongadas (continuação).

APÊNDICE D - INCERTEZAS E CALIBRAÇÃO

D.1 Propagação de incertezas

Geralmente, em trabalho experimentais algumas das variáveis que se deseja determinar não são obtidas diretamente, mas através de parâmetros primários, a partir dos quais são calculadas. Estas incertezas podem ser determinadas propagando as incertezas dos resultados primários pelo método de soma quadrática dos efeitos de cada uma das variáveis proposto por Kline e McClintock apud Moffat (1988). Segundo este método, admitindo R uma função das variáveis x_1, x_2, x_3.....x_n, de forma que R = R(x_1,x_2,x_3,.....x_n) e w(x_1), w(x_2), w($_3$),.....,w(x_n) as incertezas nas variáveis independentes, a incerteza do parâmetro dependente R pode ser calculado segundo a seguinte equação:

$$\mathrm{w(R)} = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot w(x_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot w(x_2) \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} \cdot w(x_3) \right)^2 + \ldots\ldots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot w(x_n) \right)^2 \right]^{1/2} \qquad \text{(D.1)}$$

Segundo esse método o intervalo de confiança para a incerteza nos resultados é o mesmo que o da incerteza nas variáveis independentes, neste trabalho adotado como 95%.

D.2 Incerteza indicadas pelos termopares

Os termopares utilizados foram calibrados para uma faixa de temperaturas entre -30°C e 90°C, utilizando como referência termômetros de imersão de precisão, 1/20°C. No processo de calibração, inseriram-se os termopares e o termômetro em um banho termostático. Desse modo, levantou-se, para a faixa de temperatura de ensaio, as diferenças entre a temperatura medida nos termopares, determinadas através do conjunto termopar, sistema de aquisição de dados e computador pessoal, e a fornecida pelo termômetro, que foi considerada como sendo a temperatura real. Foram levantadas curvas de calibração partindo-se de -30°C ate 90°C. Após atingir a temperatura de 90°C, reduzia-se seu valor ate -30°C. As diferenças entre as temperaturas indicadas pelos

termopares e a dos termômetros foram determinadas dentro desta faixa a cada intervalo de 10°C. Seguindo este procedimento foram levantadas 5 curvas de calibração.

Com base nestes dados, a regressão linear da curva $T_{termopar}$ *vs.* $T_{termômetro}$ forneceu a seguinte relação:

$$T_{termopar} = 0,007 + 1,00 \cdot T_{termômetro} \tag{D.2}$$

Com base neste resultado adotou-se Ttermopar = Ttermômetro.

As incertezas relativas as medidas foram determinadas através do procedimento sugerido por Abernathi e Thompson (1973), resultando para um intervalo de confiança de 95% igual a ±0,16°C, aproximada a 0,2 °C.

Tal procedimento consistiu em levantar distintas curvas de calibração com a elevação gradual do parâmetro de leitura ate um Maximo seguido de sua redução ate o valor inicial. Este procedimento, segundo os autores, objetiva incorpora ao processo de determinação de incertezas efeitos de não linearidade e histerese relacionados a efetuação da medida. Com base nos resultados levantados experimentalmente determino-se o desvio padrão para cada nível do parâmetro medido, neste caso a temperatura, definido como:

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} \left(\overline{T}_j - \overline{T} \right)}{n-1}} \tag{D.3}$$

Onde,

$$\overline{T}_j = \frac{(T_{temp \cdot curva \cdot incremento} + Y_{temp \cdot curva \cdot decréscimo})}{2} \tag{D.4}$$

E “n” é o numero de calibrações levantadas e $\overline{T}$ a media aritmética de todas as temperaturas medidas naquele nível de temperatura.

O desvio padrão total foi determinado por:

$$s = i\sqrt{\sum_{i=1}^{k} s_i^{\,2}} \tag{D.5}$$

Onde k é o número de níveis de temperatura.

O número de graus de liberdade para determinação do valor do *t de Student* foi obtido segundo o método de Welch Satterwaite, através da seguinte equação:

$$gl = \frac{\left(\sum_{i=1}^{k} s_i^{\,2}\right)^2}{\sum_{i=1}^{k} \frac{s_i^{\,4}}{gl_i}} \qquad \text{(D.6)}$$

Onde gl é o numero de graus de liberdade para cada nível de temperatura.

Finalmente, conhecendo-se o numero de graus de liberdade total, determina-se o valor de *t de Student* obtendo-se a incerteza total na medida da temperatura com um intervalo de confiança dada por $t_{95}\, s$.