

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL – CPGEI**

EDUARDO NUNES DOS SANTOS

**TÉCNICAS PARA EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE
ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM REGIME INTERMITENTE
UTILIZANDO O SENSOR *WIRE-MESH***

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
2011**

EDUARDO NUNES DOS SANTOS

**TÉCNICAS PARA EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE
ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM REGIME INTERMITENTE
UTILIZANDO O SENSOR *WIRE-MESH***

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Marco José da Silva, Dr.

CURITIBA
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S237 Santos, Eduardo Nunes dos
Técnicas para extração de parâmetros de escoamentos bifásicos em regime intermitente utilizando o sensor *wire-mesh* / Eduardo Nunes dos Santos.— 2011.
120 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Marco José da Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2011.
Bibliografia: f. 101-106.

1. Escoamento bifásico. 2. Gás – Escoamento. 3. Malha de eletrodos. 4. Processamento de imagens. 5. Segmentação de imagens. 6. 3D Studio (Programa de computador) 7. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Silva, Marco José da, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

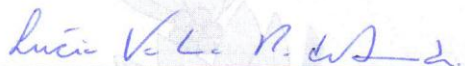
Título da Dissertação Nº 567:

**“Técnicas para Extração de Parâmetros de
Escoamentos Bifásicos em Regime Intermitente
Utilizando o Sensor Wire-Mesh”**

por

Eduardo Nunes dos Santos

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba, às 9h do dia 12 de agosto de 2011. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:



Prof^a. Lúcia Valéria Ramos de Arruda, Dr.
(Presidente – UTFPR)



Prof. Erick de Moraes Franklin, Dr.
(UNIFEI)



Prof. Marco José da Silva, Dr.
(UTFPR)



Prof. Carlos Eduardo Ferrante do Amaral, Dr.
(UTFPR)

Visto da Coordenação:



Prof. Fábio Kurt Schneider, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Edison e Mariza;
E a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao meu orientador Dr. Marco José da Silva, pela orientação, por sua competência, dedicação e amizade que foram importantes para o êxito do meu trabalho.

Aos meus pais, Edison e Mariza, pelo incentivo em todos os momentos de minha vida.

Ao meu irmão, Vinícius, por todo apoio e companheirismo.

Ao prof. Dr. Carlos Ferrante do Amaral pela sua amizade e contribuição em parte do trabalho experimental.

Aos amigos e colegas de Laboratório de Ciências Térmicas pela ajuda direta ou indireta na realização deste trabalho e pela amizade: Tiago Vendruscolo, Reinaldo Sérgio G. Justiniano, Nikolas Libert, Leonardo Lipinski e Óliver Bendjamin.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela bolsa concedida durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho

RESUMO

DOS SANTOS, E. N. **Técnicas para Extração de Parâmetros de Escoamentos Bifásicos em Regime Intermitente Utilizando o Sensor *Wire-Mesh***. 2011. 120p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Curitiba, 2011.

Escoamentos bifásicos gás-líquido ocorrem em diversas atividades industriais, como, por exemplo, na exploração e produção de petróleo onde gás e óleo escoam simultaneamente em uma tubulação. Em muitas situações, as condições de eficiência e segurança dos equipamentos e processos onde ocorrem são influenciadas por este tipo de escoamento. Desta forma, extrair características e parâmetros destes padrões a partir de observações e medições experimentais é de grande importância, permitindo o estudo dos fenômenos e, podendo ser utilizada na otimização dos processos envolvidos. Em especial, neste trabalho focou-se no escoamento bifásico em regime intermitente o qual é comumente encontrado na indústria e ainda necessita de investigação. Foi utilizada a técnica conhecida como sensor de malha de eletrodos (*wire-mesh*) de configuração 8×8 eletrodos a qual produz imagens da distribuição das fases na seção transversal de uma tubulação. Com base nos dados brutos do sensor foram desenvolvidas diferentes técnicas de visualização e processamento dos dados, a fim de extrair características e parâmetros do escoamento intermitente. As técnicas desenvolvidas basearam-se em métodos de processamento de imagens como segmentação e filtragem. Foram realizados testes experimentais com escoamento em uma linha de testes horizontal com 9,2 m de comprimento de 26 mm de diâmetro interno, onde escoamento com diversas condições operacionais foram gerados e analisados. As técnicas desenvolvidas foram validadas através de comparações com filmagem em alta velocidade e com modelos mecânicos empíricos disponíveis na literatura, apresentando boa concordância com valores de referência. A principal contribuição do trabalho é a disponibilização de um *software* para visualização e processamento de dados do sensor *wire-mesh*, o qual pode ser utilizado para estudos posteriores de escoamentos bifásicos.

Palavras-chave: instrumentação avançada, escoamento bifásico, sensor *wire-mesh*, processamento de imagens, segmentação 3d.

ABSTRACT

DOS SANTOS, E. N. **Techniques for Parameter Extraction of Intermittent Two-Phase Flow Using Wire-Mesh Sensor**. 2011. 120p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Curitiba, 2011.

Gas-liquid two-phase flows occur in different industrial activities, such as in oil production and exploration where gas and oil flow simultaneously in pipe. Two-phase flow determines in many situations the conditions of efficiency and safety of equipment and processes where they occur. Thus, extracting the flow characteristics and parameters from observations and experimental measurements is of great importance, allowing the study of phenomena and therefore leading to the optimization of the processes involved. In particular, this work focused on the two-phase flow under intermittent flow regime which is commonly found in the industry and still needs investigation. A flow measurement technique known as wire-mesh sensor was applied with 8×8 electrodes configuration which produces images of the distribution of phases in the pipe cross section. Based on raw data from the sensor different visualization and data processing techniques were developed in order to extract features and parameters of intermittent flow. The techniques developed were based on methods of image processing such as segmentation and filtering. Experiments were performed in a horizontal experimental test facility with 9.2 m length of 26 mm inner diameter, whereby several operating conditions were generated and analyzed. The techniques developed have been validated through comparisons with high-speed camera and empirical mechanistic models available in the literature showing good agreement with reference values. The main contribution of this work is the development of a software for visualization and processing of wire-mesh sensor data, which may be employed for further two-phase flow studies.

Keywords: advanced instrumentation, two-phase flow, wire-mesh sensor, image processing, 3D Segmentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2 – Padrões de Escoamento em tubulações verticais. Adaptado de Shoham (2006) .	21
Figura 2.3 – Padrões de escoamento em tubulações horizontais. Adaptado de Shoham (2006)	22
Figura 2.4 – Mapa de fluxo para escoamentos em tubulações horizontais (Mandhane et al. 1974).....	24
Figura 2.5 – Representação da célula unitária.....	25
Figura 2.6 – Comparação dos mapas de fluxo Taitel e Dukler (1976), linha contínua e Mandhane et al. (1974) linha tracejada	26
Figura 2.7 – Ilustração dos padrões de escoamento intermitentes, bolhas alongadas e golfadas (Ghajar, 2005)	26
Figura 2.8 – Reconstrução da bolha de Taylor através da união dos <i>frames</i>	34
Figura 2.9 – Representação da medida da altura média da bolha após um pré-processamento da imagem	34
Figura 2.10 – Determinação da área do semicírculo da seção transversal da bolha.....	34
Figura 2.11 – Ilustração da área semicircular para o método de aproximação	35
Figura 2.12 – Dois sensores <i>wire-mesh</i> apresentados em perspectiva	37
Figura 2.13 – Ilustração interna do sensor <i>wire-mesh</i> apresentado os seus componentes	38
Figura 2.14 – Corte axial apresentando a separação entre os planos emissor e transmissor do sensor.....	38
Figura 2.15 – Circuito de medição equivalente para a medição de capacitância (Da Silva, 2008).....	40
Figura 2.16 – Representação do pixel em uma matriz onde x e y correspondem às coordenadas espaciais	43
Figura 2.17 – Vizinhança de um pixel.....	43
Figura 2.18 – Vizinhanças para imagens 2D do tipo: (a) vizinhança-D4, (b) vizinhança-D8 .	44
Figura 2.19 – Vizinhanças para imagens 3D do tipo: (a) vizinhança-D26, (b) vizinhança-D644	44
Figura 2.20 – (a) Imagem original corrompida com ruído tipo sal e pimenta; (b) Imagem recuperada por um filtro passa baixa.....	46
Figura 2.21 – Máscaras de filtros passa-baixa de tamanhos variados	46
Figura 2.22 – (a) Imagem original corrompida com ruído tipo sal e pimenta; (b) Imagem recuperada utilizando um filtro passa alta.....	47
Figura 2.23 – Máscara para filtro passa-alta 3x3.....	47
Figura 2.24 – Exemplo de aplicação de máscara de mediana 5x5 (a) Imagem original; (b) Imagem com iteração do filtro da mediana	48
Figura 2.25 – Exemplo de histograma em níveis de cinza (a) Imagem original; (b) Histograma da imagem	49
Figura 2.26 – Exemplo de imagem binarizada dado um <i>threshold</i> (a) imagem original; (b) limiar de corte; (c) imagem limiarizada	49
Figura 2.27 – (A) Imagem Original; (B) Exemplo de segmentação, destacando os objetos na imagem (Peccini, G e Ornellas, 2005)	51
Figura 2.28 – Gráfico de um histograma com seu limiar de corte no processo de segmentação por limiarização.....	52
Figura 2.29 – Exemplo de crescimento de regiões (a) imagem original; (b) segmentação utilizando uma diferença absoluta entre os vizinhos menor do que 4; (c) segmentação utilizando uma diferença absoluta menor do que 8	53
Figura 2.30 – Exemplo de divisão e fusão de regiões com 6 regiões.....	54

Figura 2.31 – Segmentação por divisor de águas, na qual a imersão é realizada a partir de mínimos regionais localizados na base das bacias	55
Figura 3.1 – (a) Ilustração da matriz M contendo os valores de fração de vazio; (b) Definição de coordenadas espaciais.....	57
Figura 3.2 – (a) Paleta de cores; (b) corte axial-x vista lateral da vista lateral; (c) cortes transversais do escoamento.	58
Figura 3.3 – (a) <i>Frame</i> com informações originais, (b) <i>frame</i> limiarizado com 50% de fração de vazio	59
Figura 3.4 – Máscara do sensor <i>wire-mesh</i> 8×8.....	60
Figura 3.5 – Identificação da bolha, analisando o valor do <i>voxel</i> $i=2$ e $j=0$, insere-se um identificador na matriz IM para frações de vazio maiores que 60% (cor em vermelho representa o gás e em azul a fase líquida)	60
Figura 3.6 – Representação da vizinhança do <i>voxel</i> $i=2$ e $j=0$ em análise	61
Figura 3.7 – Representação dos vizinhos do <i>voxel</i> $i=3$ e $j=0$ em espera devido ao fator de recursividade do algoritmo.....	61
Figura 3.8 – Recursividade dos <i>voxels</i> em vários níveis	62
Figura 3.9 – Ilustração da identificação de bolhas (pseudo visualização em 2D); (a) início da segmentação; (b) detecção da primeira bolha; (c) detecção da segunda bolha ...	63
Figura 3.10 – Representação das bolhas detectadas no espaço tridimensional e nomeadas pelo processo de segmentação	64
Figura 3.11 – Pseudo código para a identificação de bolhas.....	65
Figura 3.12 – Ilustração dos campos de medição pelo sensor <i>wire-mesh</i> Soares (2010).....	66
Figura 3.13 – Matriz de coeficientes para a correção da fração de vazio.....	67
Figura 3.14 – Detecção de uma bolha pelos dois sensores através de um método de correlação	68
Figura 3.15 – Ilustração dos vetores de velocidade no nariz e cauda da bolha.....	69
Figura 3.16 – Componentes das dimensões da célula unitária.....	71
Figura 3.17 – Representação do pistão da célula unitária	73
Figura 4.1 – Circuito experimental de escoamentos bifásicos do Laboratório de Ciências Térmicas da UTFPR.....	76
Figura 4.2 – Sistema de injeção de volume de gás controlado.....	77
Figura 4.3 – <i>Software</i> de Instrumentação desenvolvido em LabView para a visualização de parâmetros como velocidades superficiais e pressões em tempo real.....	78
Figura 4.4 - Sistema de aquisição de dados do sensor <i>wire-mesh</i>	79
Figura 4.5 – <i>Software</i> V_File_Generator V1.0 desenvolvido para a calibração das leituras ...	80
Figura 4.6 – (a) Representação vetorial do arquivo .V; (b) Representação do arquivo .V de forma espacial na matriz de dados $M(i, j, k)$	80
Figura 4.7 – Seção de filmagem de vídeo com a câmera de alta velocidade, a caixa de acrílico, o difusor, a matriz de LEDs	81
Figura 4.8 – Grade de experimentos localizados no mapa de fluxo para escoamentos horizontais em tubulações de 0,026m de diâmetro	83
Figura 5.1 – Reconstrução do escoamento bifásico a partir do sensor <i>wire-mesh</i> e da câmera de alta velocidade	84
Figura 5.2 – Análise de volume de gás calculado para o sensor <i>wire-mesh</i> e a câmera de alta velocidade.....	85
Figura 5.3 – Padrões de escoamento investigados na validação visual.....	86
Figura 5.4 – Visão axial do tubo, com a representação das coordenadas i, j	87
Figura 5.5 – Representação tridimensional do escoamento em golfadas em vários níveis.....	87
Figura 5.6 – Variação da fração de vazio média	90
Figura 5.7 – Valores resultantes das séries temporais	91

Figura 5.8 – Fração média de líquido no pistão	92
Figura 5.9 – Comparação dos resultados de frequência da célula unitária.....	93
Figura 5.10 – Aeramento no pistão de líquido para escoamentos em golfadas com alta velocidade superficial de gás.....	94
Figura 5.11 – Comparação da velocidade de translação (frontal) da bolha	95
Figura 5.12 – Análise do comprimento de bolha WMS x Câmera	96
Figura 5.13 – Análise do comprimento do pistão WMS x Câmera.....	97
Figura 5.14 – Relação comprimento do pistão x comprimento célula unitária – Fator de intermitência.....	97
Figura 5.15 – Comparativo da velocidade superficial do gás calculada pelo algoritmo proposto	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação de algumas técnicas de medição para escoamentos bifásicos gás-líquido.....	36
Tabela 4.1 – Volume inicial e volume corrigido para o experimento de validação do algoritmo	82
Tabela 5.1 – Comparação da reconstrução das imagens realizadas pelo <i>software</i> com os dados de videometria	86
Tabela 5.2 – Comparação da reconstrução das imagens realizadas pelo <i>software</i> para o regime intermitente.....	88
Tabela 5.3 – Reconstruções laterais e superiores do escoamento em golfadas pelos índices espaciais i, j	89

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
C	Coeficientes de atrito
C_0	Constante da velocidade da bolha
C_x	Capacitância medida no cruzamento
C_f	Capacitância da malha de realimentação
d	Diâmetro do tubo
D_{PB}	Distância do <i>pixel</i> bolha
D_{PS}	Distância do <i>pixel</i> do pistão
D_s	Distância dos sensores
f_s	Frequência
f_B	Frequência de passagem de bolhas
Fr	Número de Froude
g	Aceleração da gravidade
h	Altura da coluna de gás
HP	Horse power
i, j, k	Índices espaciais
IM	Matriz de identificação
j	Velocidade da mistura
j_G	Velocidade superficial do gás
j_L	Velocidade superficial do líquido
K_{F1}	Posição inicial da bolha 1
K_{F2}	Posição inicial da bolha 2
K_{R1}	Posição final da bolha 1
K_{R2}	Posição final da bolha 2
L_B	Comprimento da bolha
L_S	Comprimento do pistão
M	Matriz de dados
N	Número de <i>frames</i>
n_B	Comprimento da bolha em <i>pixels</i>
n_S	Comprimento do pistão em <i>pixels</i>
P	<i>Pixel</i>
P	Pressão
Q	Vazão
R_f	Resistor da malha de realimentação
R_{LS}	<i>Hold-up</i> de líquido
T	Período
U_B	Velocidade da bolha
U_{BF}	Velocidade translação (frontal) da bolha
U_{BR}	Velocidade traseira da bolha
U_D	Velocidade de arrasto
U_{LS}	Velocidade do pistão
U_M	Velocidade da mistura
V	Tensão elétrica
V	Volume
V_0	Tensão de saída
V_H	Matriz de referência para tubo cheio
V_L	Matriz de referência para tubo vazio

V_{log}	Tensão de saída do amplificador logaritmo
V_B	Volume de gás na seção de bolha
V_S	Volume de gás no pistão
V_T	Volume total
x, y, z	Coordenadas espaciais
α	Fração de gás ou fração de vazio
β	Fator de intermitência
ε	Permissividade elétrica
μ_G	Viscosidade do gás
μ_L	Viscosidade do líquido
ΔZ_B	Comprimento do voxel para bolhas de Taylor
ΔZ_S	Comprimento do voxel para bolhas dispersas no pistão de líquido
ΔK_B	Distância de atraso da bolha
ΔK_S	Distância de atraso do pistão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 MOTIVAÇÃO.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO	18
2.1.1 Definições	18
2.1.2 Padrões de escoamento bifásico gás-líquido	20
2.1.3 Mapas de fluxo	23
2.2 REGIMES INTERMITENTES	25
2.2.1 Definição.....	25
2.2.2 Parâmetros e modelos	27
2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO	30
2.3.1 Técnicas tomográficas	30
2.3.2 Câmera de alta velocidade	32
2.3.3 Comparação das técnicas	36
2.4 SENSOR WIRE-MESH	37
2.4.1 Descrição da técnica	37
2.4.2 Processamento de dados	39
2.5 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS	42
2.5.1 Definições	42
2.5.2 Filtragem.....	44
2.5.3 Histograma da imagem	48
2.5.4 <i>Threshold</i> ou Limiar	49
2.6 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS	50
2.6.1 Limiarização	51
2.6.2 Segmentação baseada em bordas	52
2.6.3 Segmentação baseada em regiões	53
3 DESENVOLVIMENTO.....	57
3.1 DADOS DE ENTRADA.....	57
3.2 ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DE BOLHAS	58
3.2.1 Número de bolhas	66
3.2.2 Série Temporal.....	66
3.2.3 Velocidade da frente da bolha (m/s).....	67
3.2.4 Comprimento da bolha e pistão	69
3.2.5 Frequência de passagem de bolhas	71
3.2.6 Volume	71
3.2.7 Vazão de gás	72
3.2.8 Fração de vazio média do escoamento	73
3.2.9 Fração de vazio média no pistão de líquido.....	73
3.2.10 Fator de intermitência	74
4 TESTES EXPERIMENTAIS.....	75
4.1 PLANTA EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO	75
4.2 CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES	80
4.3 ANÁLISE POR VOLUME CONTROLADO	81
4.4 ESCOAMENTO BIFÁSICO	82
5 RESULTADOS	84
5.1 ANÁLISE POR VOLUME CONTROLADO	84

5.1.1	Visualização.....	84
5.1.2	Volume	84
5.2	ESCOAMENTO BIFÁSICO	85
5.2.1	Validação Visual.....	85
5.2.2	Fração de vazio média	90
5.2.3	Fração de líquido no pistão média	91
5.2.4	Frequência da célula unitária	92
5.2.5	Análise de velocidade	93
5.2.6	Dimensões.....	95
5.2.7	Velocidade superficial do gás	98
6	CONCLUSÃO.....	99
	REFERÊNCIAS	101
	APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DO CIRCUITO EXPERIMENTAL	107
	APÊNDICE B – MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE WMA – WIRE-MESH ANALYSER	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O escoamento bifásico é caracterizado pela passagem simultânea de duas fases de uma ou duas substâncias. Escoamentos bifásicos ocorrem na natureza e em diversas atividades industriais como, na exploração e produção de petróleo, onde gás e óleo e água escoam simultaneamente em uma tubulação, ou na produção de energia nuclear, onde vazões de água-vapor d'água ocorrem nos circuitos de reatores. Escoamentos bifásicos do tipo gás-líquido são os mais comumente encontrados nas aplicações industriais. Neste caso, diferentes padrões podem ser formados, dependendo das propriedades dos fluidos, da relação de vazão de cada uma das fases, da geometria e inclinação do duto. Essas distribuições geométricas das fases no escoamento são chamadas de padrões de escoamento ou regimes de escoamento. Em muitos casos o tipo de escoamento determina a eficiência e segurança dos processos e equipamentos onde ocorrem. Portanto, a medição experimental de parâmetros do escoamento, como velocidade e distribuição de fases ao longo da tubulação juntamente com a monitoração online são de grande importância para o controle e otimização de processos e projeto de equipamentos. Além disto, investigações experimentais de escoamento bifásicos permitem auxiliar no desenvolvimento de modelos teóricos, na validação de predições realizadas por simulações, ampliando o entendimento do fenômeno.

Diversas técnicas experimentais foram propostas no passado, algumas de simples monitoração, como sensores do tipo agulha (*needle probes*) para medição localizada do indicador de fase. Sensores capacitivos ou condutivos (ECT, ERT) foram utilizadas para medição da fração volumétrica de gás. O uso de técnicas ópticas, tais como medida da velocidade baseadas a laser PIV, LDA, PDA e câmeras de alta velocidade não são aplicáveis para escoamentos onde as fases tem uma característica opaca ou existam misturas com fração volumétrica de gás elevada. Além disso, estas técnicas necessitam de um acesso óptico ao escoamento, ou seja, o uso de tubulações transparentes é imperativo, não sendo o caso da maioria das aplicações industriais. O uso de técnicas avançadas de visualização não invasivas é de grande interesse. Técnicas baseadas em tomografia possibilitam a visualização de distribuições das frações das fases, como tomógrafos baseados em raios-x, raios gama, PET ou ressonância magnética. Porém, estes métodos apresentam desvantagens por não oferecer uma resolução temporal suficiente para visualização de escoamentos bifásicos devido à necessidade de movimentação mecânica, além de terem um alto custo, Devido a estas

características, optou-se por utilizar o sensor de malha de eletrodos (*Wire-Mesh Sensor*). Inicialmente proposto para visualização de escoamentos bifásicos, o sensor realiza o imageamento tomográfico de seção transversal a partir de uma malha de fios. Com a passagem do escoamento através do sensor, o mapeamento das fases é realizado de forma intrusiva com alta resolução temporal e espacial. Seu princípio de funcionamento consiste em captar diferenças de permissividade elétrica existentes em cada fluido.

Apesar do método da malha de eletrodos não necessitar de um algoritmo complexo para a reconstrução das imagens, ainda é preciso modificar os dados brutos para extração dos parâmetros de interesse a fim de normalizar os dados. Por se tratar de um sensor que utiliza uma tecnologia tomográfica, permitindo gerar imagens a partir de seus dados, decidiu-se utilizar técnicas de processamento de imagens para os dados. Ao contrário do tratamento de imagens, que se preocupa somente na manipulação de figuras para sua representação final, o processamento de imagens é uma técnica que proporciona analisar a representação gráfica como um conjunto de dados. Desta forma realizam-se operações sobre a imagem, que envolvem a detecção e reconhecimento de elementos ou características de interesse.

O padrão de escoamento intermitente ocorre em grandes faixas de vazão de líquido e gás, seu entendimento é de suma importância nas atividades industriais. Em atividades de extração e exploração de petróleo é o padrão mais comum encontrado, onde é caracterizado pela intermitência de seu pistão de líquido e bolha alongada. Desta forma, analisar as informações adquiridas pelo sensor *wire-mesh* utilizando técnicas de processamento de imagens a fim de identificar as bolhas permite extrair características do escoamento. Com base na série temporal, que descreve a fração de vazão média na seção transversal ao longo do tempo, podem-se extrair outros parâmetros, como comprimento da bolha, fração de gás no pistão de líquido, velocidade, vazão de gás, entre outros. Esses parâmetros são de fundamental importância no estudo de escoamentos bifásicos uma vez que possui papel importante na transferência de massa, quantidade de movimento e energia entre as fases da mistura.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de métodos computacionais baseado em imagens para a extração de parâmetros de escoamentos bifásicos gás-líquido em tubulações a partir de informações geradas pela técnica *wire-mesh*. Como tais padrões de escoamento podem ocorrer nas mais variadas topologias, decidiu-se por concentrar este estudo no padrão intermitente (golfadas, bolhas alongadas). Durante o desenvolvimento do sistema foi primeiramente realizada uma revisão das técnicas de medição e processamento de

imagens, assim como definição dos parâmetros de interesse no estudo de escoamentos bifásicos. A presente dissertação visa contribuir com o desenvolvimento de um *software* de visualização e com a implementação de um algoritmo capaz de identificar as bolhas no escoamento, possibilitando a extração de parâmetros físicos de escoamentos. Para a validação do algoritmo e técnica realizou-se experimentos com escoamentos bifásicos, cujos resultados foram analisados com modelos apresentados na literatura. Os testes foram realizados com a infraestrutura do Laboratório de Ciências Térmicas – LACIT da UTFPR, instrumentado para fornecer escoamento do tipo gás-líquido em uma tubulação com 26 mm de diâmetro e 9,2 m de comprimento na seção de testes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO

2.1.1 Definições

Escoamento bifásico gás-líquido consiste no escoamento simultâneo de gás e líquido em uma tubulação. Neste tipo de escoamento a interface entre as fases gás e líquido pode adquirir diversas formas, influenciando a distribuição geométrica das fases dentro do duto, e, conseqüentemente, as taxas de transferência de massa, quantidade de movimento e energia entre elas. As diferentes configurações que a interface entre as duas fases pode assumir tornam a compreensão dos fenômenos que governam o escoamento bifásico mais difícil do que em um escoamento monofásico (Brennen, 2005). Os escoamentos bifásicos gás-líquido estão presentes em uma grande gama de aplicações da engenharia, dentre elas podem-se citar as indústrias petrolífera, química, nuclear, espacial e geotérmica. Ao estudarem-se escoamentos bifásicos é necessário realizar uma breve descrição de algumas variáveis, parâmetros e conceitos envolvidos.

a) Fração de vazio.

É a razão entre a área transversal ocupada pela fase gás A_{gas} e área transversal da tubulação A_{total} , ocupada pelas duas fases, podendo indicar a fração de gás ou a fração de líquido que se encontra no escoamento através da área transversal. É um dos principais parâmetros na investigação experimental de escoamentos bifásicos gás-líquido.

$$\alpha_G = \frac{A_{gas}}{A_{total}} \quad (2.1.)$$

$$A_{total} = A_{gas} + A_{liquido} \quad (2.2.)$$

Da mesma forma, é possível definir a fração de líquido, e a soma de ambas as frações são unitárias (eq. 2.4).

$$\bar{\alpha}_L = \frac{A_{\text{liquido}}}{A_{\text{total}}} \quad (2.3.)$$

$$\alpha_L + \alpha_G = 1 \quad (2.4.)$$

b) Fração de líquido no pistão

Na modelagem matemática do escoamento bifásico é comum o uso de informações sobre o aeramento dos pistões de líquido, e ao invés da fração de vazio, normalmente é utilizada a fração média de líquido no pistão

$$\bar{R}_{LS} = (1 - \bar{\alpha}_S) \cdot 100\% \quad (2.5.)$$

onde, α_S é a fração de gás no pistão de líquido.

c) Velocidade superficial e velocidade da mistura

A velocidade superficial é uma variável muito importante para a investigação de escoamentos bifásicos gás-líquido, pois está presente em muitas das equações e modelagens do escoamento bifásico. Representada por j , a velocidade está diretamente relacionada com a vazão volumétrica Q dividida pela área da seção transversal da tubulação A . Para cálculo dessa variável, admite-se que apenas uma das fases está escoando através da seção transversal total da tubulação.

$$j_G = \frac{Q_{\text{gas}}}{A_{\text{total}}} \quad (2.6.)$$

De forma análoga:

$$j_L = \frac{Q_{\text{liquido}}}{A_{\text{total}}} \quad (2.7.)$$

A velocidade da mistura é definida como a soma das velocidades superficial de cada fase, ou o fluxo volumétrico total por unidade de área.

$$j = \frac{Q_{total}}{A_{total}} \quad (2.8.)$$

$$j = j_l + j_g \quad (2.9.)$$

2.1.2 Padrões de escoamento bifásico gás-líquido

As diversas distribuições geométricas e forma das fases ao longo do escoamento bifásico são chamadas de padrões de escoamento ou regimes de escoamento. Escoamentos contendo mais de uma fase são mais complexos que aqueles onde escoam somente uma, pois a distribuição espacial das fases muitas vezes é desconhecida dificultando a medição de parâmetros quantitativos. A partir da década de 40, alguns pesquisadores classificaram algumas distribuições de escoamentos bifásicos baseados em análises empíricas e dados qualitativos. De um modo geral, eles são classificados como estratificado, intermitente ou disperso. Porém, a identificação desses padrões ainda apresenta divergências perante sua complexidade de classificação. Alguns pesquisadores abordam esses padrões de forma mais sintética adotando poucos padrões e simplificando os fenômenos. Este tipo de análise por observação é o fator que gera essa variedade de classificação.

O comportamento e a forma das interfaces entre as fases de mistura bifásica são conhecidos como regime de fluxo ou padrão de fluxo. Existem forças concorrentes ou mecanismos que ocorrem dentro do fluido, ao mesmo tempo. Segundo Falcone et al. (2009), o equilíbrio entre essas forças determina o padrão de fluxo. Há vários fatores que determinam o padrão de fluxo bifásico:

- Propriedade das fases, fração e velocidade.
- Temperatura e pressão.
- Diâmetro da tubulação por onde escoam, forma, inclinação e rugosidade.
- Presença de qualquer protuberância normal ao tubo (por exemplo, curvas, válvulas, junções em T).
- Tipos de fluxo: estacionário, pseudo-estacionário ou transiente.

a) Escoamento em dutos verticais

Para escoamentos em dutos verticais podem ser observados os padrões (bolhas, golfadas, agitado, anular, disperso) ilustrados na Figura 2.1.

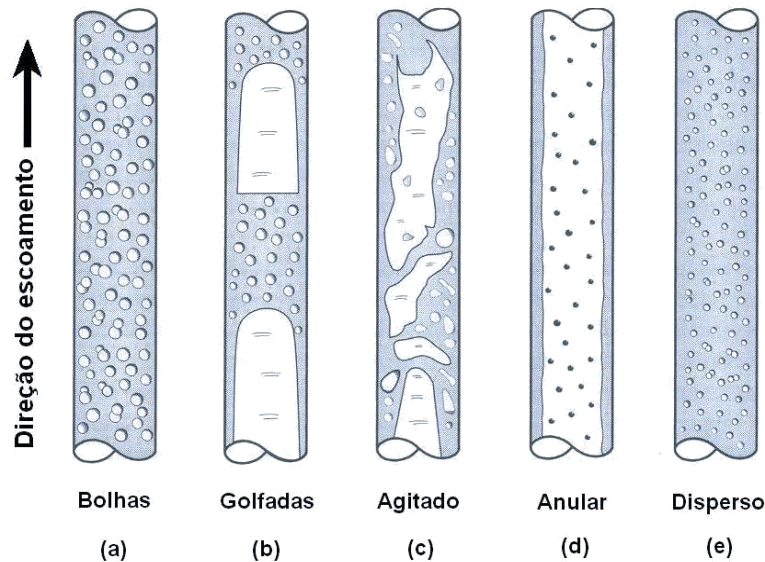


Figura 2.1 – Padrões de Escoamento em tubulações verticais. Adaptado de Shoham (2006)

- Escoamento em bolhas (*Bubble Flow*)

A fase gasosa é dispersa em pequenas bolhas discretas, estas escoam com movimento em zig-zag para cima. A distribuição dessas bolhas é homogênea e ocorre geralmente em baixas vazões de líquido, resultando em valores altos de *hold-up* de líquido.

- Escoamento em golfadas (*Slug Flow*)

É um padrão caracterizado pelo surgimento de grandes bolhas, geralmente simétricas no eixo da tubulação ou também em algumas vezes tendem a se aproximar de uma das paredes e a oscilar, descrevendo um movimento helicoidal. Em seu redor escoam de cima para baixo um filme de líquido. Grande parte da fração de gás está concentrada em bolhas conhecidas como bolhas de Taylor, que se deslocam em um regime intermitente e são seguidas por pistões de líquido.

- Escoamento agitado (*Churn flow*)

Esse padrão é caracterizado pelo movimento oscilatório da fase líquida. É similar ao escoamento em golfadas, porém mais caótico. As bolhas ao quebrarem, caem e se fundem com a seguinte.

- Escoamento anular (*Annular Flow*)

O padrão anular é observado quando ocorre elevada vazão de fase gasosa. O escoamento de gás se acumula na região central, enquanto escoam nas paredes um filme líquido com uma pequena ondulação na interface.

- Escoamento disperso (*Dispersed Bubble Flow*)

Quando a vazão de ambas as fases é elevada, surge o padrão, que é semelhante tanto para tubulações verticais quanto para horizontais. É identificado pela presença de bolhas discretas carregadas pelo meio líquido.

b) Escoamento em dutos horizontais

Os padrões existentes e mais comuns para a configuração horizontal podem ser classificados como (estratificado, estratificado ondulado, golfadas, anular, disperso) ilustrados na Figura 2.2

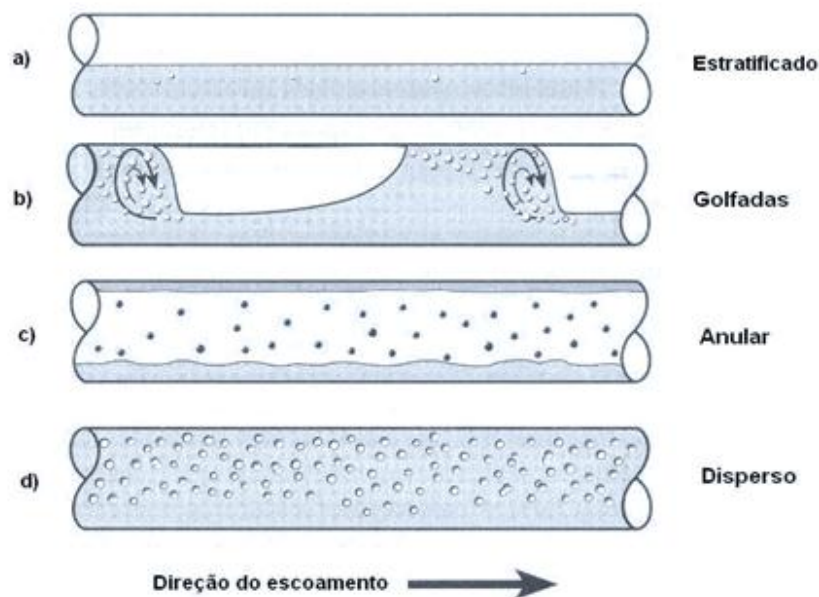


Figura 2.2 – Padrões de escoamento em tubulações horizontais. Adaptado de Shoham (2006)

- Escoamento estratificado (*Bubble Flow*)

Este escoamento ocorre onde as vazões relativas entre as fases são baixas. Sua principal característica é observada na ação da força gravitacional onde ocorre a separação das fases. Pode ser subdividido em estratificado com interface lisa e com interface ondulada.

- Escoamento golfadas ou intermitente (*Slug flow e Plug flow*)

Caracterizado como padrão intermitente, a característica fundamental desse tipo de escoamento pode ser observada como a alternância entre bolhas e pistão de líquido, regiões situada entre duas bolhas consecutivas. Por se tratar do padrão de estudo neste trabalho, será detalhado melhor na seção 2.2.

- Escoamento Anular (*Annular Flow*)

Este escoamento ocorre em elevadas vazões de gás, pode se observar a concentração de gás na região central da tubulação juntamente com uma fina camada de líquido na parede da tubulação.

- Escoamento disperso (*Dispersed Bubble Flow*)

O escoamento disperso ocorre quando a vazão de líquido é muito alta. O empuxo que atua sobre as bolhas permite que alcancem uma região de com alto fator de cisalhamento, fragmentando em bolhas menores. Quanto maior a vazão de gás, mais homogênea se torna a distribuição das bolhas ao longo do tubo.

2.1.3 Mapas de fluxo

Nos primeiros estudos, a observação visual do escoamento através de tubos transparentes era a técnica mais utilizada para definição de padrões de escoamento. Para identificar os padrões de escoamentos surgiram os mapas de fluxo, estes são gerados a partir de dados experimentais onde determinam os padrões de escoamento com vazões volumétricas, fração de vazio e outras propriedades dos fluidos. Além de permitir a identificação do padrão, os mapas de fluxo tem importância na definição de condições operacionais de equipamentos, evitando a transição para padrões indesejáveis. A grande variedade de mapas de fluxo encontradas na literatura pode ser classificada em mapas com coordenadas dimensionais e adimensionais, de acordo com as variáveis das coordenadas do gráfico cartesiano que usualmente expressam os padrões.

Os mapas de fluxos dimensionais são diagramas que mostram os limites de transição entre os padrões de fluxo e são normalmente ilustrados com eixos de forma logarítmica usando parâmetros adimensionais para representar as velocidades de líquido e gás. Foram propostos mapas para fluxo em escoamentos ascendente vertical (Hewitt e Roberts, 1969) assim como em transições de regimes de escoamentos bifásicos em tubos horizontais.

Os modelos de Baker (1954) e Taitel e Dukler (1976), apresentam um dos primeiros mapas de fluxo baseados em escoamento bifásico. As coordenadas do mapa envolviam as vazões das fases juntamente com propriedades dos fluidos, como densidade e tensão superficial. Para um tratamento mais abrangente e fundamental de transições de escoamentos bifásicos, consulte Barnea e Taitel (1986).

Taitel e Dukler (1976), propuseram um modelo mecânico, sem inserção de dados experimentais para prever transições e construir mapas de fluxo para o caso horizontal. Mandhane et al. (1974) propuseram mapas apresentando nos eixos coordenados velocidades superficiais de gás e líquido. Aplicam-se apenas às condições nas quais foram obtidos, ou seja, para uma específica geometria de tubo e fluidos, limitando sua utilização. Um exemplo desse tipo de mapa está mostrado na Figura 2.3 para escoamento horizontal.

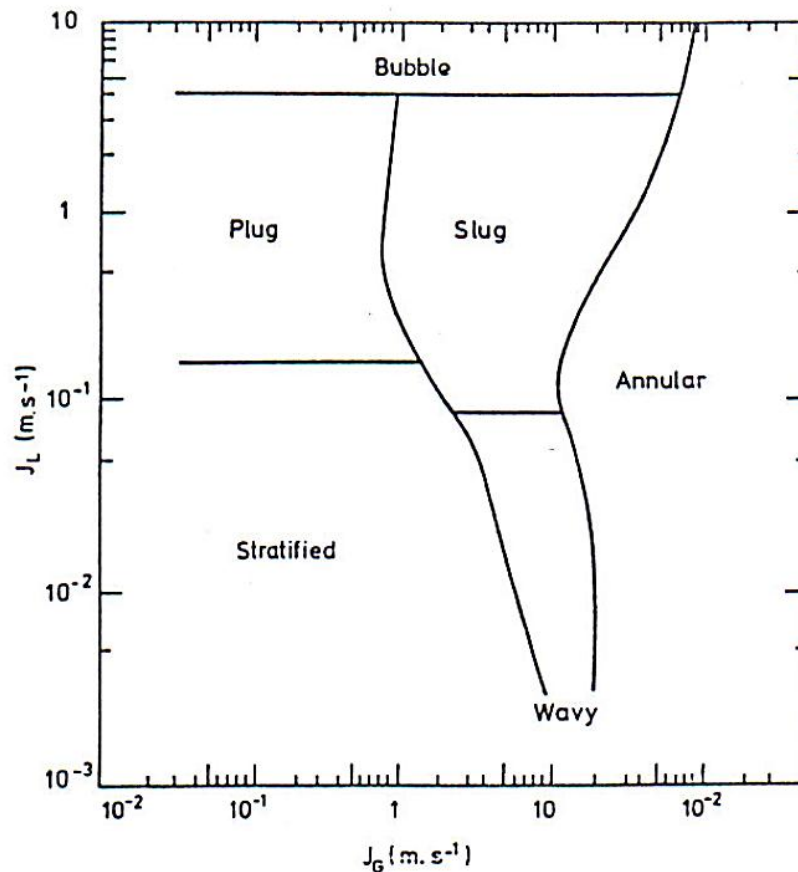


Figura 2.3 – Mapa de fluxo para escoamentos em tubulações horizontais (Mandhane et al. 1974)

A possibilidade de generalizar mapas para outros sistemas de diferentes fluidos e tubos de diferentes dimensões para identificar os padrões de escoamento é realizada com a utilização de mapas construídos com variáveis adimensionais, ou seja, mapas de fluxos adimensionais, como por exemplo, Taitel e Dukler (1976).

Como não é o foco do estudo, informações com mais detalhes podem ser encontradas em: Duns e Ros (1963), Gould et al. (1974), Speeding e Thanh Nguyen (1980), Govier e Aziz (1972), Weisman e Kang (1981) e Griffith e Wallis (1961).

2.2 REGIMES INTERMITENTES

2.2.1 Definição

Eles vêm sendo estudados de forma teórica e empírica nas últimas décadas. Podem-se citar revisões recentes em: Hale (2000) e Ujang (2003). Regimes intermitentes são observados em escoamentos bifásicos gás-líquido em suas configurações horizontal e vertical. Este padrão é caracterizado pelo surgimento de grandes bolhas, usualmente chamadas de bolhas de Taylor, que concentram grande parte da fração de gás. A bolha e o pistão definem o que se chama de célula unitária (Figura 2.4).

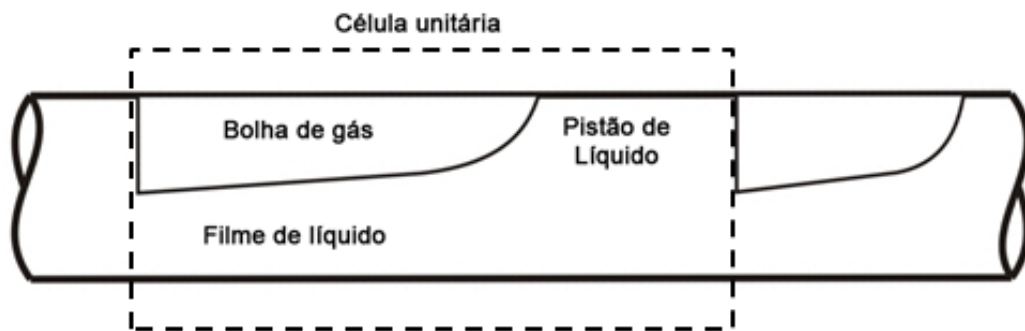


Figura 2.4 – Representação da célula unitária

As bolhas escoam ao longo do tubo junto com um pistão de líquido, podendo conter ou não bolhas de gás. Na literatura é possível encontrar este padrão como golfadas (*slug flow*) ou bolha alongada (*plug flow*), contudo alguns autores não diferenciam estes dois termos. Neste estudo utilizaremos o termo golfadas e bolhas alongadas representando de forma igual o padrão de regime intermitente em escoamentos bifásicos horizontais. Na Figura 2.5 observamos uma comparação de dois mapas de fluxo onde os autores diferenciam estas configurações de escoamento.

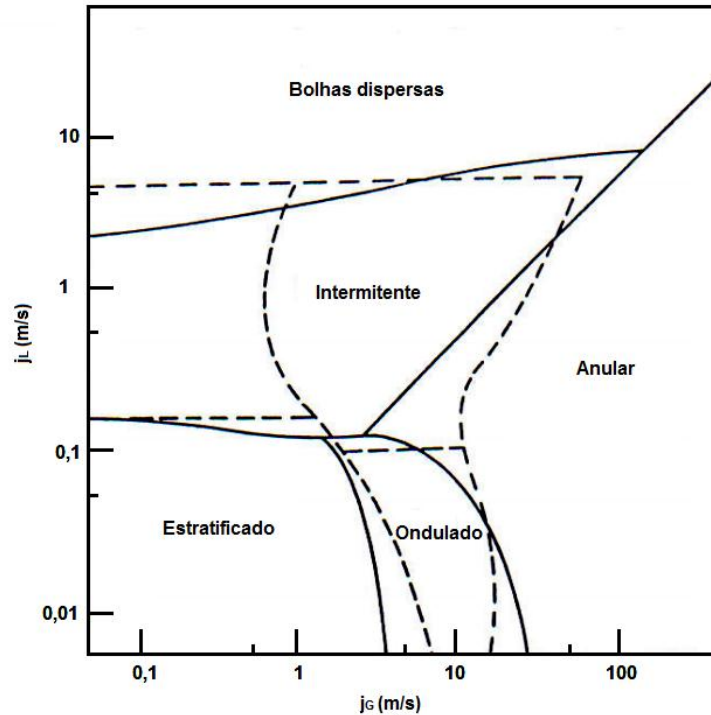


Figura 2.5 – Comparação dos mapas de fluxo Taitel e Dukler (1976), linha contínua e Mandhane et al. (1974) linha tracejada

Considerando o mapa de fluxo da Figura 2.5 o padrão de escoamento bolha alongada (Figura 2.6) ocorre em velocidades baixas de gás ($j_G < 1$ m/s). Em vazões com velocidades de gás altas ($j_G > 1$ m/s), o padrão torna-se golfadas, onde é possível observar a formação de pequenas bolhas no pistão de líquido e abaixo da bolha de Taylor, devido a alta velocidade superficial do gás.

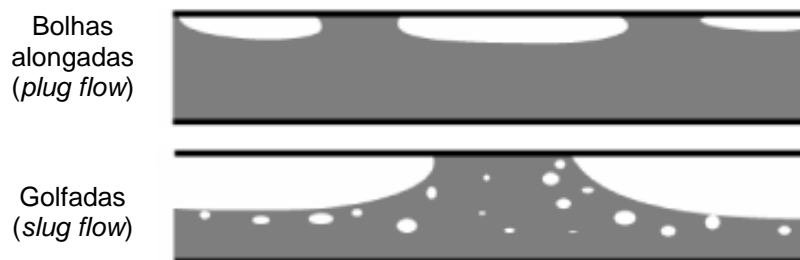


Figura 2.6 – Ilustração dos padrões de escoamento intermitentes, bolhas alongadas e golfadas (Ghajar, 2005)

Com base no conceito de célula unitária proposto por Wallis (1969), Dukler e Hubbard (1975) apresentaram um modelo empírico para determinar os principais parâmetros do padrão golfada. Neste modelo foi possível extrair o parâmetro de velocidade do pistão de líquido, da bolha de Taylor e do filme, além dos comprimentos de pistão e de bolha em

tubulações. Após este trabalho, surgiram outros modelos, como Nicholson et al. (1978), Kokal e Stanislav (1989), Andreussi et al. (1993), Cook e Behnia (1997) e Fagundes Netto et al. (1999).

Algumas das mais relevantes propriedades dos escoamentos bifásicos em seu padrão intermitente serão examinadas neste trabalho. Poucos modelos teóricos são disponíveis para a predição de tais, por isso muitas vezes são utilizados gráficos e relações empíricas para descrever o comportamento. As próximas seções revisam alguns parâmetros e conceitos importantes do regime intermitente.

2.2.2 Parâmetros e modelos

Os estudos dos parâmetros descritos abaixo não são universais. Os modelos propostos foram estudados de forma empírica para diferentes configurações. Estes modelos foram utilizados neste trabalho, pois se aproximam da mesma configuração utilizada neste trabalho.

a) Fração de vazio média

Para o estudo de fração de vazio médio em escoamentos intermitentes, Gregory e Scott (1969) propuseram a relação com base em dados empíricos,

$$\bar{\alpha} = \frac{j_G}{1,19j} \quad (2.10.)$$

onde j_G é a velocidade superficial do gás e j a velocidade da mistura.

Mattar e Gregory (1974) também estabeleceram uma relação para determinar a fração de vazio média no escoamento.

$$\bar{\alpha} = \frac{j_G}{1,13j + 0,7} \quad (2.11.)$$

b) Fração de líquido no pistão

A fração de líquido no pistão, ou *hold-up*, representa a quantidade de líquido contida nesta região. Em alguns estudos é comum o uso de informações sobre o aeramento do pistão ao invés de analisar a fração de vazio. Este fator depende diretamente da vazão das fases e da inclinação da tubulação, podendo ser obtido experimentalmente ou por meio de modelos

mecanicistas. Gregory et al. (1978) mediram a velocidade de fração de líquido utilizando sensores capacitivos em misturas de ar-óleo leve para tubulações de 25,8 mm e 51,2 mm e obtiveram a seguinte equação:

$$\bar{R}_{LS} = \frac{1}{1 + \left(\frac{j}{8,66}\right)^{1,39}} \quad (2.12.)$$

Marcano et al. (1998) realizaram observações em experimentos utilizando tubulações de 77,92 mm, chegando a esta equação de modelagem:

$$\bar{R}_{LS} = \frac{1}{1,001 + 0,0179j + 0,0011j^2} \quad (2.13.)$$

Recentemente Abdul-Majeed (2000) sugeriu uma nova equação experimental observando que a fração de líquido no pistão é afetada ligeiramente pelo diâmetro do tubo e pela tensão superficial das fases. Portando propôs uma relação no qual depende das viscosidades dos fluidos.

$$\bar{R}_{LS} = 1,009 - j \left(0,006 + 1,3377 \frac{\mu_G}{\mu_L} \right) \quad (2.14.)$$

onde μ_G é a viscosidade do gás e μ_L do líquido.

c) Velocidade de translação da bolha

Uma forma de compreender o comportamento do escoamento bifásico é a partir de informações sobre a velocidade de propagação das bolhas. Os primeiros modelos desenvolvidos em escoamentos horizontais (Wallis, 1969), (Dukler e Hubbard, 1975) inicialmente não consideravam a velocidade de deslizamento U_d (*drift velocity*) para definir a velocidade de propagação da bolha, analisando apenas a velocidade da mistura das fases. U_B é definida por uma função que depende da velocidade da mistura j entre outros parâmetros. Nicklin (1962) propôs uma equação teórica para a velocidade das bolhas

$$U_B = C_0 j + 0,35\sqrt{gD} \quad (2.15.)$$

onde, o coeficiente C_0 representa um coeficiente empírico de acordo com a distribuição de velocidade na fração de líquido. g é a aceleração gravitacional e D o diâmetro do tubo. Em estudos realizados por Bendiksen (1984) recomendou-se $C_0 = 2$ para escoamentos laminares e $C_0 = 1,2$ para escoamentos turbulentos.

d) Frequência de bolhas

O período de passagem da bolha é definido como o tempo necessário para ela movimentar-se entre dois pontos de medição. O inverso deste período é a frequência de passagem (f). Alguns modelos foram propostos para o cálculo deste parâmetro, a maioria com base em dados experimentais. Gregory e Scott (1969) propuseram uma correlação para a frequência de bolhas realizando medições em um sistema água-dióxido de carbono em uma tubulação de 19,1 mm de diâmetro.

$$f = 0,0226 \left[\frac{j_L}{gD} \left(\frac{19,75}{j} + j \right) \right]^{1,2} \quad (2.16.)$$

Greskovich e Shrier (1972) realizaram experimentos em um sistema ar-água utilizando dutos de 38,1 e 31,75 mm, em que propuseram a seguinte correlação.

$$f = 0,0226 \left[\frac{j_L}{j} \left(\frac{2,02}{D} + \frac{j^2}{gD} \right) \right]^{1,2} \quad (2.17.)$$

Heywood e Richardson (1979) calcularam a função de densidade espectral de potência para estimar o modelo abaixo.

$$f = 0,0434 \left[\frac{j_L}{j} \left(\frac{2,02}{D} + \frac{j^2}{gD} \right) \right]^{1,02} \quad (2.18.)$$

2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

Em consequência do grande interesse em estudar experimentalmente escoamentos bifásicos e a necessidade de desenvolvimento de instrumentos para medição com alto grau de desempenho e segurança, houve um grande avanço na pesquisa de novos métodos e técnicas de medição. Dependendo dos objetivos, diferentes técnicas podem ser aplicadas. Porém, é importante manter uma adequação em termos de resolução espacial e temporal do método a ser utilizado tendo em vista os propósitos das medições. Também é importante salientar que nenhuma das técnicas propostas pode ser considerada universalmente aplicável e algumas delas têm desvantagens consideráveis e podem falhar em algumas situações práticas particulares.

2.3.1 Técnicas tomográficas

a) Tomografia por raios-X e gama

Tomografia por radiação ionizante vem sendo utilizada em diversas áreas, da médica até a investigação em escoamentos. Esta técnica não invasiva apresenta alta resolução espacial, mas a maioria ainda possui baixa resolução temporal, devido a movimentação mecânica das partes do tomógrafo ao redor da tubulação. Heindel et al. (2008) descreve o uso de tomografia por raios X, assim como Hampel et al. (2007) o uso de raios gama. Johansen (2005) avalia a otimização desta técnica incorporando um número maior de fontes atuando diretamente a receptores, de forma a substituir as fontes móveis, reduzindo o tempo de aquisição de dados. Soluções de imageamento rápido por raios X, ou *fast X-ray imaging*, utilizam o meio eletrônico ao invés do mecânico, alcançando taxas de até 2000 fps (Hori et al., 1998), porém estes métodos são muito complexos e caros. Algumas técnicas não conseguem realizar tais medidas em tubulações metálicas, onde a utilização de raios X e gama tem vantagem nesta aplicação, no entanto, essas soluções ainda são comparativamente complexas e de custos elevados.

b) Tomografia por ressonância magnética

Assim como raios-X e raios gama, a tomografia por ressonância magnética (*Magnetic Resonant Imaging - MRI*), também é utilizada na área biomédica. Essa técnica baseia-se no fenômeno de ressonância magnética do núcleo de hidrogênio em conjunto com frequências de rádio e pulsos magnéticos (Mantle e Sederman, 2003).

Na investigação de escoamentos, o método detecta concentrações de prótons quando partículas entram em equilíbrio após uma estimulação magnética apropriada, por esse motivo o fluido em análise deve ser rico em água ou hidrocarboneto. Quando aplicada no estudo de escoamentos de água no estado líquido, essa técnica apresenta um excelente contraste. Mantle e Sederman (2003) e Hall (2005) apresentaram aplicações da ressonância magnética na medição de escoamentos em processos industriais químicos. Diferente dos raios X e raios gama, sua desvantagem deve-se ao fato de que as tubulações sejam construídas com materiais não magnéticos e não condutores de forma a permitir a realização das medições. O elevado custo dos equipamentos e baixa frequência de aquisição também são outras limitações dessa técnica.

c) Tomografia por emissão de pósitrons

A tomografia por emissão de pósitrons (*Positron Emission Tomography* - PET) baseia-se na emissão da partícula pósitron. Essa partícula libera raios gama quando ocorre sua aniquilação por um elétron Parker e McNeil (1996). Sensores de cintilação detectam os raios gama emitidos pelo decaimento radioativo, utilizando essas informações, mapeia-se o fluxo através de tratamento dos dados. Assim como na tomografia por raios gama, a penetração dos raios possibilita a utilização de tubulações metálicas. Porém o tempo de aquisição na ordem de minutos é elevado, tornando-se inviável para investigação de escoamentos com mudanças rápidas.

d) Tomografia por ultrassom

A técnica de tomografia por ultrassom também pode ser aplicada na investigação de escoamentos bifásicos (Hoyle, 1996). O sistema de captação detecta mudanças na resposta acústica entre as interfaces das fases líquida e gasosa com transdutores dispostos ao redor do duto. Pode-se citar Yang, M. et al. (1999) para a descrição do modo de reflexão e transmissão e Rahiman et al. (2006) e Supardan et al. (2007) para o método de transmissão. A resolução temporal para a tecnologia por ultrassom é moderada e pode ser utilizada em tubulações opacas, porém essa técnica é aplicada apenas para escoamentos com baixa fração de vazio, pois a onda mecânica é espalhada nas interfaces e os detectores não recebem sinal suficiente.

e) Tomografia por impedância elétrica

A tomografia por impedância elétrica (*Electric Impedance Tomography* - EIT) explora a interação dos campos elétricos com a matéria a fim de determinar a condutividade ou permissividade as quais estão relacionadas diretamente com a distribuição de fase do meio. A técnica é dividida em tomografia por resistência elétrica (*Electric Resistance Tomography* - ERT) e tomografia por capacitância elétrica (*Electric Capacitance Tomography* - ECT) Marashdeh et al. (2007) e Cao et al. (2007).

Em EIT, vários eletrodos são dispostos igualmente espaçados em torno de um tubo. A técnica ECT é amplamente utilizada para detecção de fração de vazio em misturas gás-líquido com líquidos não condutores. Os sensores se localizam na parte externa da tubulação, onde os sinais de excitação gerados e medidos utilizam a diferença de potencial. Geralmente esta técnica é aplicada em materiais não condutores, como escoamento bifásico de óleo e gás. A variação de capacitância medida pelos eletrodos que realizam a medição é proporcional à permissividade da mistura, ou seja, proporcional à fração de gás e líquido dentro da tubulação. Essa técnica funciona apenas para misturas com fases de diferentes permissividades, onde se pode prever a concentração média da mistura (Crowe, 2006).

No ERT, os sensores penetram na tubulação, porém são considerados não intrusivos devido ao seu baixo grau de intrusão. Normalmente são aplicados no mapeamento de distribuições de concentração em suspensões e misturas fracas. Correntes são aplicadas e diferenças de potencial são medidas. Em ambas as técnicas, os eletrodos são excitados de forma alternada, enquanto os outros sensores captam o sinal. O sinal resultante passa por um algoritmo de reconstrução e gera imagens que serão analisadas posteriormente. A resolução espacial da tomografia por impedância elétrica é baixa, porém sua resolução temporal é alta e tem um baixo custo de aplicação. Para maiores detalhes sobre a medição com base em modalidades elétrica, ver Xie et al. (1995), Dyakowski (2000), York (2001), Tapp et al. (2003), Yang, W. Q. e Peng (2003) e Ahmed e Ismail (2008).

2.3.2 Câmera de alta velocidade

A câmera de alta velocidade é um dispositivo capaz de realizar aquisições de imagens em alta frequência. Esta técnica permite a investigação em pequena escala e validação de alguns parâmetros de interesse no estudo de escoamentos bifásicos. Videometria de alta velocidade não pode ser utilizada em muitos campos de aplicações, pois assim como as demais técnicas de medição ópticas, é necessário um ambiente propício, utilizando tubulações transparentes, filtros, difusores e iluminação apropriada. No entanto, as

características não invasivas, avanços na tecnologia de instrumentação e algoritmos de processamento de sinal levaram a um grande em uso deste método para estudos experimentais.

Muitos trabalhos foram realizados, analisando as bolhas alongadas e seus pistões. Estes foram realizados através de um tratamento morfológico de imagens de escoamentos gás-líquido na maioria ao longo de tubos verticais. Alguns exemplos incluem técnicas como a subtração de imagens, filtragem Mayor et al. (2008) e *wavelets* Guo, F. et al. (2010). Com base nos resultados de segmentação de imagens podem-se medir as curvas de médias, e desvios-padrão para as distribuições de velocidade do escoamento, o comprimento, volume e as frequências de célula unitária (Mayor et al., 2008). No entanto, poucos estudos têm sido realizados para configuração horizontal (Ursenbacher, 2004), (Hout et al., 2002) e esses métodos não analisam a interface das bolhas e pistões nos escoamentos turbulentos. No entanto, esse é o padrão mais encontrado em aplicações industriais e merece um estudo mais detalhado.

A partir das imagens obtidas, podem-se aplicar diversos tipos de processamento de imagens. Em algumas situações é possível utilizar-se a videometria como uma técnica de validação dentre as demais tecnologias. Uma das técnicas, desenvolvida por Amaral et al. (2011) é utilizada neste trabalho para a comparação dos dados. Utiliza-se o processamento de imagens com base em algoritmos de segmentação *watershed* para encontrar-se a borda da bolha, permitindo determinar as coordenadas espaciais i, j do objeto. A velocidade da bolha pode ser encontrada calculando-se a diferença das coordenadas das bolhas entre dois *frames*, definida pela equação abaixo:

$$U_B = \frac{\Delta K_P}{\Delta_P} \cdot (P_S) \cdot (f_R) \quad (2.19.)$$

onde U_B é a velocidade do nariz da bolha (m/s), ΔK_P é a diferença entre a posição dos *frames* em unidades de *pixels*, Δ_P é o número de quadros mostrando o nariz da bolha (*frames*), P_S é o tamanho do *pixel* (m/*pixel*), este é calculado dividindo-se o campo visão pelo número de *pixels* horizontais no quadro, e f_R é a taxa de quadros (*frames/s*). Depois de tirar as fotos da seção de teste de imagens, a sequência de imagens é submetida a um processo de reconstrução. Utiliza-se o parâmetro de velocidade para unir os *frames* resultando em uma imagem da bolha de Taylor como mostrado na Figura 2.7.

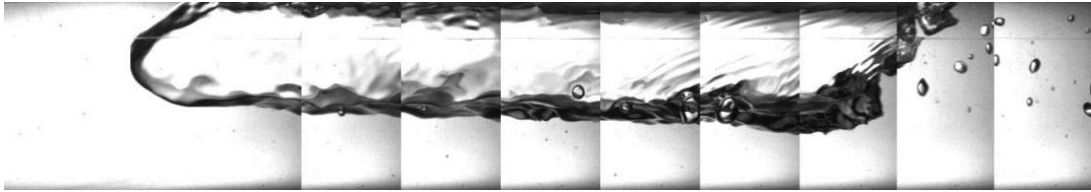


Figura 2.7 – Reconstrução da bolha de Taylor através da união dos *frames*

Além da capacidade de reconstruir os *frames*, o algoritmo de Amaral et al. (2011) permite extrair alguns parâmetros de interesse no estudo do escoamento bifásico. Para isso, é necessário um pré-processamento das imagens adquiridas a fim de extrair a posição da bolha. A técnica utilizada é baseada em morfologia matemática, que diz respeito ao ramo de processamento não-linear de imagens que se concentra na estrutura geométrica da imagem. Junto a essa técnica, o algoritmo utiliza segmentação baseada no algoritmo de *watersheds*, discutida na seção 2.6.3. Após um pré-processamento o algoritmo analisa a imagem a fim de encontrar uma altura média para a bolha (h) (Figura 2.8), onde n é o comprimento em *pixels* da bolha.

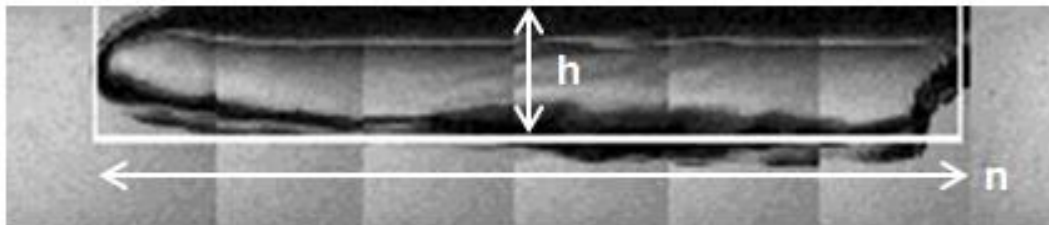


Figura 2.8 – Representação da medida da altura média da bolha após um pré-processamento da imagem

Esta altura é utilizada para calcular a área do semicírculo da seção transversal (Figura 2.9).

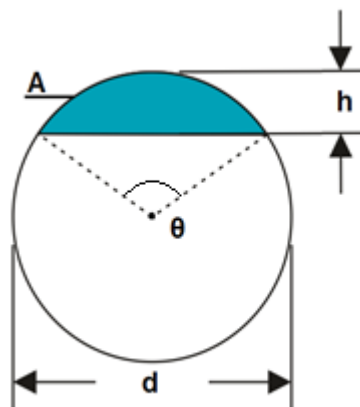


Figura 2.9 – Determinação da área do semicírculo da seção transversal da bolha

O ângulo θ (rad) a partir do arco pode ser encontrado usando a equação abaixo, onde d (m) é o diâmetro do tubo e h (m) a altura da coluna de gás.

$$\theta = 2 \arcsin \left(1 - \frac{2h}{d} \right) \quad (2.20.)$$

Após calcular a área do semicírculo, presume-se que a bolha tem o mesmo formato de seu início até o fim. O volume aproximado da bolha é calculado como visto na equação abaixo:

$$V = \left(\left(1 - \frac{(\theta - \sin(\theta))}{2\pi} \right) \cdot \frac{\pi d^2}{4} \right) \cdot n \quad (2.21.)$$

onde, n é o número de pixels no eixo k que compõem a bolha e $V(\text{m}^3)$ o volume da bolha.

Este é um método de aproximação para bolhas com forma regular e só funciona para os escoamentos horizontais, onde a gravidade força a bolha para parte superior do tubo (Figura 2.10).

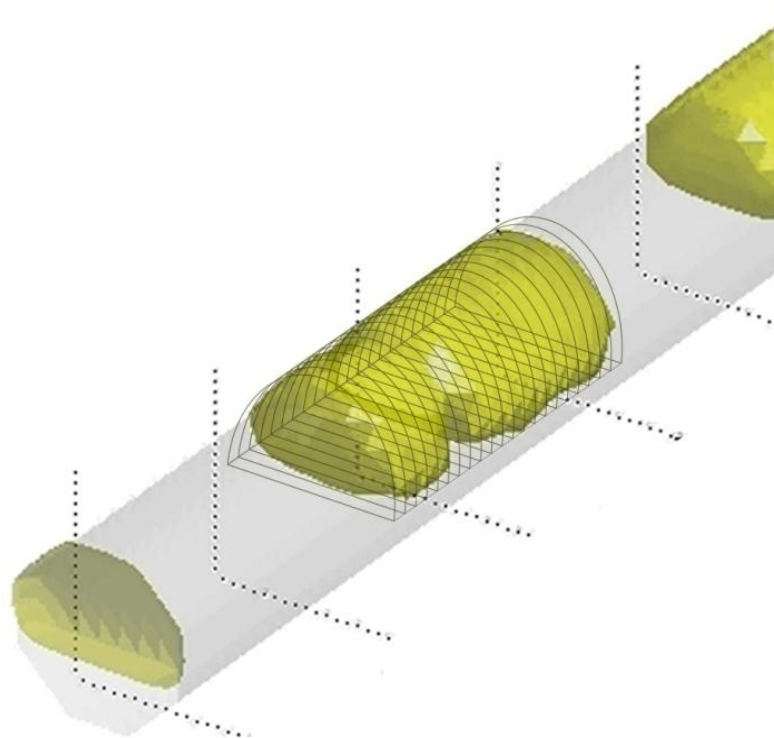


Figura 2.10 – Ilustração da área semicircular para o método de aproximação

2.3.3 Comparação das técnicas

Como discutido ao longo da seção 2.3, cada uma das técnicas apresentadas tem a suas vantagens, desvantagens e limitações. Uma visão geral sobre a medição de diferentes técnicas é apresentada na Tabela 2.1, juntamente com alguns parâmetros para comparação. A escolha de uma determinada técnica depende de vários aspectos, como a propriedade do meio a ser medida, os parâmetros de interesse, condições de temperatura e pressão da aplicação, resolução temporal e espacial e custos. Na próxima seção, detalhes do sensor *wire-mesh* serão analisados.

Tabela 2.1 – Comparação de algumas técnicas de medição para escoamentos bifásicos gás-líquido

Técnica	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Custo	Observações
Raios X e γ Tomografia por Raios X e Gama	1 mm	min, ms	\$\$\$	Radiação ionizante, questões de segurança.
MRI Tomografia por Ressonância Magnética	1 mm	min	\$\$\$	Não é adequado para materiais com propriedades magnéticas e condutores de eletricidade.
PET Tomografia por Emissão de pósitrons	2-5 mm	min, ms	\$\$\$	Necessidade de marcador isotópico.
US Tomografia por Ultrassom	2-5 mm	ms	\$\$	Adequado apenas para baixas frações de vazio.
EIT Tomografia por Impedância Elétrica	> 5 mm	ms	\$	Problemas com campos moles.
HSC Câmera de alta velocidade	1 mm	ms, μ s	\$\$	Adequado apenas para baixas frações de vazio e utilização de tubulações transparentes.
WMS Sensor Wire-Mesh	2-5 mm	μ s	\$	Intrusivo, apenas para fluídos condutores.

2.4 SENSOR WIRE-MESH

2.4.1 Descrição da técnica

A técnica conhecida como *wire-mesh* que foi primeiramente proposto para visualização de escoamentos bifásicos por Prasser et al. (1998), é um híbrido entre um sensor intrusivo e de imageamento tomográfico da seção transversal e proporciona alta resolução temporal e espacial. Essas imagens geradas possibilitam a extração de parâmetros físicos de interesse utilizando técnicas de processamento de imagens.

O sensor *wire-mesh*, ilustrado na Figura 2.11, é constituído por dois planos de eletrodos (fios de aço inoxidável) com espessura de 0,12 mm de diâmetro que se estendem ao longo da tubulação por onde passa o escoamento a ser investigado.



Figura 2.11 – Dois sensores *wire-mesh* apresentados em perspectiva

Os planos de eletrodos (transmissor e receptor) são montados com um ângulo de 90° e estão separados por uma pequena distância na direção axial (Figura 2.12) de 1,5 mm, formando uma grade de eletrodos. Em um mesmo plano (Figura 2.13) os eletrodos são igualmente espaçados ao longo da seção transversal.

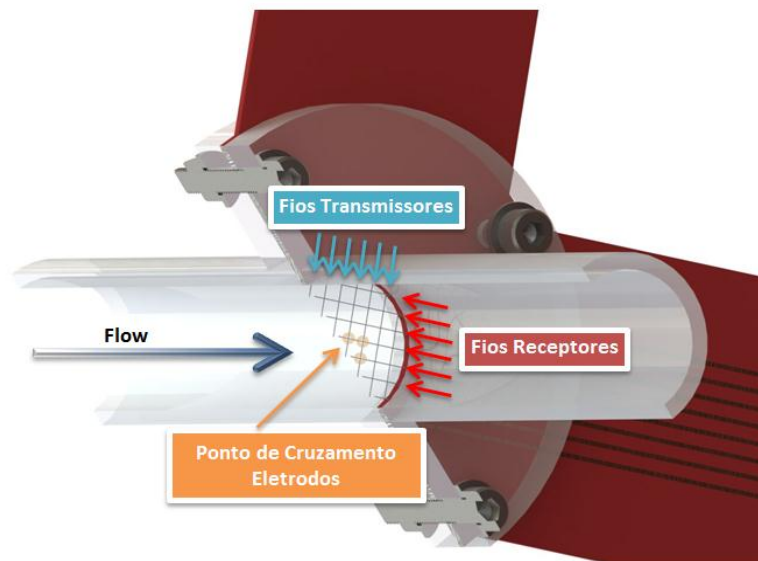


Figura 2.12 – Ilustração interna do sensor *wire-mesh* apresentado os seus componentes

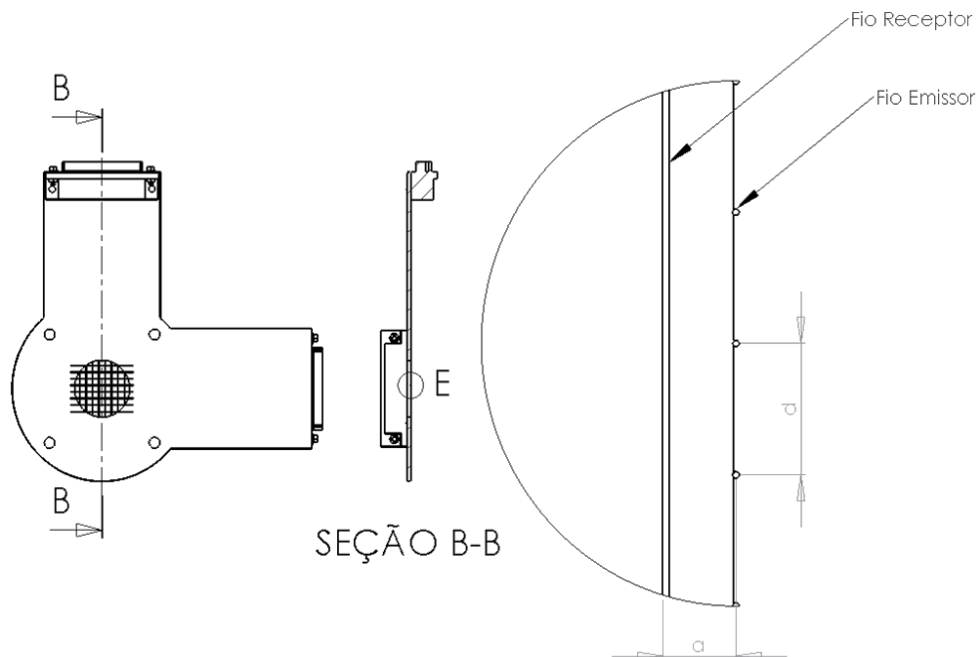


Figura 2.13 – Corte axial apresentando a separação entre os planos emissor e transmissor do sensor

A primeira geração de sensores (Prasser et al., 1998) era capaz de realizar medidas de condutividade do fluido. A segunda geração, proposta por Da Silva et al. (2007) utiliza a técnica de medição por capacitância. O sensor é capaz de mapear o valor das fases em função do tempo e espaço medindo a capacitância ou resistência, que por sua vez, é proporcional à permissividade elétrica à condutividade respectivamente, existente entre o cruzamento dos eletrodos. A eletrônica responsável em operar o sensor aplica uma tensão nos eletrodos transmissores de forma multiplexada, enquanto os outros eletrodos transmissores, não ativos, são conectados a potencial nulo. Esse esquema de excitação faz com que o potencial elétrico

seja concentrado ao longo do eletrodo ativo e assim as correntes medidas nos eletrodos receptores são relativas a uma dada região do sensor. Desta forma, o sensor divide a seção transversal em sub-regiões que são interrogadas individualmente. O processo é repetido para cada um dos eletrodos transmissores sendo ativados sequencialmente e medida das correntes nos eletrodos receptores. Ao final deste processo obtêm-se os valores de capacitância para cada um dos cruzamentos, os quais correspondem à distribuição instantânea de fases na seção transversal do duto. Desse modo, esta técnica permite a visualização da distribuição das fases em uma seção transversal de um escoamento bifásico com uma alta resolução temporal e espacial.

2.4.2 Processamento de dados

Neste trabalho foi utilizado o sensor *wire-mesh* capacitivo, o qual será descrito em detalhes. A Figura 2.14 ilustra o cruzamento das linhas transmissoras com as linhas receptoras, onde cada cruzamento se comporta como um ponto de medição. C_x é a capacitância a ser medida no cruzamento, C_f e R_f são o capacitor e resistor da malha de realimentação do amplificador de transimpedância, responsável por converter o sinal de corrente em tensão. V_i corresponde a um sinal de frequência na ordem de 5 MHz, que é fornecido de forma sucessiva para os demais fios transmissores Da Silva et al. (2010). Assumindo um amplificador ideal V_0 é definido por

$$V_0 = -V_i \left(\frac{j\omega C_x R_f}{1 + j\omega C_f R_f} \right) \quad (2.22.)$$

onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular da tensão de excitação. Além disso, se a frequência é escolhida para que $\omega R_f C_f$ seja muito maior que 1, desta forma pode-se simplificar a equação para

$$V_0 = -V_i \left(\frac{C_x}{C_f} \right) \quad (2.23.)$$

onde a tensão de saída V_0 é diretamente proporcional a capacitância no ponto de medição.

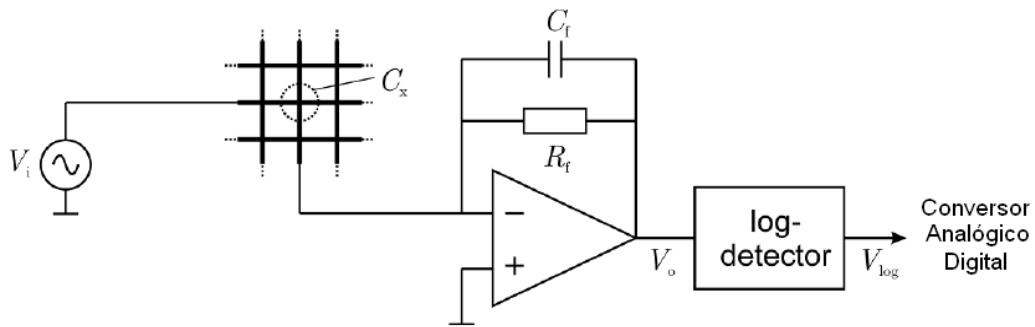


Figura 2.14 – Circuito de medição equivalente para a medição de capacitância (Da Silva, 2008)

A saída V_o precisa ser demodulada, ou seja, convertida de um sinal de corrente alternada para corrente contínua para que possa ser digitalizada. V_{log} é a saída do amplificador logaritmo que apresenta o sinal de envoltória do sinal de entrada.

$$V_{log} = V_a \cdot \ln\left(\frac{V_o}{V_b}\right) \quad (2.24.)$$

onde V_a e V_b são constantes do circuito integrado do detector logaritmo. Substituindo (Eq. 2.23) em (Eq. 2.24) e sabendo que C_x se comporta de forma diretamente proporcional à permissividade da substância ϵ no ponto de medição, na forma,

$$C = k_G \epsilon_0 \epsilon \quad (2.25.)$$

onde, ϵ_0 é a permissividade absoluta no vácuo ($\epsilon_0 = 8,85\text{pF/m}$) e ϵ a permissividade relativa pode-se mostrar que,

$$V_{log} = a \cdot \ln(\epsilon_x) + b \quad (2.26.)$$

onde a e b são constantes do ponto de medição, devido ao circuito e à geometria do sensor.

Desta forma, os valores de tensão V medidos pelo sensor *wire-mesh* são proporcionais à capacitância que também é proporcional à fração de fase α . Para se obter a fração de vazio é necessário uma normalização dos valores, onde duas referências de tensão são medidas: tubo cheio V_H e tubo vazio V_L obtendo-se a fração de vazio α no ponto. As referências são obtidas medindo uma fase de cada vez. A média dos valores de tensão para

um determinado ponto (i, j) em relação ao número de *frames* N para a leitura do ar atmosférico é dada por:

$$V_L(i, j) = \frac{1}{N_t} \sum_{k=0}^{N_t-1} V(i, j, k) \quad (2.27.)$$

onde $V(i, j, k)$ corresponde à matriz de valores de tensão, assim $V_L(i, j)$ pode ser definido como o valor médio lido no ponto dado pelos índices espaciais. Para a água, obtêm-se essa média da mesma forma:

$$V_H(i, j) = \frac{1}{N_t} \sum_{k=0}^{N_t-1} V(i, j, k) \quad (2.28.)$$

A partir dos valores de referência medidos é possível estabelecer um sistema entre as duas fases:

$$\begin{cases} V_L(i, j) = a(i, j) \ln(\varepsilon_L) + b(i, j) \\ V_H(i, j) = a(i, j) \ln(\varepsilon_H) + b(i, j) \end{cases} \quad (2.29.)$$

Resolvendo este, obtêm-se os valores de $a(i, j)$ e $b(i, j)$ com as equações:

$$a(i, j) = \frac{V_H(i, j) - V_L(i, j)}{\ln(\varepsilon_H) - \ln(\varepsilon_L)} \quad (2.30.)$$

$$b(i, j) = \frac{V_L(i, j) \ln(\varepsilon_H) - V_H(i, j) \ln(\varepsilon_L)}{\ln(\varepsilon_H) - \ln(\varepsilon_L)} \quad (2.31.)$$

A partir desses resultados é possível calcular a permissividade para o escoamento em investigação

$$\varepsilon(i, j, k) = \exp\left(\frac{V(i, j, k) - b(i, j)}{a(i, j)}\right) \quad (2.32.)$$

Com base na permissividade relativa do ar $\varepsilon_L=1$, simplificamos a equação para:

$$\varepsilon(i, j, k) = \exp\left(\frac{V(i, j, k) - V_L}{V_H - V_L} \cdot \ln(\varepsilon_H)\right) \quad (2.33.)$$

Como sugerido por Da Silva (2008), é possível adotar uma aproximação para o cálculo de fração de vazio de cada ponto do sensor, a partir das permissividades elétricas calculadas.

$$\alpha(i, j, k) = \frac{\varepsilon_H - \varepsilon(i, j, k)}{\varepsilon_H - \varepsilon_L} \quad (2.34.)$$

Por fim, é realizada a medida com uma taxa de 500 Hz, permitindo uma visualização da distribuição das fases na seção transversal do escoamento bifásico em alta resolução temporal. A suposição de uma dependência linear entre a fração de fase local e a permissividade no ponto de medição é uma simplificação. Basicamente a medida local se comporta como um capacitor de placas paralelas com uma distribuição de fase homogênea entre as placas do capacitor. Uma hipótese análoga tem sido empregada com sucesso nos sensores *wire-mesh* que medem condutividade (Prasser et al., 1998) e para sistemas de ECT (Mckeen e Pugsley, 2002).

2.5 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS

2.5.1 Definições

Este processo tradicionalmente é implementado através de funções matemáticas, a partir de algoritmos predeterminados. Diversas tarefas podem ser aplicadas através desta área de estudo, das quais se pode citar: a aquisição e transmissão de imagens digitais, tratamento de imagens usando filtros, compressões e transformações e extração e/ou identificação de seus componentes (reconhecimento de padrões) (Osorio e Bittencourt, 2000). Em diversas áreas do conhecimento há uma demanda muito grande em utilizar-se o processamento de imagem como técnica para a extração de características. Na biomedicina, por exemplo, alguns procedimentos melhoram e corrigem imagens de sistemas tomográficos para sua interpretação.

Uma imagem na escala de cinza é definida por uma função bidimensional de intensidade de luz $f(x,y)$, onde x e y denotam as coordenadas e o valor resultante é proporcional ao tom de cinza. Uma imagem digital pode ser considerada uma matriz, onde os

índices representam as linhas e as colunas, e o ponto de cruzamento o elemento *pixel* correspondente, cujo valor representa o nível de cinza naquele ponto. Um *pixel* (*picture element*) é o menor elemento de uma imagem. Frequentemente, uma imagem é composta por uma organização de *pixels* sob a forma de uma matriz (Figura 2.15).

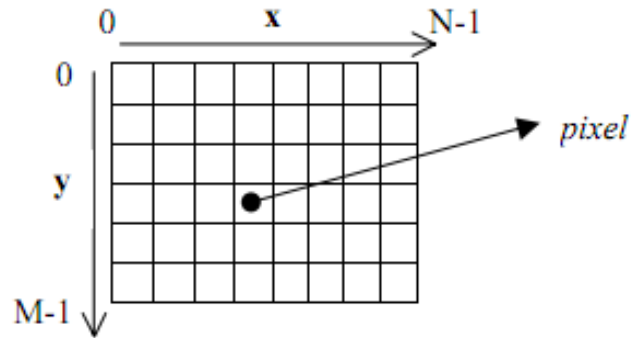


Figura 2.15 – Representação do pixel em uma matriz onde x e y correspondem às coordenadas espaciais

Para um determinado *pixel*, pode-se definir sua vizinhança (Figura 2.16), a qual permite a análise espacial da relação do *pixel* em questão com os demais.

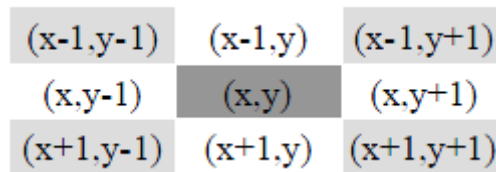


Figura 2.16 – Vizinhança de um pixel

Em imagens 2D usualmente é utilizada a vizinhança D4, onde apenas são considerados os *pixels* de borda ao de referencia. Na vizinhança D8 além da análise de borda é utilizado também os *pixels* na diagonal (Figura 2.17). Em imagens 3D, utiliza-se o *voxel* (*Volumetric Picture Element*) para representar o menor elemento dimensional, ou seja, um *pixel* com três dimensões. Este elemento possui as mesmas características, porém sua vizinhança pode ser definida por D6 ou D26 (Figura 2.18).

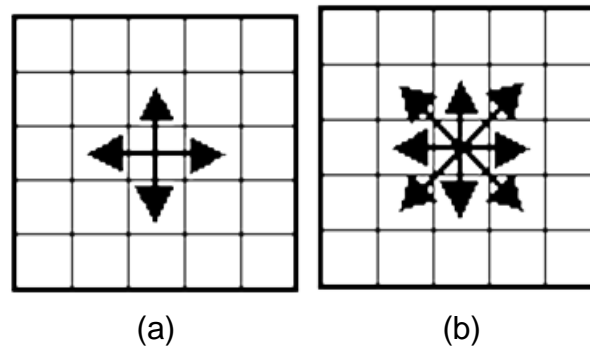


Figura 2.17 – Vizinhanças para imagens 2D do tipo: (a) vizinhança-D4, (b) vizinhança-D8

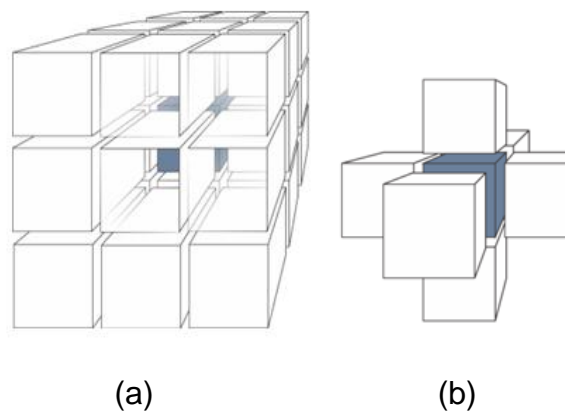


Figura 2.18 – Vizinhanças para imagens 3D do tipo: (a) vizinhança-D26, (b) vizinhança-D6

2.5.2 Filtragem

As técnicas de filtragem são transformações da imagem *pixel a pixel*, que não dependem apenas do nível de cinza de um determinado ponto, mas também do valor dos níveis de cinza dos *pixels* vizinhos. Em geral, os pontos mais próximos da referência contribuem mais para o novo valor do nível de cinza do que os pontos mais afastados. A filtragem em processamento de imagens está disposta em dois domínios, espacial e no da frequência. Neste trabalho descreve-se apenas o domínio espacial, já que está relacionado com o estudo aqui proposto.

A filtragem espacial é uma ferramenta usada em uma grande variedade de aplicações. Os métodos de filtragem que trabalham no domínio espacial operam diretamente sobre os *pixels*, normalmente utilizando operações de convolução com máscaras, responsáveis pelo tratamento dos dados de entrada. Estas máscaras serão descritas ao longo desta seção.

O processo de filtragem consiste de uma vizinhança estabelecida e uma operação pré-definida realizada sobre os *pixels* da imagem incluídos na vizinhança. Neste processo cria-se um novo *pixel* com coordenadas iguais ao do centro da vizinhança. O processamento

sobre a vizinhança consiste em definir um ponto central (i, j) , executar uma operação que envolva apenas os *pixels* da vizinhança, onde o resultado desta operação substituirá o ponto central. Este processo é repetido para todos os *pixels* da imagem. O processo de mover o ponto central cria novas vizinhanças para cada *pixel* na imagem de entrada. Esta operação é referida como processamento de vizinhança ou filtragem espacial, que pode ser linear ou não linear. Ao percorrer todos os *pixels* da imagem deve-se atentar aos limites da imagem, estes devem ser propriamente tratados, já que os *pixels* das bordas não tem a vizinhança completa Gonzalez; Woods (1993). Existem alguns métodos para tratar este tipo de problema. Podemos citar:

- Ignorar os *pixels* para os casos onde a operação não possa ser realizada.
- Utilizar uma máscara modificada nas regiões de borda.
- Expandir a imagem, criando *pixels* imaginários de mesmo valor dos que pertenciam a borda anteriormente.

a) Filtros lineares

Os filtros lineares suavizam, realçam detalhes da imagem e minimizam efeitos de ruído, sem alterar o nível médio de cinza da imagem. Esses filtros baseiam-se na combinação de *pixels* pertencentes a uma vizinhança do ponto em observação e uma matriz bidimensional (janela de observação ou máscara) que descreve o processo linear a ser aplicado. A convolução de uma imagem $f(i, j)$ com o filtro (núcleo ou máscara de convolução) de resposta impulsiva $h(i, j)$ produzirá uma imagem de saída $q(i, j)$.

A máscara de convolução possui um número ímpar de elementos, ou seja, tem número ímpar de linhas e colunas. Os tamanhos mais utilizados, geralmente são: 3×3 , 5×5 , 7×7 e 9×9 . Já o seu conteúdo depende do tipo de processamento que desejamos realizar. Independente do filtro linear utilizado, o processo de filtragem consiste em somar os produtos entre os coeficientes da janela de observação e os valores de intensidade dos pixels na janela em uma posição específica da imagem. Alguns filtros espaciais lineares são mostrados a seguir.

Os Filtros espaciais passa-baixa suavizam a imagem atenuando ou eliminando os componentes de altas-frequências. O mesmo tende a minimizar ruídos e apresenta o efeito de borramento da imagem, por atenuar os componentes que caracterizam bordas e outros detalhes (Figura 2.19).



Figura 2.19 – (a) Imagem original corrompida com ruído tipo sal e pimenta; (b) Imagem recuperada por um filtro passa baixa

Abaixo, a Figura 2.20 mostra alguns filtros espaciais passa-baixa de tamanhos variados (3x3, 5x5 e 7x7) respectivamente.

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{49} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 2.20 – Máscaras de filtros passa-baixa de tamanhos variados

Os filtros espaciais passa-alta realçam detalhes, atenuam ou eliminam as componentes de baixa-frequência. Esses componentes são responsáveis por características que variam rapidamente, o que produz um realce das bordas (*sharpening*) da imagem. Ou seja, as transições entre regiões diferentes tornam-se mais nítidas. Esses filtros podem ser usados para realçar certas características presentes na imagem, tais como bordas, linhas curvas ou manchas, mas enfatizam o ruído existente na imagem Lopes (1996). A Figura 2.21 ilustra o resultado obtido pelo segundo filtro passa-alta, mostrado na Figura 2.22, com janela de observação 3x3 e entrada corrompida por ruído do tipo sal e pimenta.



Figura 2.21 – (a) Imagem original corrompida com ruído tipo sal e pimenta; (b) Imagem recuperada utilizando um filtro passa alta

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 2.22 – Máscara para filtro passa-alta 3x3

b) Filtros não-lineares

Filtros não lineares tem grande importância no processamento de imagens. São bem melhores no que se refere a extrair ruído sem distorcer as características da imagem. Assim como os filtros espaciais lineares, esses também se baseiam nos valores dos pixels na vizinhança considerada, fazem uma análise estatística dos valores de níveis de cinza e geram a saída. Um diferencial é que os filtros não lineares aplicam transformações sem o compromisso de manter o nível médio de cinza da imagem original.

Um dos grandes problemas relacionados com a eliminação do ruído de uma imagem, através de uma filtragem linear, refere-se à suavização dos seus contornos. O processamento não-linear aborda este problema tentando evitar uma filtragem homogênea ao longo das regiões próximas a estas bordas. Os filtros estatísticos são uma classe de filtros não-lineares bastante empregada na eliminação de ruídos, com preservação de contornos (Rosenfeld e Kak, 1982). Dentre estes, um dos mais importantes é o filtro da mediana, que consiste em substituir o valor de um *pixel*, centrado numa determinada vizinhança, pelo valor mediano dos pixels desta vizinhança ordenados de acordo com suas magnitudes (Heygster, 1982). O filtro da mediana elimina eficientemente ruído impulsivo, do tipo sal e pimenta, representando

descontinuidades abruptas e isoladas na imagem. Além disto, ele não introduz valores de níveis de cinza diferentes daqueles contidos na imagem original e, por afetar menos os contornos, pode ser aplicado iterativamente. A Figura 2.23 apresenta uma imagem com ruído e uma iteração do filtro da mediana com uma vizinhança 5×5 .

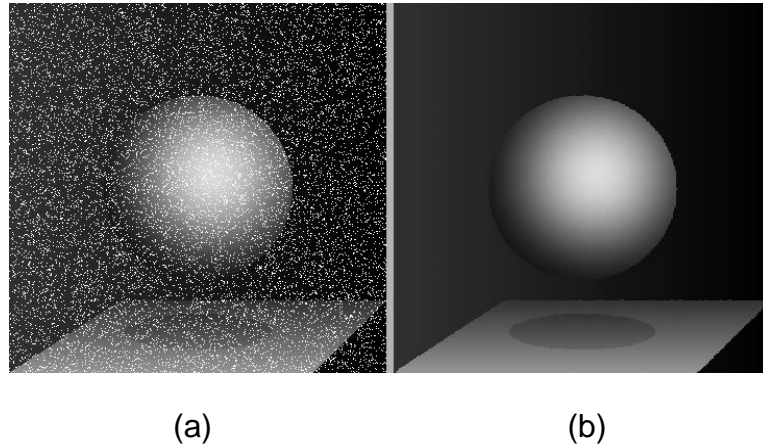


Figura 2.23 – Exemplo de aplicação de máscara de mediana 5×5 (a) Imagem original; (b) Imagem com iteração do filtro da mediana

Além da mediana, podemos citar outros filtros não-lineares:

- Max: consiste em substituir a intensidade de cada *pixel* pela maior intensidade na sua vizinhança. Aumenta a área das regiões claras, dominando as regiões escuras.
- Min: consiste em substituir a intensidade de cada *pixel* pela menor intensidade na sua vizinhança. Aumenta a área das regiões escuras, dominando as regiões claras.
- Moda: consiste em substituir a intensidade de cada *pixel* pela intensidade que ocorre com maior frequência na sua vizinhança.

2.5.3 Histograma da imagem

Histograma é o conjunto de números que indicam a porcentagem de *pixels* naquela imagem, que apresentam um determinado nível de cinza (Vieira e Oge, 1999). Muitas vezes é representado por um gráfico composto por retângulos justapostos em que a base de cada um deles corresponde ao intervalo de classe e a sua altura à respectiva frequência. Quando o número de dados aumenta indefinidamente e o intervalo de classe tende a zero, a distribuição de frequência passa para uma distribuição de densidade de probabilidades. A construção de histogramas tem caráter preliminar e é um importante indicador da distribuição de dados, que pode corresponder a uma função normal, como pode indicar mistura de populações (Figura 2.24).

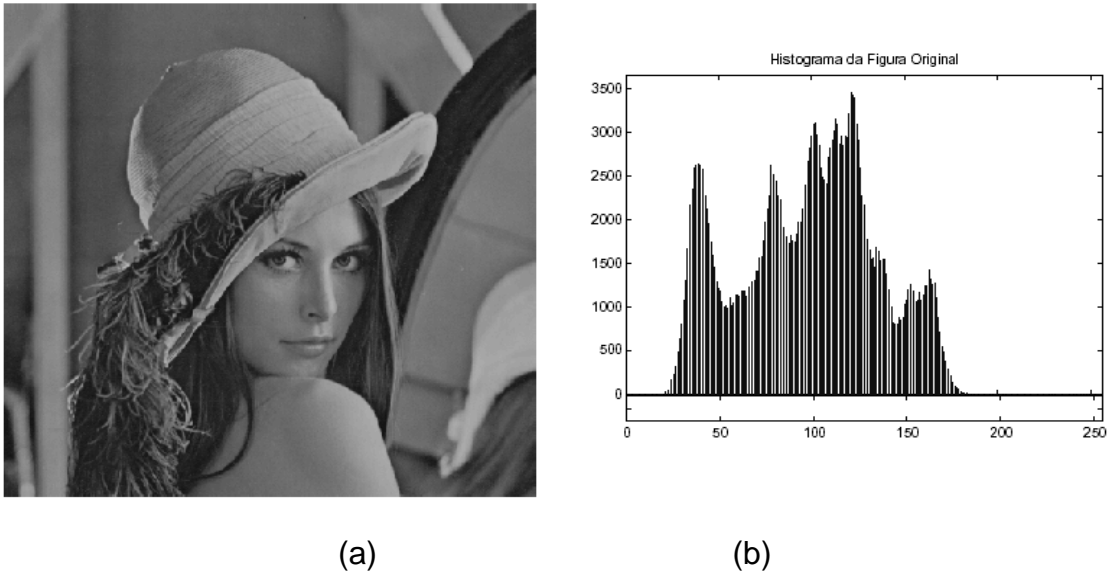


Figura 2.24 – Exemplo de histograma em níveis de cinza (a) Imagem original; (b) Histograma da imagem

2.5.4 *Threshold* ou Limiar

O *threshold* é definido por um valor de corte no histograma. O histograma pode conter a representação de um ou mais espectros, desta forma, quando se define um limiar de separação se obtêm a binarização dos dados (Figura 2.25) possibilitando a separação dos dados através de classes.

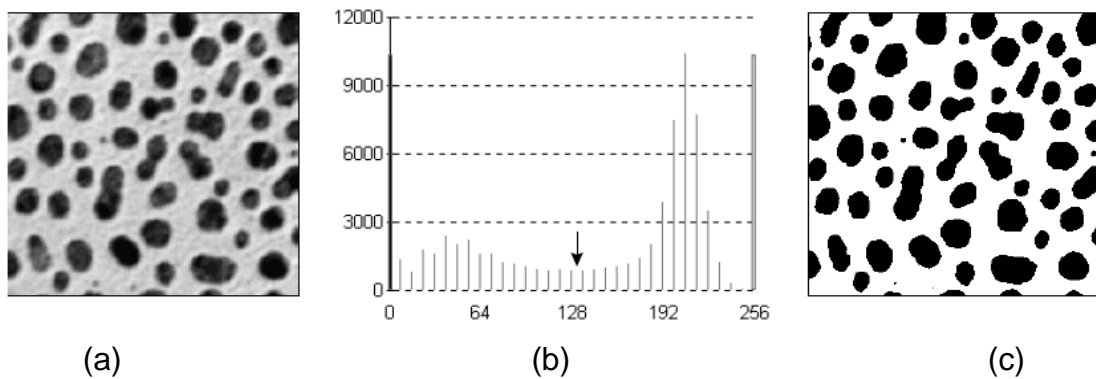


Figura 2.25 – Exemplo de imagem binarizada dado um *threshold* (a) imagem original; (b) limiar de corte; (c) imagem limiarizada

Localizar o vale entre picos de histogramas bimodais não é, geralmente, muito fácil devido ao caráter discreto dos níveis do histograma e à presença de ruído nas imagens. Próximos do vale podem existir diversos mínimos locais, não sendo trivial encontrar automaticamente o melhor limiar. De forma a minimizar este problema, são utilizadas

técnicas para suavizar imagens antes de determinar o histograma e por sua vez o *threshold* ideal.

Algumas imagens podem considerar mais classes de pixels do que apenas “claros” e “escuros” (ex. “quase brancos”, “cinzentos claros”, “cinzentos escuros”, “quase pretos”). Nestes casos os respectivos histogramas devem ser multimodais, procedendo-se à localização de múltiplos limiares de separação nos vales entre modas. Estes limiares também são chamados de multiníveis. Outra forma de aplicar-se a binarização ou outro ajuste de uma imagem, consiste em subdividi-la em várias sub-imagens, determinando-se o histograma de cada uma dessas. Nas sub-imagens em que o histograma seja bimodal determina-se o valor do limiar de separação apropriado. Este método é muitas vezes útil, em especial quando a iluminação da cena é desigual em diferentes partes da imagem.

2.6 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS

Em análise de imagem o resultado pretendido não é, geralmente, outra imagem, mas antes uma descrição. Essa descrição refere-se, em regra, a partes específicas da imagem. O processo de decompor uma imagem nas suas partes constituintes designa-se por segmentação (divisão em segmentos).

Tradicionalmente a segmentação de imagem tem sido vista como um estágio prévio de processamento para reconhecimento ou análise. Criada nos anos 80, a segmentação consiste na primeira etapa de processamento da imagem quando se considera uma análise do ponto de vista da informação nela presente (Fu e Mui, 1981). Até hoje é considerada como uma linha de pesquisa importante do processamento de imagens, principalmente por ela estar na base de todo o processamento da informação.

Segmentar consiste em dividir a imagem em diferentes regiões, que serão posteriormente analisadas por algoritmos especializados em busca de informações ditas de “alto-nível”. É tipicamente usada para localizar objetos e formas (linhas, curvas, etc...) em imagens (Figura 2.26). Em visão computacional, o processo de segmentação divide a imagem em regiões que devem corresponder às áreas de interesse da aplicação. Entende-se por regiões um conjunto de pixels contíguos, com mesmas características e interligados por algum tipo de conectividade.

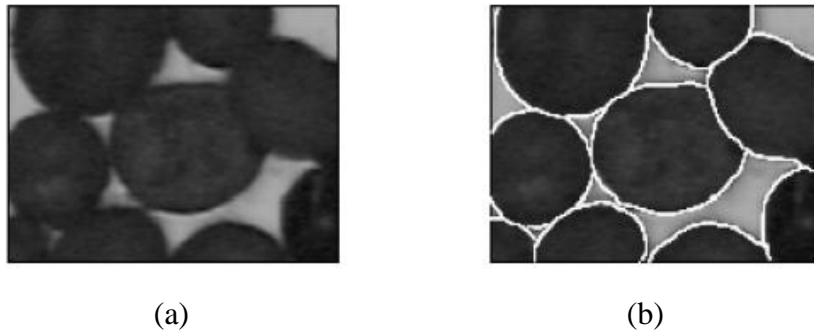


Figura 2.26 – (A) Imagem Original; (B) Exemplo de segmentação, destacando os objetos na imagem (Peccini, G e Ornellas, 2005)

São encontradas na literatura várias classificações de técnicas de segmentação de imagens. Considerando a abordagem adotada por Gonzalez e Woods (1993), os métodos de segmentação são classificados em três categorias básicas:

- Limiarização (*thresholding*);
- Segmentação baseada em bordas;
- Segmentação baseada em regiões.

Algoritmos de segmentação podem ser classificados como manuais, semiautomáticos e automáticos. Em algoritmos de segmentação semiautomáticos a intervenção manual é utilizada para fornecer a região a ser delimitada ou pontos característicos da estrutura a ser segmentada. Na segmentação automática não há intervenção, porém, pode haver eventuais correções no resultado da segmentação.

2.6.1 Limiarização

A limiarização é o método mais simples e intuitivo de segmentação de imagens. Basicamente utiliza um limiar, descrito na seção 2.5.4, para classificar os *pixels* dentro de faixas de intensidades, as quais delimitam uma região de interesse. Esta técnica não permite o conhecimento espacial e também não leva em consideração o ruído que pode ser ocasionado, ou seja, em imagens onde o histograma não contém as classes de níveis de cinza bem definidas, a má definição do limiar pode ocasionar ruídos, produzindo segmentos indesejáveis (Pham e Prince, 1999). Técnicas baseadas em limiarização são muito utilizadas para a segmentação de imagens cujas informações sejam simples, ou seja, seus níveis de cinza podem ser bem diferenciáveis (Figura 2.27) tornando facilmente segmentada.

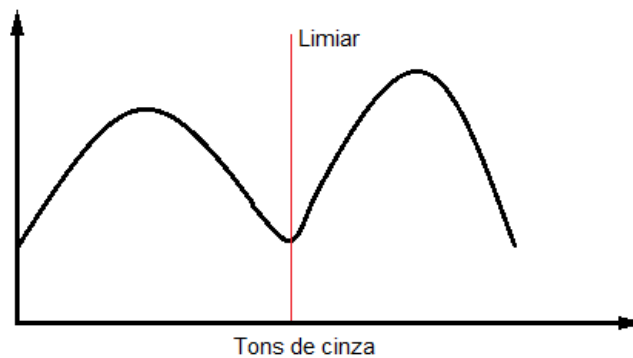


Figura 2.27 – Gráfico de um histograma com seu limiar de corte no processo de segmentação por limiarização

Nessa situação o histograma apresenta dois picos separados por um vale entre eles. Esses picos podem representar duas regiões distintas, como por exemplo, um fundo e um objeto. Seguindo o mesmo raciocínio, se o histograma de uma imagem for tri-modal poderíamos então obter a representação de três regiões distintas, como dois objetos e um fundo.

2.6.2 Segmentação baseada em bordas

A fim de produzir formas e curvas significativas para o possível estudo das características geométricas dos objetos, os algoritmos de segmentação baseados em bordas utilizam mecanismos capazes de interligar os segmentos. Um pequeno ruído encontrado na imagem pode, muitas vezes, conduzir o algoritmo à produção de curvas desconexas e não significativas, impossibilitando a interpolação dos pontos. Os algoritmos de segmentação com base em detecção de bordas analisam as regiões na imagem onde a variação dos tons de cinza ocorre de maneira relativamente abrupta. Estes algoritmos desenvolvidos para detectar essas discontinuidades normalmente usam a convolução, implicando na utilização de máscaras, conforme descrito na seção 2.5.2.

Estas discontinuidades de valores ocorrerem na forma de segmentos, curvas e pontos isolados, a partir delas, são formadas as bordas ou contornos de regiões contidas na imagem. Em muitas imagens, a transição de uma região para outra ocorre de maneira muito sutil, tornando a aplicação de métodos de detecção de bordas uma opção inviável. É necessário o uso de um método capaz de conectar os fragmentos e gerar contornos de forma a aproximar as bordas reais dos objetos. Para isso, são utilizados algoritmos de enlace os quais utilizam técnicas de percurso de grafo para realizar a ligação dos fragmentos. As técnicas de processamento que realizam esse tipo tratamento não serão abordadas neste trabalho, maiores detalhes podem ser encontrados em Hough (1962) e Gonzalez e Woods (1987).

2.6.3 Segmentação baseada em regiões

A segmentação baseada em regiões de imagens define as regiões significativas dentro da imagem procurando similaridades entre elas. As técnicas mais conhecidas desta categoria são denominadas Crescimento de Região (*Region Growing*) e Divisão e Fusão (*Split and Merge*). Diversas propriedades têm sido propostas para caracterizar uma região, tais como intensidade de cinza, textura e em imagens coloridas, cor (Haralick e Shapiro, 1992), (Zamperoni, 1986) e (Grimson e Lozano-Perez, 1987).

a) Crescimento de regiões

O objetivo da técnica de crescimento por regiões é agrupar pixels ou sub-regiões em regiões maiores (Gonzalez e Woods, 1987). Uma abordagem simples é iniciar com um conjunto de pixels denominados sementes e, a partir deles, crescer as regiões anexando os pixels vizinhos que contenham certa similaridade, agrupando sub-regiões em regiões maiores. Os *pixels* sementes podem ser escolhidos de maneira aleatória, determinística ou escolhidos pelo usuário. Esta técnica compara com seu vizinho algum tipo de característica, podendo ser a cor, a intensidade ou textura. Uma maneira simples de agregação para novos pixels é analisar o módulo da diferença entre os tons de cinza dos pixels em questão, ou seja, se este valor for menor que um determinado limiar, então o novo *pixel* é agregado à região (Figura 2.28).

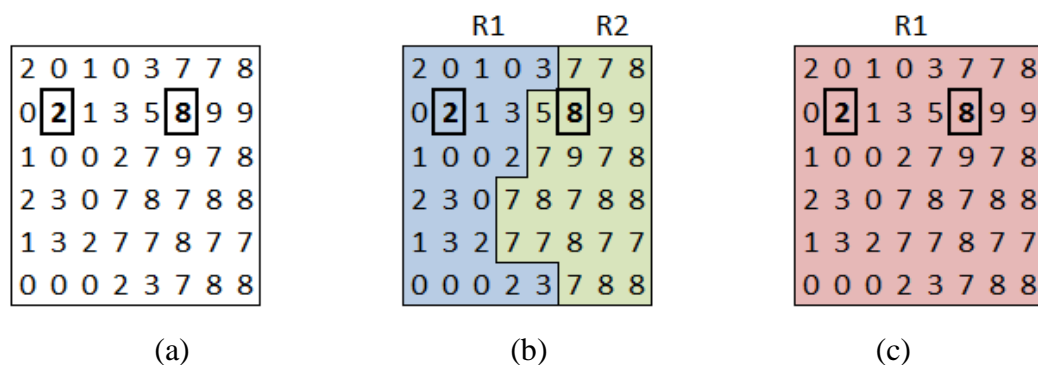


Figura 2.28 – Exemplo de crescimento de regiões (a) imagem original; (b) segmentação utilizando uma diferença absoluta entre os vizinhos menor do que 4; (c) segmentação utilizando uma diferença absoluta menor do que 8

Por trás de seu funcionamento simples, o crescimento de regiões esconde algumas dificuldades relacionadas à sua fundamentação. Uma dessas, diz respeito ao início do processo, que é a escolha de sementes, ou seja, definir qual será o *pixel* inicial o qual a técnica irá iniciar o processo de crescimento. Esta escolha está relacionada diretamente ao tamanho da imagem e a informação que ela representa. Para avaliar o melhor *pixel* inicial muitas vezes

o procedimento é submetido várias vezes até que se encontre um menor tempo total de processamento. Da mesma forma que determinar a condição espacial inicial (i, j), definir a sequência de vizinhos que serão testados implica no tempo de processamento e impedimentos computacionais em alguns casos.

b) Divisão e fusão de regiões

As regiões são de suma importância na análise de imagem, pois elas correspondem aos objetos presentes na cena. Uma imagem, por sua vez pode conter vários objetos, os quais podem conter várias regiões.

Este método é uma alternativa de segmentação baseada em região que não utiliza um conjunto inicial de pontos (sementes) para a resolução da segmentação Gonzalez; Woods (1987). Uma região em uma imagem é um agrupamento de *pixels* conexos com propriedades similares.

A imagem original é dividida recursivamente a partir de seu todo, e as novas partições criadas podem ser ocasionalmente fundidas. O método atua em torno de uma proposição pré-estabelecida. Uma região é dividida em quatro novas regiões (quadrantes) se a proposição for falsa e, por outro lado, duas regiões são fundidas quando a proposição for verdadeira. A proposição aqui discutida define qual propriedade utilizar na subdivisão. Essa questão geralmente requer um conhecimento sobre as características dos objetos presentes na cena. Em algumas aplicações, a variância dos valores de intensidade é usada como medida de dispersão dos valores de cinza de uma determinada região.

Quando fusões desse tipo não forem mais possíveis, o procedimento é terminado por uma fusão final. A Figura 2.29 ilustra uma imagem segmentada em seis regiões distintas, onde inicialmente foi dividida em quatro regiões. O 3º quadrante foi dividido novamente em 4 partes pois o critério utilizado para analisar as características daquela região não teve um nível de homogeneidade aceito. Ao fim da divisão, é realizada a fusão que consiste em unir as regiões vizinhas com a mesma característica.

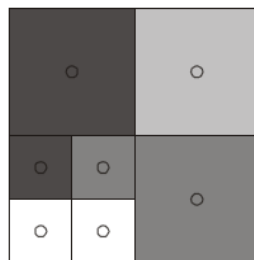


Figura 2.29 – Exemplo de divisão e fusão de regiões com 6 regiões

c) Divisão de águas (*watershed*)

Chamada também de detecção de bacias, este método pode ser visto como uma combinação entre detecção de bordas e junção de regiões. Essa técnica baseia-se no princípio de “inundação de relevos topográficos” (Russ, 1995). Essa abordagem vem do princípio de que uma imagem em níveis de cinza pode ser visualizada como um relevo topográfico, formado por vales, que representam as regiões mais escuras da imagem, e por montanhas, que representam as porções mais claras (Roerdink, Jos B. T. M.; Meijster e Arnold, 2001). É possível visualizar a “inundação” de duas maneiras distintas: a água vinda de cima, como se fosse chuva, ou vinda de baixo, como se o relevo estivesse perfurado nos pontos de altitude mínima e fosse imerso em um lago (Roerdink, Jos B. T. M.; Meijster e Arnold, 2001).

Conforme as bacias vão sendo inundadas (Figura 2.30), águas provenientes de diferentes bacias se unem, este processo leva o nome de *watersheds*. Quando a água atinge o maior pico no relevo, o processo termina (Meyer, 1994). O resultado da inundação é a separação das regiões que compõem a imagem delimitada pelas linhas divisórias das bacias. Essas linhas definem o contorno dos objetos da imagem. A imersão é realizada a partir de mínimos locais localizados na base das bacias.

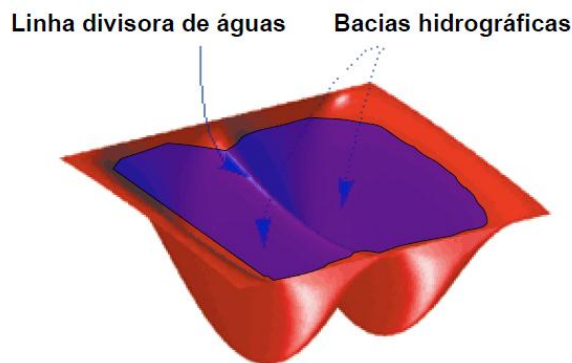


Figura 2.30 – Segmentação por divisor de águas, na qual a imersão é realizada a partir de mínimos regionais localizados na base das bacias

Uma limitação desta técnica é que o processo de imersão é muito sensível ao ruído, o qual ocorre geralmente nos valores mínimos e máximos na imagem. Na literatura podemos encontrar alguns algoritmos desenvolvidos para segmentar imagens por divisor de águas, os quais podem ser classificados como algoritmos sequenciais (Beucher e Lantuejoul, 1979), (Meyer e Beucher (1990), (Meyer, 1994) e (Vincent e Soille, 1991), algoritmos paralelos (Roerdink, Jos B. T. M.; Meijster e Arnold, 2001), (Meijster, A; Roerdink, J B T M, 1995) e (Bieniek et al., 1997).

d) Comparativo das técnicas

A primeira técnica de segmentação abordada nesta seção, não traz a informação espacial das regiões de interesse. A segmentação baseada em bordas visa à detecção de pontos e linhas onde se podem detectar contornos de objetos, porém ela é sensível a ruídos e imperfeições na imagem.

O método de divisão e fusão oferece um baixo desempenho ao segmentar conjunto de imagens 3D, pois utiliza um grande recurso de memória para armazenar os índices, já que tem que dividir todo o vetor de dados tridimensionais. O uso do método de detecção de bacias é o mais rápido computacionalmente, porém só funciona para imagens 2D, descartando a sua possibilidade de uso.

Já a técnica de detecção baseada em regiões é praticamente imune a ruídos, pela razão de usar um critério de homogeneidade, além de permitir extrair detalhes no domínio espacial de uma matriz de dados 3D. Dentre as três técnicas apresentadas nesta seção o método com crescimento em regiões oferece melhores resultados ao analisarem-se imagens ou conjunto de imagens com resolução baixa. Este é o caso dos dados medidos pelo sensor *wire-mesh*, que possibilitam ao algoritmo segmentar corretamente regiões que têm propriedades similares mesmo com seus *pixels* espacialmente afastados.

3 DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento do *software*, foi utilizada a ferramenta de desenvolvimento (Integrated Development Environment - *IDE*) Embarcadero Rad Studio em sua versão 2010 – 14.03615. Este programa permite o desenvolvimento do software na linguagem Pascal hibridamente com C++. O *software* desenvolvido dispõe de uma função de ajuda para facilitar seu entendimento, cujo resumo pode ser observado no apêndice B. Diversos testes com valores sintéticos e medidos experimentalmente foram submetidos de forma a assegurar a confiabilidade do algoritmo.

3.1 DADOS DE ENTRADA

Conforme já descrito na seção 2.4, o sensor *wire-mesh*, fornece valores de tensão da malha de eletrodos a fim de gerar uma imagem da seção transversal da tubulação. Estes dados são armazenados pelo *software* na memória do computador a partir do arquivo “.V”, que será descrito em detalhes na seção 4.1. Para o sensor com configuração 8×8 um *frame* contém 64 *voxels* de fração de vazio, que são inseridos em uma matriz tridimensional $\mathbf{M}(i, j, k)$ alocada na memória do computador, onde i e j representam os índices espaciais e k o índice temporal. O índice k traz também a informação de quantas leituras foram realizadas (Figura 3.1).

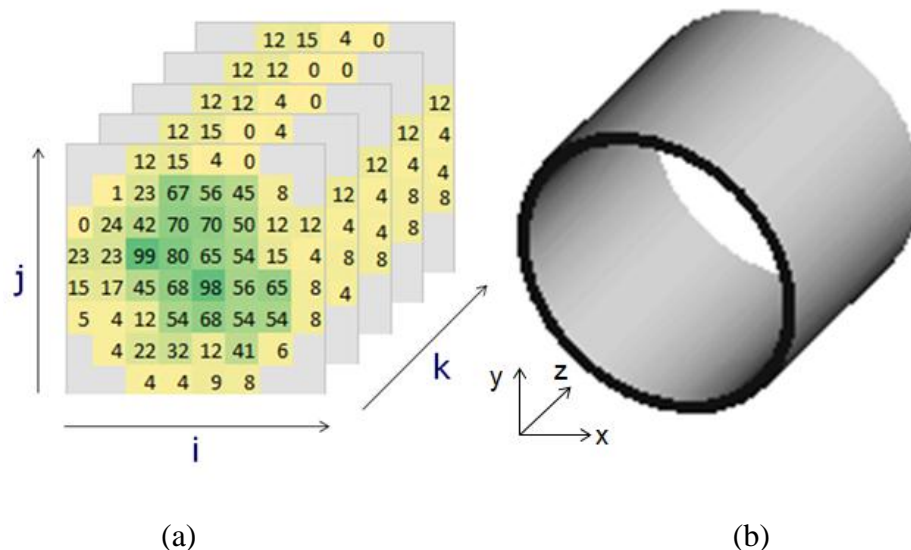


Figura 3.1 – (a) Ilustração da matriz \mathbf{M} contendo os valores de fração de vazio; (b) Definição de coordenadas espaciais.

Podem-se usar algumas técnicas para ilustrar a reconstrução das imagens em seus cortes axiais (Figura 3.2). Desta forma, o algoritmo combina em sequência os quadros 2D no domínio do tempo e depois apresentada uma vista do eixo z a partir da matriz 3D. Esta técnica

permite criar a impressão de uma vista lateral sobre o fluxo na tubulação. De forma a reduzir os ruídos oriundos foi utilizado para cada frame lido o uso de filtros lineares passa-baixa 3×3 para minimizar efeitos de ruído, sem alterar o nível médio de cinza da imagem. Este processo é opcional apenas melhorando o aspecto de visualização do escoamento.

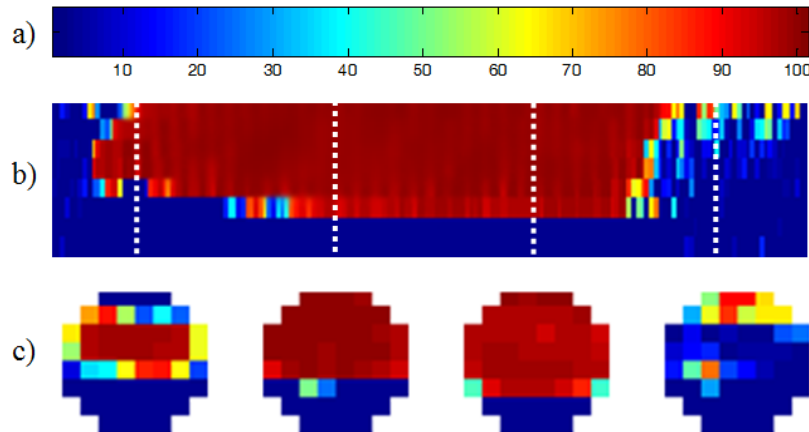


Figura 3.2 – (a) Paleta de cores; (b) corte axial-x vista lateral da vista lateral; (c) cortes transversais do escoamento.

3.2 ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DE BOLHAS

O principal processamento desse estudo é a identificação das bolhas nos dados adquiridos pelo sensor, pois permite estudar tanto as golfadas quanto as pequenas bolhas que a acompanham. A identificação das bolhas no domínio espacial é baseada na extração de alguns parâmetros quantitativos, tais como a quantidade, as dimensões, comprimento, largura e altura de bolhas em *pixels*. Para este estudo foi utilizado o método de segmentação por regiões baseado no crescimento de *pixels*, conforme descrito em 2.6.2.

a) Vizinhança

Na matriz \mathbf{M} , cada *voxel* p nas coordenadas $\mathbf{M}(i, j, k)$ possui 26 vizinhos. Esse tipo de vizinhança se aplica apenas aos *voxels* que tenham sua vizinhança completa, ou seja, não estão em nenhuma parte da borda. A vizinhança determina a forma como o algoritmo de segmentação irá analisar os *voxels* vizinhos.

b) *Threshold* ou Limiar

Para localizar as bolhas, é necessário o uso de um algoritmo recursivo no espaço 3D. Este processo requer um limiar que diferencie uma substância da outra (*Threshold*), neste estudo foi utilizado o valor de fração a vázuo (0-100) %, onde 0 % é água e 100 % é gás. Por analisar apenas duas fases do escoamento, esse limiar binariza a informação, ou seja:

Se $\mathbf{M}[i, j, k] \geq 50\%$, = 1

Se $\mathbf{M}[i, j, k] < 50\%$, = 0

Na Figura 3.3, observa-se um *frame* (a) original e em (b) um limiarizado com 50% de fração de vazio. Desta forma é possível identificar a fronteira e avaliar quais *voxels* são de gás e quais são de líquido. A informação é alocada em uma matriz secundária e não altera os valores originais da medida, servindo apenas para delimitar as regiões dos *voxels*. O valor desse limiar é definido pelo usuário que configura o *software*.

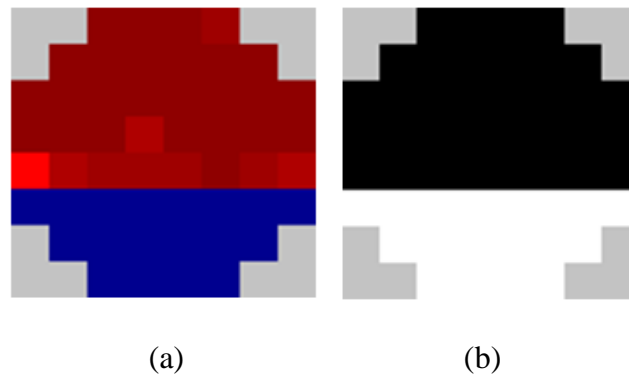


Figura 3.3 – (a) *Frame* com informações originais, (b) *frame* limiarizado com 50% de fração de vazio

c) Algoritmo de segmentação

Este algoritmo varre a matriz de dados $\mathbf{M}(i, j, k)$ procurando o correspondente que satisfaça a condição do limiar definido, onde i, j e $k = 0$. Para auxiliar a determinação da posição das bolhas, é criada uma matriz de identificação $\mathbf{IM}(i, j, k)$ de mesmo tamanho de \mathbf{M} . São realizadas três verificações para agregar o *voxel* ao conjunto de dados. O primeiro teste é verificar se ele faz parte da área “útil” do *wire-mesh*, ou seja, se o *voxel* não corresponde a nenhum dos outros fora da área de interesse, representados pela máscara ilustrada na Figura 3.4. A matriz $\mathbf{IM}(i, j, k)$ já contém essa máscara implementada onde os *voxels* $p(i, j, k)$ da parede do tubo são representados pelo valor 255.

A segunda análise realizada é se este *voxel* já foi testado anteriormente. Esta informação pode ser extraída da matriz de identificação $\mathbf{IM}(i, j, k)$, onde se o valor for “0” o *voxel* ainda não foi analisado. A última análise é verificar o nível de limiar na matriz de dados $\mathbf{M}(i, j, k)$, neste caso o valor de fração de vazio. Se o valor contido na matriz for maior do que o valor definido para o limiar o *voxel* em questão, uma bolha ou parte dela é identificada. Na

Figura 3.5, analisando o valor do *voxel* $i=2$ e $j=0$ em destaque, é inserido um identificador na matriz **IM** pelo fato da fração de vazio ser maior que o limiar de 60%.

255	255	0	0	0	0	255	255
255	0	0	0	0	0	0	255
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
255	0	0	0	0	0	0	255
255	255	0	0	0	0	255	255

Figura 3.4 – Máscara do sensor *wire-mesh* 8×8

Matriz de dados (M)

0	0	90	92	96	98	0	0
0	90	87	85	80	90	92	0
87	90	92	88	95	91	90	93
25	88	87	86	88	36	24	30
20	40	84	82	32	6	80	75
12	4	3	2	4	5	67	65
0	2	3	5	4	6	10	0
0	0	2	3	3	4	0	0

Matriz de identificação (IM)

255	255	1	0	0	0	255	255
255	0	0	0	0	0	0	255
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
255	0	0	0	0	0	0	255
255	255	0	0	0	0	255	255

Figura 3.5 – Identificação da bolha, analisando o valor do *voxel* $i=2$ e $j=0$, insere-se um identificador na matriz **IM** para frações de vazio maiores que 60% (cor em vermelho representa o gás e em azul a fase líquida)

Para cada *voxel* que satisfazer a condição é inserido o valor do contador na matriz de identificação. Este processo é chamado de *labeling*, ou seja, ele rotula os *voxels* que compõem a bolha com um identificador sequencial, utilizado mais tarde para buscar a bolha como uma

região no espaço 3D da matriz de dados $M(i, j, k)$. Assim que é inserido o primeiro identificador, o algoritmo analisa os vizinhos do *voxel* (Figura 3.6).

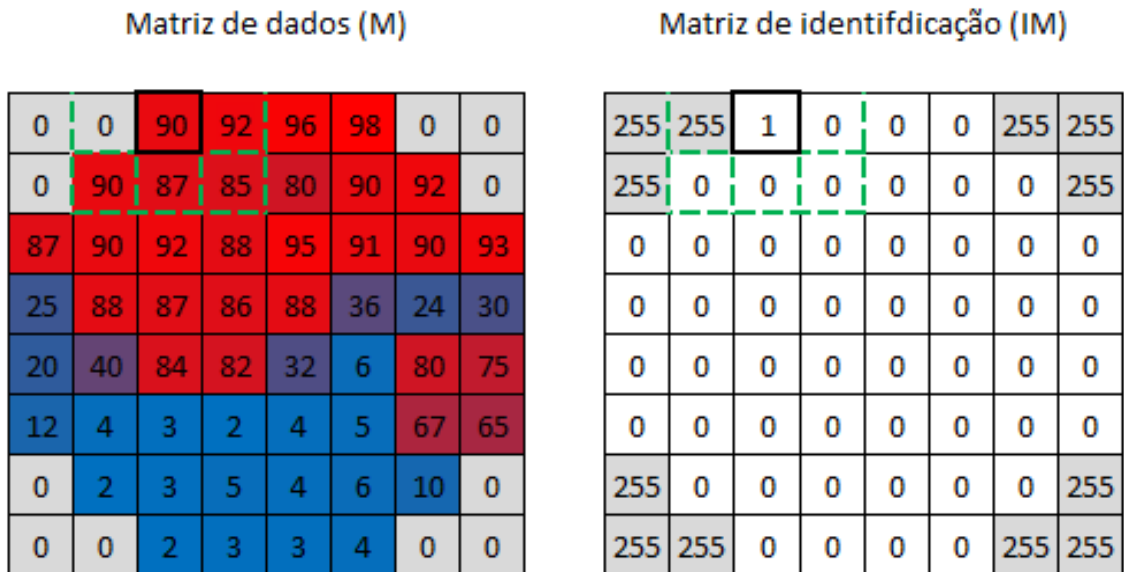


Figura 3.6 – Representação da vizinhança do *voxel* $i=2$ e $j=0$ em análise

Ao analisar o *voxel* vizinho, os testes são novamente repetidos, porém há a possibilidade de mais pontos satisfazerem todas as condições, para isso o algoritmo utiliza a técnica de recursividade, armazenando os *voxels* que ainda devem ser analisados (Figura 3.7).

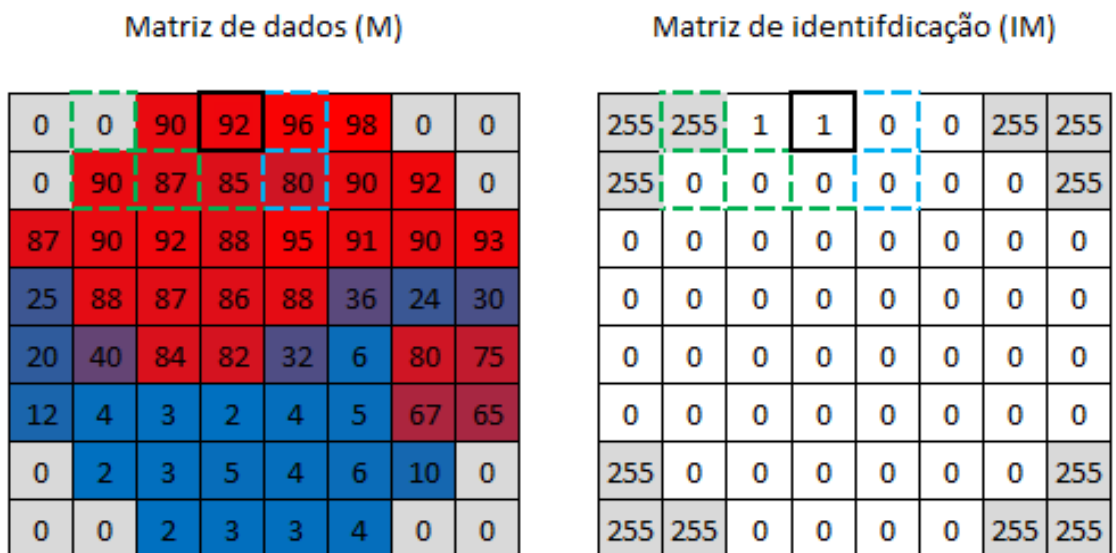


Figura 3.7 – Representação dos vizinhos do *voxel* $i=3$ e $j=0$ em espera devido ao fator de recursividade do algoritmo

A recursividade apresenta vários níveis e é necessário sempre armazenar essa informação para que o *voxel* não seja perdido (Figura 3.8).

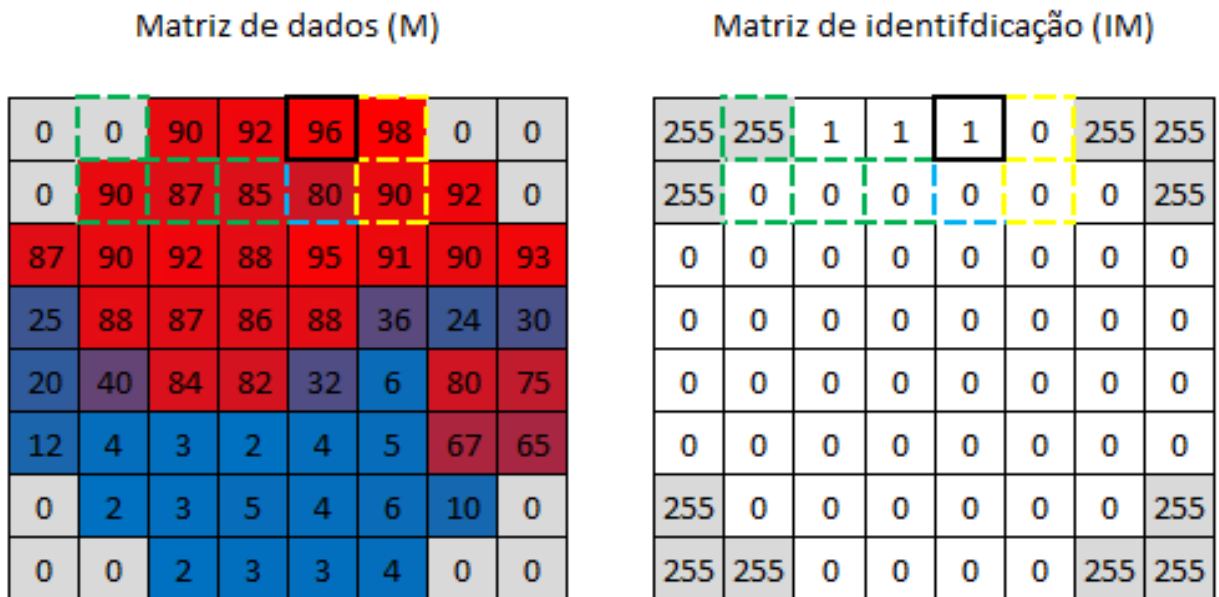
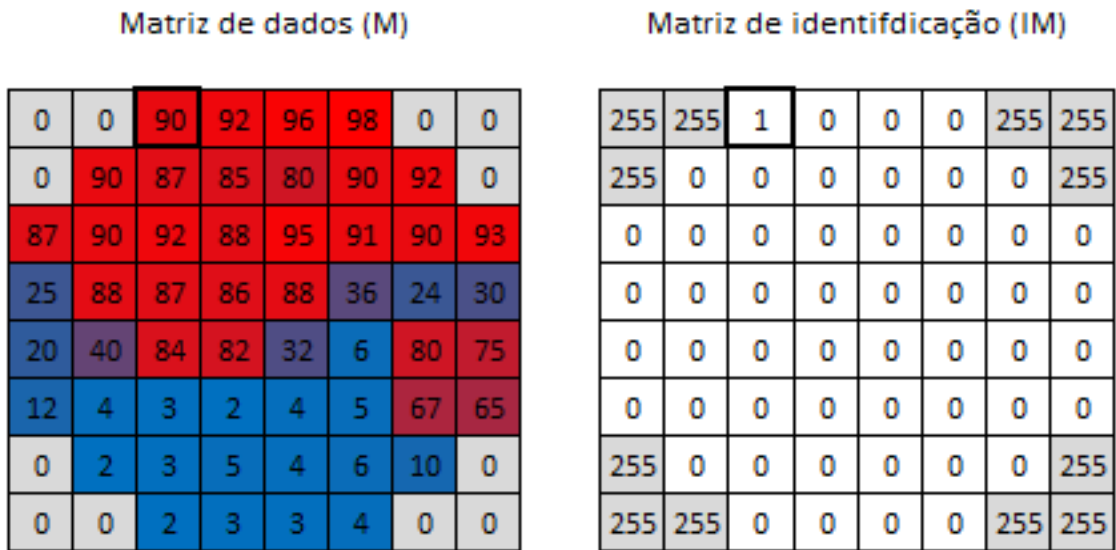
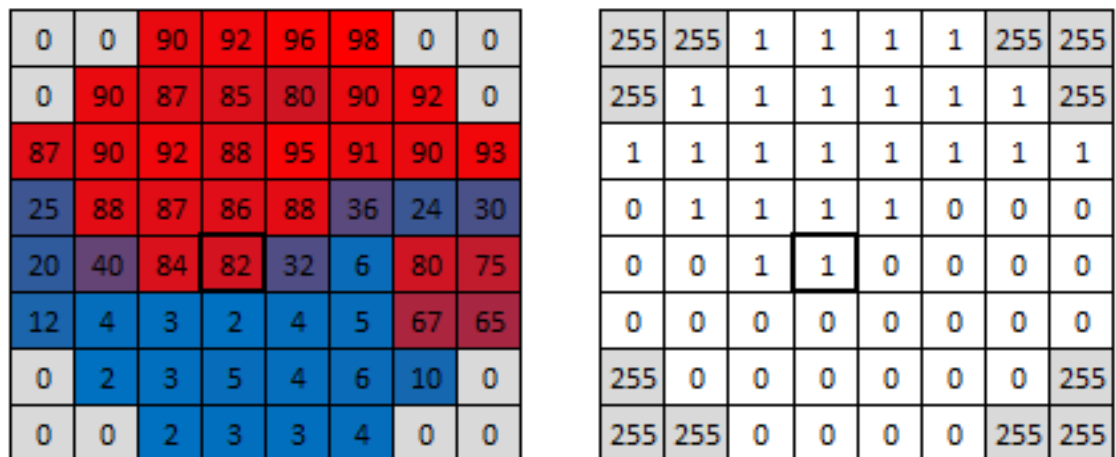


Figura 3.8 – Recursividade dos *voxels* em vários níveis

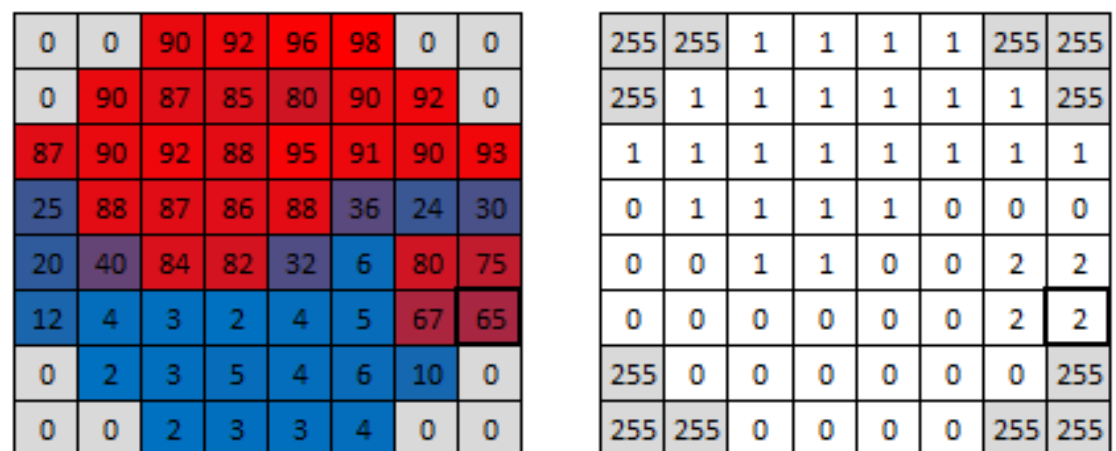
Este processo se repete e pode ser visualizado na Figura 3.9. Pela dificuldade de ilustrar as três dimensões, a figura apresenta o reconhecimento de 2 bolhas no plano (k), porém o algoritmo realiza a varredura para os planos (k-1) e (k+1). O *voxel* em questão recebe o nome de “semente pai” e seus vizinhos que satisfizeram as premissas recebem o nome de “semente filha”. Apenas o *voxel* inicial não tem uma semente pai. O algoritmo recursivo guarda a informação espacial dos vizinhos e após testar todos, os *voxels* que contiverem o mesmo identificador na matriz **IM** representam uma bolha. Para buscar as demais bolhas, o processo de detecção é novamente iniciado do ponto $i=0, j=0, k=0$, repetindo os testes novamente até que não existam mais *voxels* a serem analisados.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.9 – Ilustração da identificação de bolhas (pseudo visualização em 2D); (a) início da segmentação; (b) detecção da primeira bolha; (c) detecção da segunda bolha

A Figura 3.10 apresenta uma ilustração de três bolhas detectadas em um conjunto 3D de dados.

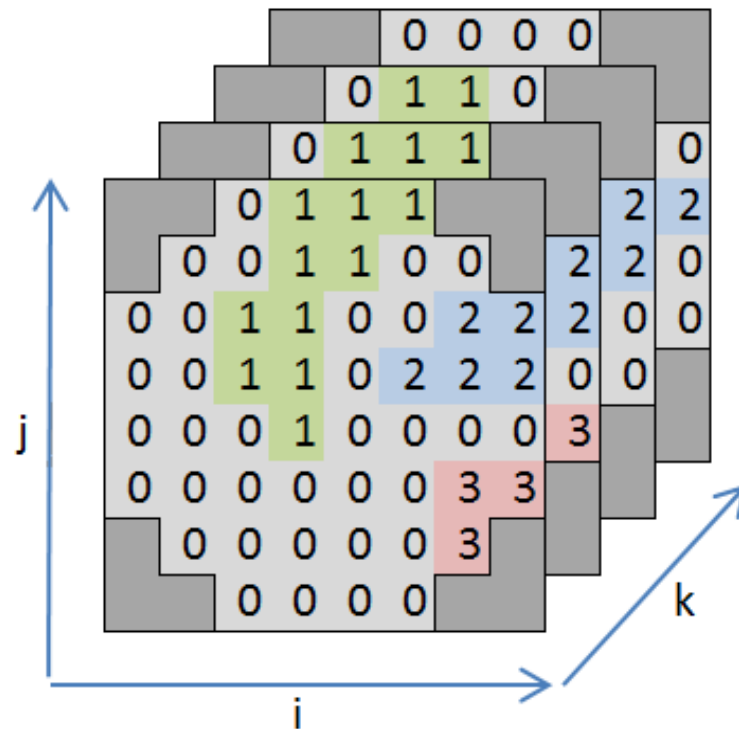


Figura 3.10 – Representação das bolhas detectadas no espaço tridimensional e nomeadas pelo processo de segmentação

A função $f_{segmentação}$ é responsável por inicializar o processo encontrando a primeira semente válida e recebendo o limiar relativo à fração de vazio. A função $f_{identifica_bolha}$ é chamada ao encontrar a primeira semente. Para cada *voxel* de $\mathbf{M}(i, j, k)$ que satisfazer a condição, $\mathbf{IM}(i, j, k)$ receberá o identificador corrente da bolha, representado neste pseudo-código por *bolha_id*, visualizado na linha 20 da Figura 3.11. Neste pseudo-código não estão implementadas as rotinas de verificação de erros a acessos inexistentes da matriz e inicialização de variáveis.

```

1  function f_segmentacao(limiar: integer);
2  var
3      i,j,k : integer;
4  begin
5      bolha_id:=0;
6      for k := 0 to num_frames - 1 do
7          for i := 0 to sensor_X - 1 do
8              for j := 0 to sensor_Y - 1 do
9                  if ((IM[i,j,k]= 0) and (M[i,j,k] >= limiar)) then
10                     begin
11                         bolha_id:=bolha_id+1;
12                         f_identifica_bolha(i,j,k,limiar,1);
13                     end;
14             end;
15
16         function f_identifica_bolha(i,j,k,limiar: integer);
17         begin
18             if (IM[i,j]= 0) then
19                 begin
20                     IM[i,j]:=bolha_id;
21                     if M[i,j,k+1] >= limiar then
22                         f_identifica_bolha(i,j,k+1,limiar);
23                     else
24                         if M[i,j,k-1] >= limiar then
25                             f_identifica_bolha(i,j,k-1,limiar);
26                         else
27                             if M[i+1,j,k] >= limiar then
28                                 f_identifica_bolha(i+1,j,k,limiar);
29                             else
30                                 if M[i-1,j,k] >= limiar then
31                                     f_identifica_bolha(i-1,j,k,limiar);
32                                 else
33                                     if M[i,j+1,k] >= limiar then
34                                         f_identifica_bolha(i,j+1,k,limiar);
35                                     else
36                                         if M[i,j-1,k] >= limiar then
37                                             f_identifica_bolha(i,j-1,k,limiar);
38                                         else
39                                             if M[i+1,j+1,k] >= limiar then
40                                                 f_identifica_bolha(i+1,j+1,k,limiar);
41                                             else
42                                                 if M[i+1,j-1,k] >= limiar then
43                                                     f_identifica_bolha(i+1,j-1,k,limiar);
44                                                 else
45                                                     if M[i-1,j+1,k] >= limiar then
46                                                         f_identifica_bolha(i-1,j+1,k,limiar);
47                                                     else
48                                                         if M[i-1,j-1,k] >= limiar then
49                                                             f_identifica_bolha(i-1,j-1,k,limiar);
50                                                     end;
51                             end;
52                         end;
53                     end;
54                 end;
55             end;
56         end;
57     end;
58 end;

```

Figura 3.11 – Pseudo código para a identificação de bolhas.

Quando o algoritmo de identificação completa o rastreamento das bolhas, é possível utilizar algumas técnicas para analisar esses dados e extrair os resultados de interesse.

3.2.1 Número de bolhas

No algoritmo de segmentação no espaço 3D, quanto maior a resolução do sensor, maior será a capacidade de detectar bolhas de menor dimensão. Para determinar-se o número total de bolhas, basta analisar-se o último valor inserido na matriz de identificação, que corresponderia a “3” no caso da Figura 3.10.

3.2.2 Série Temporal

Nem todos os parâmetros de interesse necessitam do processo de segmentação para serem extraídos das informações geradas pelo sensor *wire-mesh*. A série temporal é uma forma de representar os valores médios de fração de vazio da seção com base no tempo. Ao integrar-se os valores de fração de vazio da seção transversal obtêm-se a série temporal para a seção

$$\alpha(k) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n A_{i,j} \cdot \alpha(i, j, k) \quad (3.1)$$

onde n é o número de fios para a configuração do sensor e $A_{i,j}$ é o coeficiente de contribuição para cada cruzamento, pois algumas áreas localizadas próximas à parede do tubo não tem seu campo de medição completo como demonstrado na Figura 3.12.

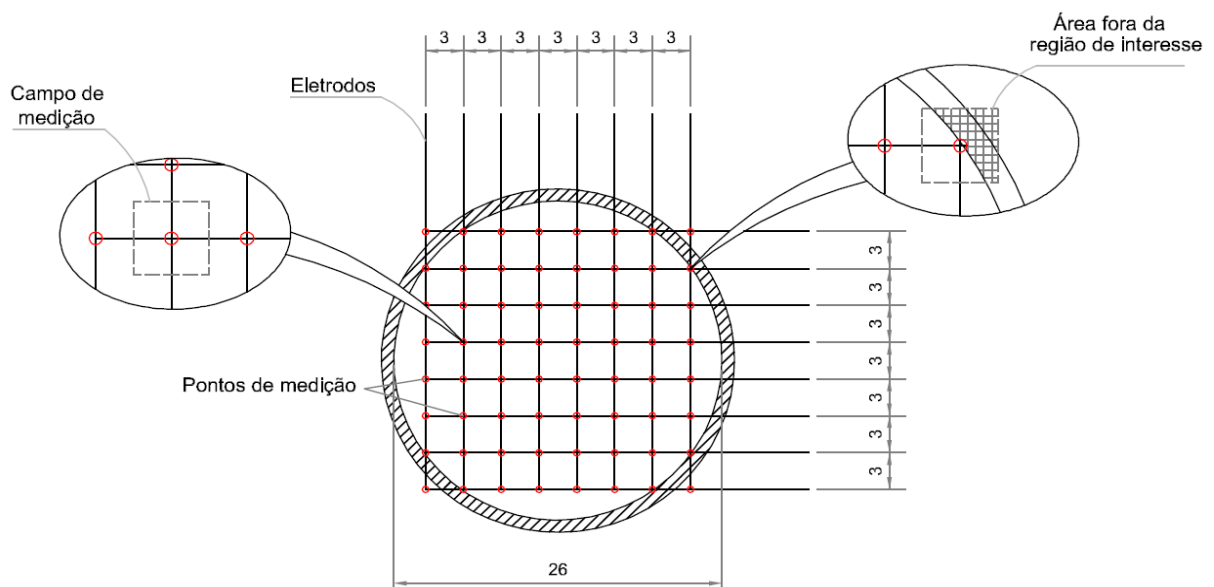


Figura 3.12 – Ilustração dos campos de medição pelo sensor *wire-mesh* Soares (2010)

Os coeficientes de contribuição (Figura 3.13) são valores das frações das áreas dos campos de medição em relação à área total da seção de escoamento consideradas para cada ponto de cruzamento, conforme equação (3.2).

$$\alpha_{i,j} = \frac{4A_{Campo}}{\pi d^2} \quad (3.2.)$$

A matriz de coeficientes é utilizada para remover os pontos de medição localizados fora da tubulação ou pontos muito próximos à parede e compensar pequenas áreas não alcançadas por nenhum campo (Figura 3.13). O valor mais comum, 0,0169514, corresponde à área de 9 mm² dos campos quadrados existentes na região interior da tubulação. Correções são necessárias nas regiões próximas às paredes, por isso os valores mais externos da matriz são diferentes dos valores na região interior. Os zeros localizados nas extremidades da matriz anulam as medições fora da tubulação. Todas as áreas internas são atribuídas a pontos de medição, cuja soma de todos os termos deve ser unitária.

$$A(i, j) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,0223183 & 0,0219446 & 0,0219446 & 0,0223183 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0258629 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0258629 & 0 \\ 0,0223183 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0223183 \\ 0,0219446 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0219446 \\ 0,0219446 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0219446 \\ 0,0223183 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0223183 \\ 0 & 0,0258629 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0169514 & 0,0258629 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0223183 & 0,0219446 & 0,0219446 & 0,0223183 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 3.13 – Matriz de coeficientes para a correção da fração de vazio

3.2.3 Velocidade da frente da bolha (m/s)

Um parâmetro relevante para o desenvolvimento de modelos teóricos é a velocidade da fase dispersa. Para tanto, é necessário o uso de dois sensores *wire-mesh*, neste estudo espaçados em 14 cm. Através da medida de tempo de percurso de uma bolha ou pistão é possível determinar-se a velocidade média do nariz ou da cauda da bolha. Para a extração destes parâmetros, a leitura dos sensores é sincronizada e processada da mesma forma, resultando em duas matrizes $\mathbf{M}_1(i, j, k)$ e $\mathbf{M}_2(i, j, k)$ com suas bolhas mapeadas no espaço 3D. Para identificar o tempo de percurso é necessário relacionar a mesma bolha nas medidas dos dois sensores. Um algoritmo de correlação analisa todas as bolhas do escoamento tentando

relacionar os dados de ambos os sensores. O algoritmo busca na matriz de identificação o *voxel* da bolha nº1 que contenha menor valor de k (K_{F1}).

O próximo passo é buscar a mesma bolha no sensor nº 2. Como a leitura está sincronizada, a bolha que tiver a condição: $K_{F1} \leq \min(K_{F2})$ é a coordenada k para o sensor 2 (Figura 3.14), onde K_{F1} é a coordenada k para a bolha do sensor 1 e K_{F2} ,

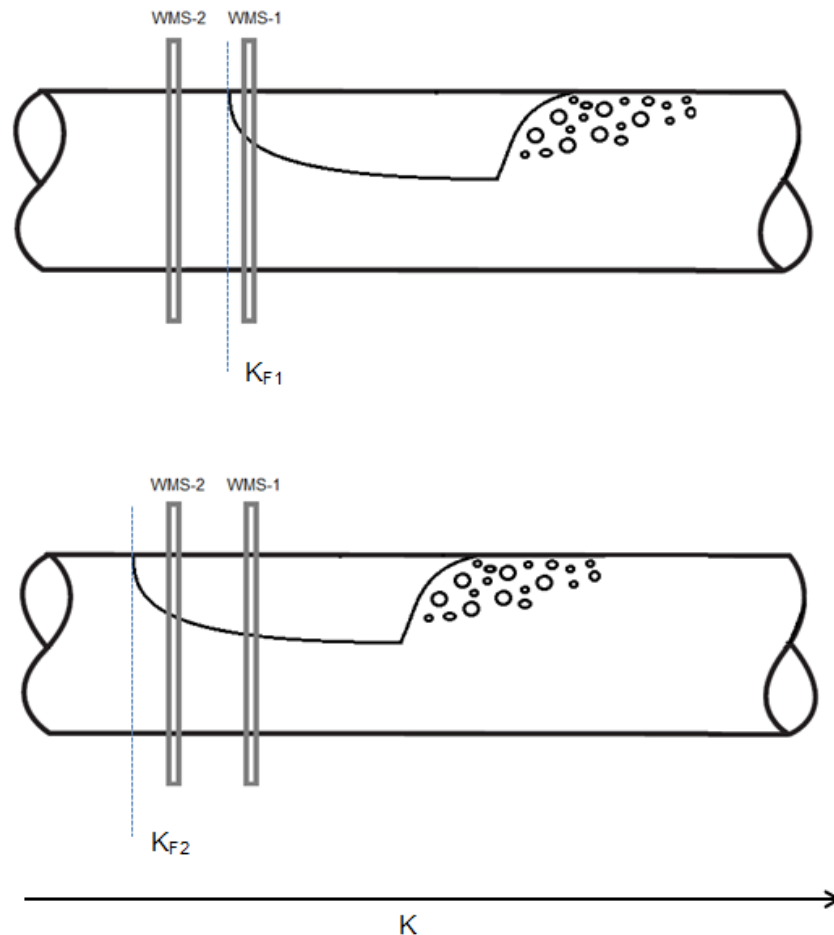


Figura 3.14 – Detecção de uma bolha pelos dois sensores através de um método de correlação

Sabendo-se a posição de cada bolha é possível determinar o tempo de percurso desta bolha de um sensor ao outro. Observa-se que mesmo com uma distância relativamente pequena entre os dois sensores é possível ocorrer a coalescência de duas ou mais bolhas nesse espaçamento. Além da correlação das bolhas descrita acima com base no tempo, o comportamento volumétrico das bolhas é analisado. Para qualquer alteração de volume acima de 15% entre a medição do sensor 1 e 2, a bolha é descartada. Desta forma é possível evitar-se que bolhas coalescidas ou que se dividiram interfiram na correlação de outras bolhas no algoritmo.

Conhecendo a distância entre os sensores (D_s) e a frequência de aquisição (f_s) obtêm-se velocidade de translação de cada bolha (U_{BF}) (Figura 3.15). Utilizando a mesma técnica para encontrar a velocidade de translação da bolha, é possível detectar-se o fim de cada bolha (K_{R1} e K_{R2}). Desta forma temos que a velocidade traseira (U_{BR}).

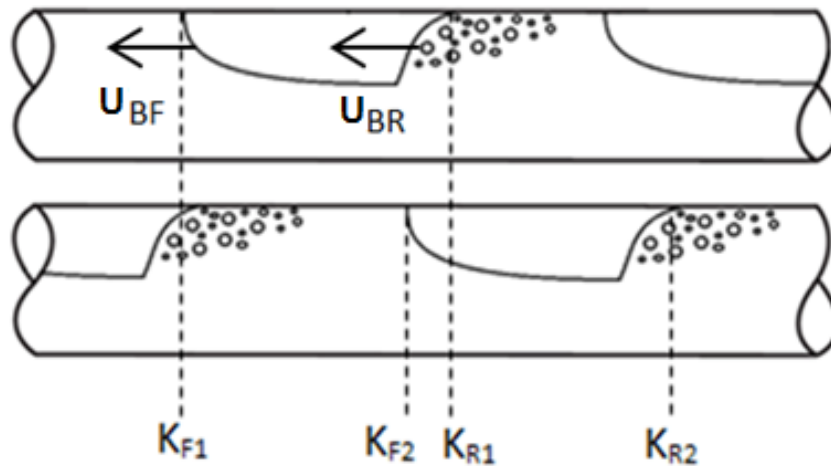


Figura 3.15 – Ilustração dos vetores de velocidade no nariz e cauda da bolha

$$U_{BF} = \frac{D_s}{|K_{F2} - K_{F1}|} \cdot \frac{1}{f_s} \quad (3.3)$$

$$U_{BR} = \frac{D_s}{|K_{R2} - K_{R1}|} \cdot \frac{1}{f_s} \quad (3.4)$$

3.2.4 Comprimento da bolha e pistão

Com a técnica de medição do *wire-mesh* é possível extrair as dimensões nos três eixos de cada componente da célula unitária. Para as coordenadas X e Y , este valor é o tamanho do espaçamento entre os fios do sensor, nesse estudo 3 mm. Para determinar o valor da profundidade do *voxel* é necessário obter a relação de velocidade da bolha entre os dois sensores. Em uma célula unitária os campos de velocidade não são uniformes, tendo direções e valores diferentes. Nesse estudo foi observado em testes empíricos que as velocidades do nariz da bolha e sua cauda se comportam de forma diferente. Devido a isso, foi estabelecido que os *voxels* que compõem a bolha de Taylor se propagam a uma velocidade média entre os valores de velocidade da frente (U_{BF}) e da cauda (U_{BR}).

A razão definida pela distância entre os sensores (D_S), e a distância k média da célula unitária do sensor 1 e sensor 2, ou seja a soma da distância de atraso da bolha e do pistão ($\Delta K_B + \Delta K_S$) (Figura 3.16), resulta no tamanho da componente k do *voxel* (ΔZ).

$$Z_B = \frac{D_S}{\left| \frac{\Delta K_B + \Delta K_S}{2} \right|} \quad (3.5.)$$

É possível calcular-se o tamanho do pistão usando a fórmula abaixo. Através de observações assume-se que as bolhas pequenas no pistão se comportam com velocidade relativamente próxima da cauda da bolha de Taylor, desta forma utilizamos a razão de *voxel* apenas da traseira da bolha.

$$Z_S = \frac{D_S}{\Delta K_S} \quad (3.6.)$$

Para melhorar esta informação, o cálculo é realizado para cada bolha, reduzindo a incerteza de uma bolha para a outra. Após obterem-se as dimensões X , Y , Z do *voxel*, multiplica-se pelo número de *voxels* nos eixos para obter-se a largura (ΔX), altura (ΔY), comprimento da bolha (L_B) e comprimento do pistão (L_S) (Figura 3.16).

$$L_B = Z_B \cdot n_B \quad (3.7.)$$

$$L_S = Z_S \cdot n_S \quad (3.8.)$$

onde, n_B e n_S , representam o comprimento em unidade de *pixels* da bolha e do pistão respectivamente

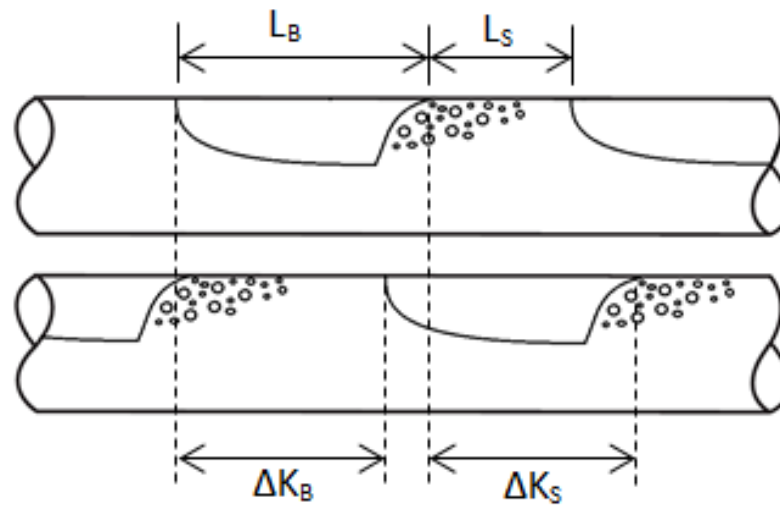


Figura 3.16 – Componentes das dimensões da célula unitária

3.2.5 Frequência de passagem de bolhas

A frequência da célula unitária é um importante parâmetro na caracterização de escoamentos em golfadas. Esta frequência é dada pelo inverso do período t que a bolha alongada e o pistão de líquido levam para percorrer uma seção transversal de referencia.

$$f_B = \frac{1}{t} \quad (3.9.)$$

Pode-se definir a frequência de passagem de bolhas por:

$$f_B = \frac{U_{BF}}{L_B + L_S} \quad (3.10.)$$

onde, U_{BF} é a velocidade da frente da bolha, L_B o comprimento da bolha e L_S o comprimento do pistão.

3.2.6 Volume

A determinação do volume da bolha de Taylor é também importante para este estudo, pois possibilita a validação da técnica proposta e dos demais parâmetros.

$$V_B = \Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta Z \cdot \sum_{i,j,k} \alpha(i,j,k) \forall (i,j,k) \in Bolha \quad (3.11.)$$

onde $\alpha(i, j, k)$ representam a fração de vazio no ponto e ΔX e ΔY são constantes do sensor definidos por:

$$\Delta X \cdot \Delta Y = A_{i,j} \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.12.)$$

onde, ΔZ corresponde à distância no eixo k calculado anteriormente. Desta forma concluímos que o volume é dado por:

$$V_B = \sum \left(A_{i,j} \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot \Delta Z_B \cdot \alpha(i, j, k) \forall (i, j, k) \in Bolha \quad (3.13.)$$

É possível determinar também o volume das bolhas que se localizam no pistão:

$$V_S = \sum \left(A_{i,j} \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot \Delta Z_S \cdot \alpha(i, j, k) \forall (i, j, k) \in Pistão \quad (3.14.)$$

Por fim, o volume total da medida realizada é definido por:

$$V_T = V_B + V_S \quad (3.15.)$$

3.2.7 Vazão de gás

A vazão pode ser definida como sendo a quantidade volumétrica ou mássica de um fluido que escoar através de uma seção de uma tubulação ou canal por unidade de tempo. Nesse estudo mede-se a vazão volumétrica de gás, que é definida pelo volume de gás que escoar através de certa secção em um intervalo de tempo considerado.

Extrair a vazão de gás (Q) permite confrontar os dados com os instrumentos na planta de teste, como o rotâmetro. Podemos calcular a vazão pela razão do volume total (V_T) de gás sobre o tempo de medida. O tempo é definido pelo número de *frames* (N) multiplicado pelo inverso da frequência (f) de aquisição.

$$Q = \frac{V_T}{\left(N \cdot \frac{1}{f}\right)} \quad (3.16.)$$

3.2.8 Fração de vazio média do escoamento

Podemos obter o valor da fração de vazio média do escoamento com a equação abaixo, onde n representa a configuração de malha do sensor, $A_{i,j}$ o coeficiente de participação do cruzamento de cada malha e n_F o número de *frames* da leitura.

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n_F} \cdot \sum_{k=1}^{n_F} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n A_{i,j} \cdot \alpha(i, j, k) \quad (3.17.)$$

3.2.9 Fração de vazio média no pistão de líquido

Para determinar o α médio no pistão de líquido da célula unitária, busca-se na matriz 3D a informação do início e fim de cada bolha. Com esta informação podemos separar apenas o espaço do pistão de líquido. Onde KB_1R é o *frame* que representa o fim da bolha e início do pistão de líquido, e KB_2F é o *frame* inicial da segunda bolha, ou seja, o fim do pistão de líquido (Figura 3.17).

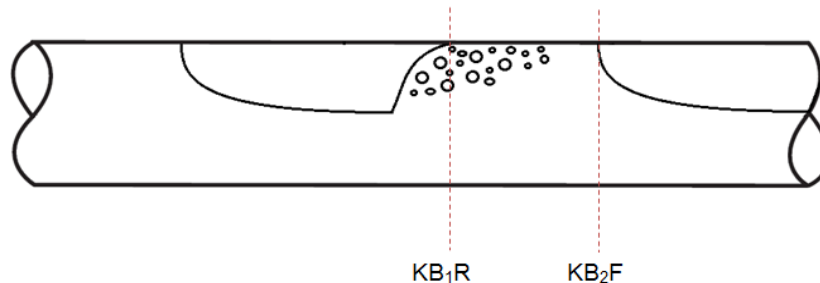


Figura 3.17 – Representação do pistão da célula unitária

$$\bar{\alpha}_S = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=KB_1R}^{KB_2F} \sum_{j=1}^8 \sum_{i=1}^8 A_{i,j} \cdot \alpha(i, j, k) \quad (3.18.)$$

A fração de líquido no pistão é dado por:

$$\bar{R}_{LS} = 1 - \bar{\alpha}_S \quad (3.19.)$$

3.2.10 Fator de intermitência

Esse parâmetro representa a razão do tamanho da bolha de Taylor pelo tamanho da célula unitária, conforme observado na fórmula abaixo:

$$\beta = \frac{L_B}{L_B + L_S} \quad (3.20.)$$

4 TESTES EXPERIMENTAIS

4.1 PLANTA EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO

Foi utilizada a infraestrutura do laboratório de ciências térmicas LACIT – UTFPR para realizar os experimentos (Figura 4.1). Este circuito contém linhas independentes de gás e líquido. O circuito contém uma tubulação transparente com extensão de 9,2 m de comprimento e 26 mm de diâmetro interno. Os fluidos utilizados nos experimentos foram ar e água. O ar é armazenado em um reservatório de 100 litros, abastecido por um compressor elétrico de 2 hp. A água proveniente de um poço artesiano da universidade (condutividade elétrica de 380 $\mu\text{s}/\text{cm}$) é armazenada em um reservatório de 0,3 m^3 . Uma bomba centrífuga, cujo controle é realizado por um inversor de frequência acionado remotamente, faz a circulação do líquido a partir do reservatório para o sistema. As vazões dos fluidos são medidas de forma separada e independente. Para o líquido, existe um medidor do tipo Coriolis e um medidor de pressão diferencial acoplado a uma placa de orifício para o gás. O início do circuito bifásico é caracterizado pelo misturador gás-líquido. No final do circuito há um separador gravitacional onde o ar é expelido para a atmosfera e água retorna ao reservatório. Para testes com volume de gás controlado, o circuito dispõe de um sistema que permite a inserção de pequenos volumes de gás, permitindo experimentos com vazões volumétricas de gás conhecidas (Figura 4.2). Este é localizado na entrada de gás do circuito de escoamento e contém cinco seringas interligadas, cada uma contendo a capacidade operacional de 50 ml. Os algoritmos foram executados em um computador PC utilizando um processador Intel Quad Core 2 I7 operando a 2.66 GHz com 6 Gb de memória em uma plataforma Windows 7 de 64 bits.

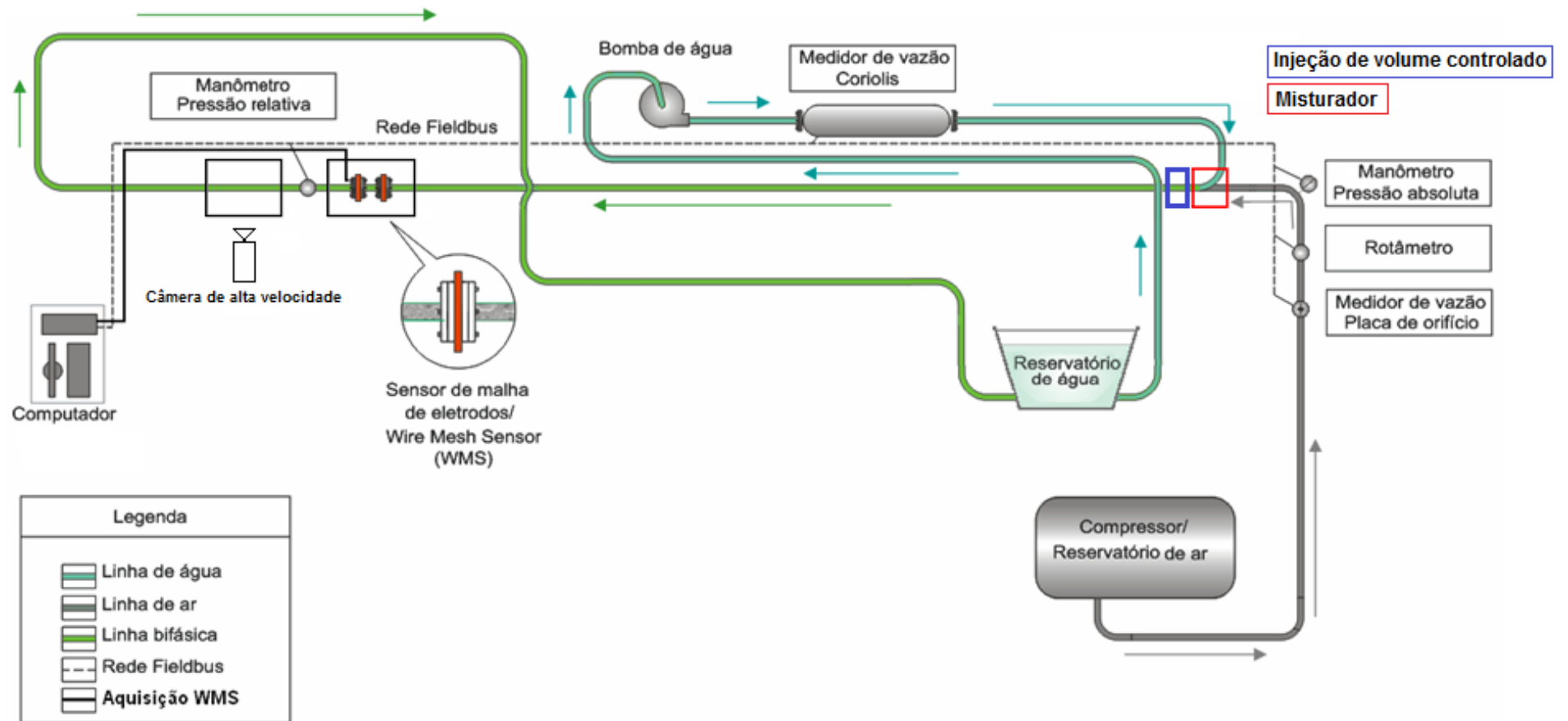


Figura 4.1 – Circuito experimental de escoamentos bifásicos do Laboratório de Ciências Térmicas da UTFPR.

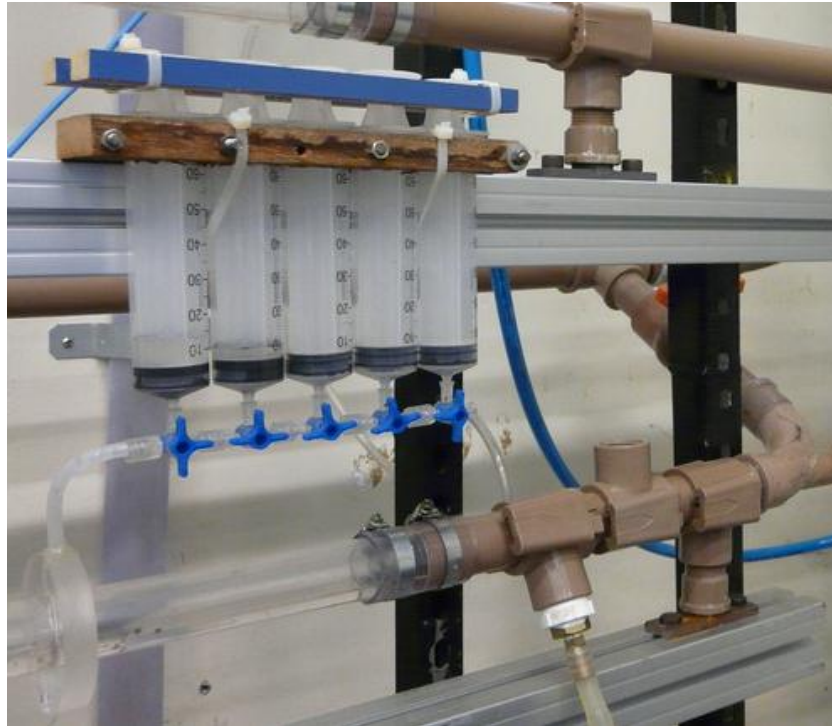


Figura 4.2 – Sistema de injeção de volume de gás controlado

Ao longo da tubulação, transdutores de pressão e temperatura fornecem dados para o controle do sistema, permitindo a identificação e correção da velocidade superficial das fases. A distância de entrada de gás até a seção de medidas tem aproximadamente 8 m, ou seja, 308 L/D, razão entre o comprimento e diâmetro. A comunicação entre os equipamentos de medição é realizada por uma rede *Foundation FieldBus*. Esta rede é capaz de suportar até 16 equipamentos em cada barramento. O barramento é conectado a um sistema de interface, cuja função é alimentar a rede com 24 V. Este sistema também realiza a comunicação com a placa de aquisição de dados da *National Instruments* instalada no computador de aquisição através do barramento PCI. A calibração do sistema de medição é detalhada no Apêndice A deste trabalho.

a) *Software* de supervisão - LabView

O sistema de supervisão dos equipamentos do circuito experimental foi desenvolvido na plataforma LabView (Figura 4.3). Ele é responsável por ler os dados dos instrumentos instalados ao longo do circuito experimental através da rede *Foundation Fieldbus* e os interpreta em uma interface de programação orientada a componentes. Os dados adquiridos são parâmetros de entrada para equações que descrevem o comportamento do escoamento.

A interface gráfica permite monitorar valores de pressão, temperatura e vazão das fases. É possível também, determinar a velocidade superficial das fases ao longo da tubulação pela correção dos parâmetros monitorados. Esta informação permite comparar os dados provenientes dos sensores validando a técnica proposta.

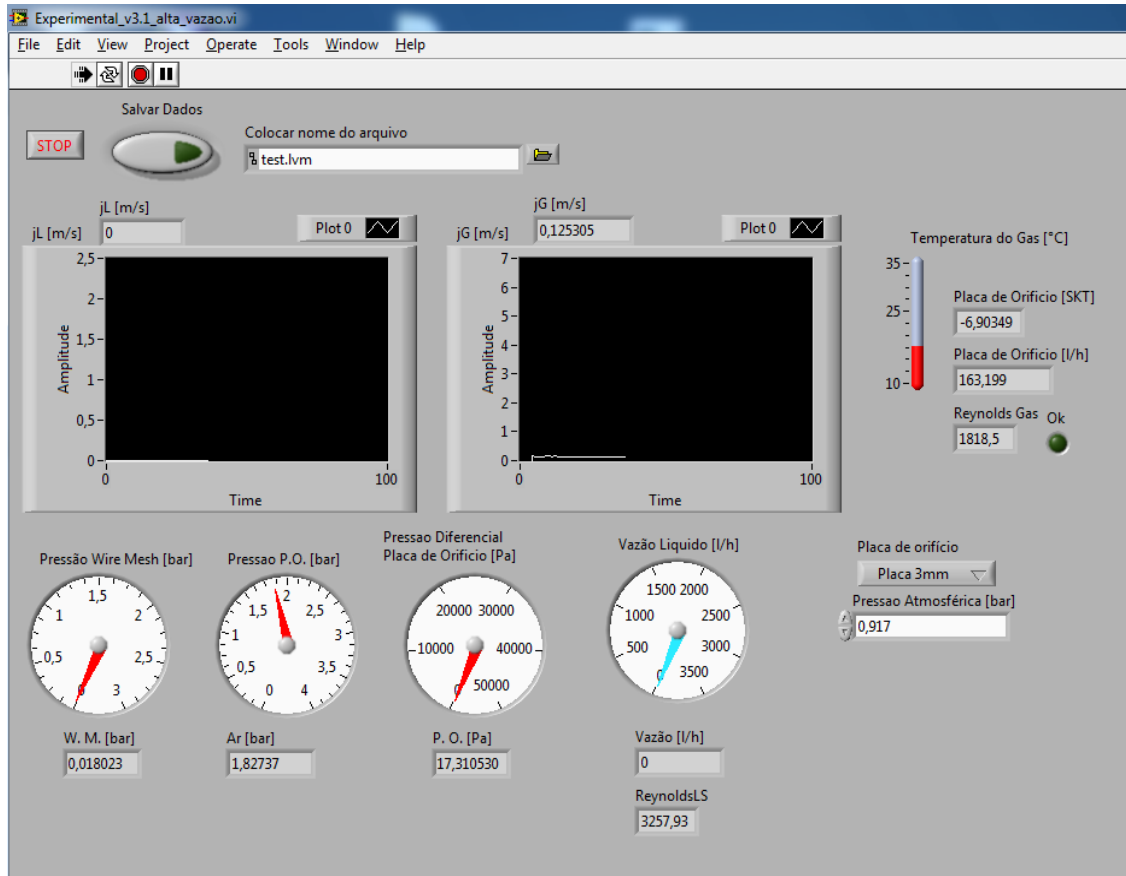


Figura 4.3 – Software de Instrumentação desenvolvido em LabView para a visualização de parâmetros como velocidades superficiais e pressões em tempo real

b) Sistema de aquisição de dados do sensor *wire-mesh*

O *software* de aquisição de dados do sensor *wire-mesh* desenvolvido por Da Silva, (2008) possibilita o controle dos sensores, configuração do firmware e a leitura dos dados analógicos (Figura 4.4). Ele contém uma interface gráfica, permitindo ao usuário configurar a taxa de aquisição, a frequência de excitação dos eletrodos, o tempo de leitura das medidas além de mostrar em tempo real uma visualização axial do escoamento.

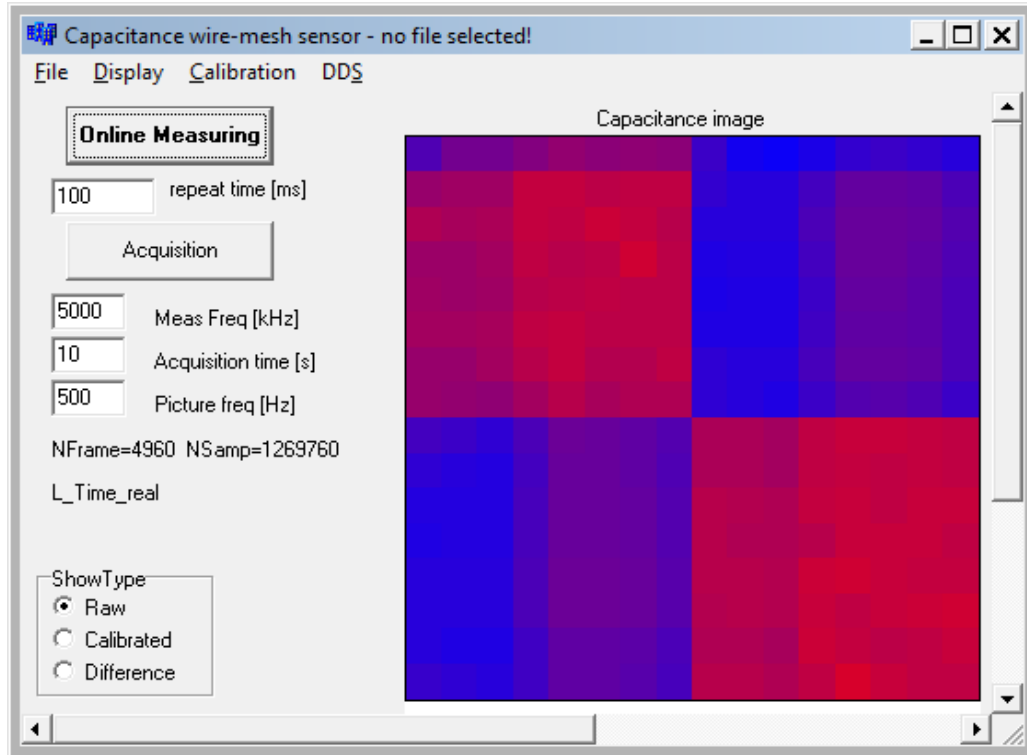


Figura 4.4 - Sistema de aquisição de dados do sensor *wire-mesh*

O *software* recebe os dados da placa PCI 6229 conectada ao circuito de controle dos sensores. A frequência de amostragem e o período de leitura são definidos para a medição dos dados. Ao iniciar a aquisição, o *software* interpreta os dados provenientes dos conversores A/D, responsáveis pela transformação do sinal de tensão relativo à permissividade da fase em uma variável digital de 16 bits. Para cada medida realizada o valor digital de tensão é inserido de forma sequencial em um arquivo “.dat” possibilitando análises posteriores.

c) Rotina de Calibração

Os valores adquiridos pelo sistema de aquisição podem apresentar variações com a posição no meio, a frequência do campo aplicado, a umidade ou a temperatura, entre outros parâmetros. Conforme descrito em 2.4.2 é necessário realizar-se a calibração no *software* desenvolvido V_File_Generator V1.0 por meio de duas referências.

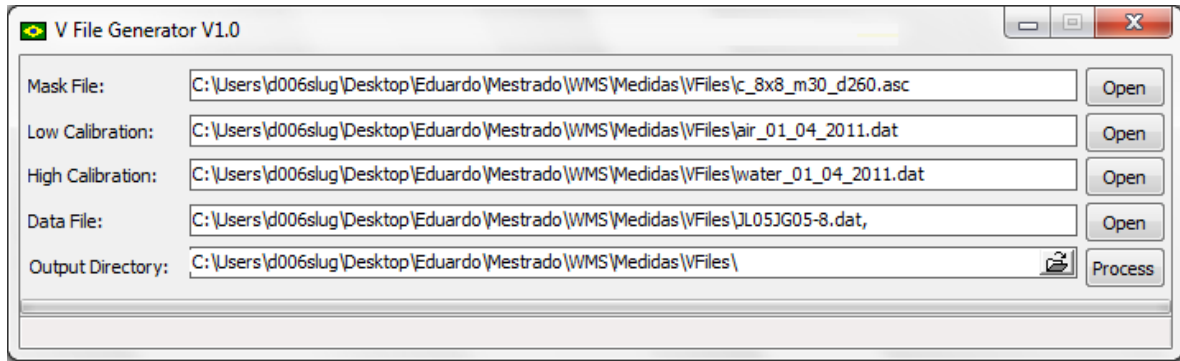


Figura 4.5 – *Software V_File_Generator V1.0* desenvolvido para a calibração das leituras

Este programa tem como entrada um arquivo de máscara que é exatamente a tabela de coeficientes ilustrada na Figura 3.13. Para a calibração no *software*, além das medidas de interesse, é necessário informar os dados de uma medida com o tubo vazio e outra com o tubo cheio de líquido. Após este processo, os dados são armazenados em uma nova estrutura. As medidas são salvas em um arquivo binário de forma sequencial à leitura do sensor, desta forma é possível ler o arquivo e montar a matriz com seus valores quando necessário (Figura 4.6). O arquivo resultante é chamado de “.V”, e cada valor de leitura é representado por 8 bits (1 Byte) e corresponde a fração de vazio no ponto.

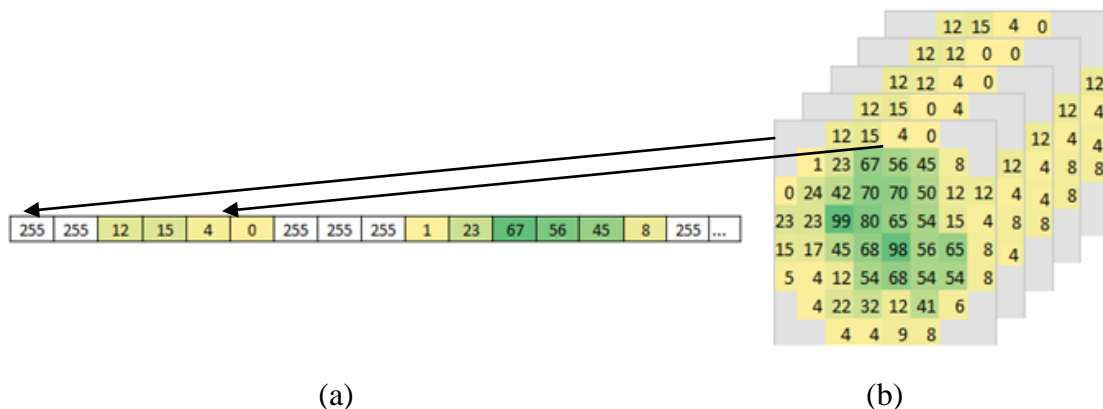


Figura 4.6 – (a) Representação vetorial do arquivo .V; (b) Representação do arquivo .V de forma espacial na matriz de dados $M(i, j, k)$

4.2 CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES

O sensor *wire-mesh* foi configurado para realizar as medidas em uma taxa de aquisição de 500 Hz. No caso dos testes de validação com volume controlado (seção 4.3) foi definido um período de leitura de 10 s, e para os testes realizados em padrões de escoamento bifásico (seção 4.4), o período definido foi de 120 s. Neste estudo, a câmara de alta velocidade foi utilizada de forma sincronizada com o sensor *wire-mesh*, a fim de comparar

resultados do algoritmo proposto com outro algoritmo descrito em maiores detalhes em Aamaral et al., (2011).

Foi utilizada a câmera NanoSense MKIII da Dantec Dynamics A/S capaz de adquirir 1500 imagens em tons de cinza por segundo. A seção de filmagem (Figura 4.7) contém uma caixa de acrílico com dimensões (200 mm x 100 mm x 100 mm) preenchida com água a fim de reduzir efeitos de refração que são emitidos pela fonte de luz. A fonte luminosa é composta por um sistema com 19 LEDs de alto brilho (MotionLEDs – IDT). Esta fonte recebe um sinal de sincronização da câmera para que seja realizado o acionamento da luz no mesmo tempo da gravação da imagem. Para uma melhor composição da luz, um difusor é colocado entre a fonte luminosa e a caixa de acrílico. A câmera foi configurada para adquirir imagens com tamanho de 500 x 320 *pixels* em uma taxa de aquisição de 60 fps. A distância focal foi ajustada manualmente e a exposição definida em 140 μ s.

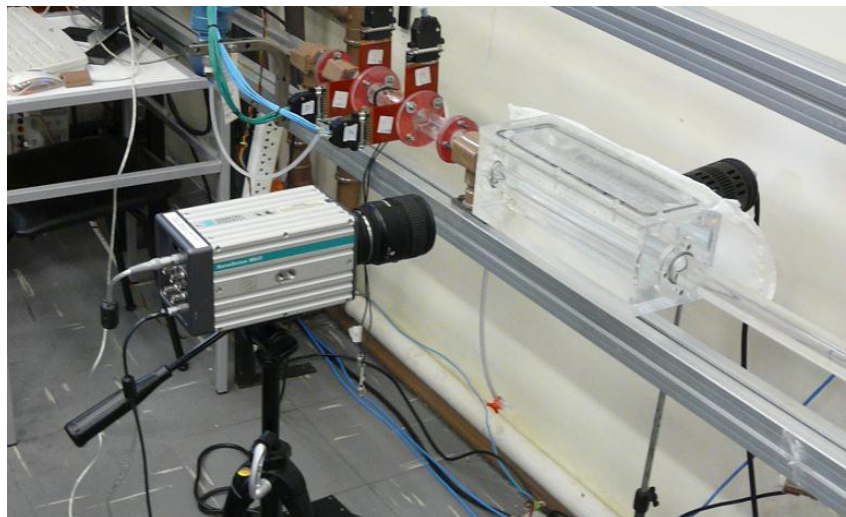


Figura 4.7 – Seção de filmagem de vídeo com a câmera de alta velocidade, a caixa de acrílico, o difusor, a matriz de LEDs

4.3 ANÁLISE POR VOLUME CONTROLADO

Realizou-se uma medição com volume controlado a fim de validar o algoritmo proposto. A compressibilidade da fase gasosa permite uma queda de pressão ao longo da tubulação. Assim, dois transdutores de pressão foram instalados para determinar os valores de entrada e saída. Considerando temperatura constante e o ar como gás perfeito em um sistema fechado, a conservação mássica no sistema é constante. Este volume pode ser corrigido aplicando a equação da primeira lei da termodinâmica

$$P_1V_1 = P_2V_2, \quad (4.1.)$$

onde P_1 e P_2 são respectivamente as leituras dos transdutores de pressão na entrada e saída. V_1 é o volume inicial e V_2 é o volume corrigido. A Tabela 4.1 apresenta a grade experimental realizada para um valor constante de velocidade superficial de líquido ($j_L=1,0$ m/s). Cada experimento foi repetido dez vezes a fim de se estabelecer uma estatística. São apresentados também os valores corrigidos para os experimentos realizados, conforme equação 4.1. Nota-se que ocorre uma expansão média aproximada de 3,8%.

Tabela 4.1 – Volume inicial e volume corrigido para o experimento de validação do algoritmo

Exp.	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
V₁ (ml)	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
V₂ (ml)	25,95	51,91	77,87	103,83	129,79	155,75	181,7	207,66	233,62	259,58

4.4 ESCOAMENTO BIFÁSICO

Nesta seção o objetivo é utilizar a mesma técnica de medição para analisar o padrão intermitente do escoamento bifásico ar-água. Foram realizados 46 medidas no sistema a fim de analisar a capacidade de reconstrução de imagem pelo sensor e a extração de parâmetros de interesse. Além dos testes acima, foram realizadas mais 21 medidas contendo para a validação visual dos padrões do tipo bolhas e estratificado, totalizando 67 pontos.

Analisando os limites operacionais do circuito experimental, foi definido que a vazão de água era próxima de $2,5 \times 10^{-3}$ m³/s. Esta vazão em uma tubulação de 0,026 m de diâmetro resulta em uma velocidade superficial de 4 m/s da fase líquida, ou seja, $j_L = 4,0$ m/s. Para j_G foi definido um fundo de escala, ($j_G = 2,0$ m/s).

Os pontos de medição com base na grade experimental foram dispostos no mapa de fluxo de Taitel; Dukler (1976) para escoamento de ar e água em tubulações horizontais de 26 mm de diâmetro. Por ser o objetivo principal deste estudo, a maioria dos pontos escolhidos teve foco no padrão de escoamento intermitente. Outros pontos foram escolhidos de forma a validar a visualização do *software* com a câmera de alta velocidade.

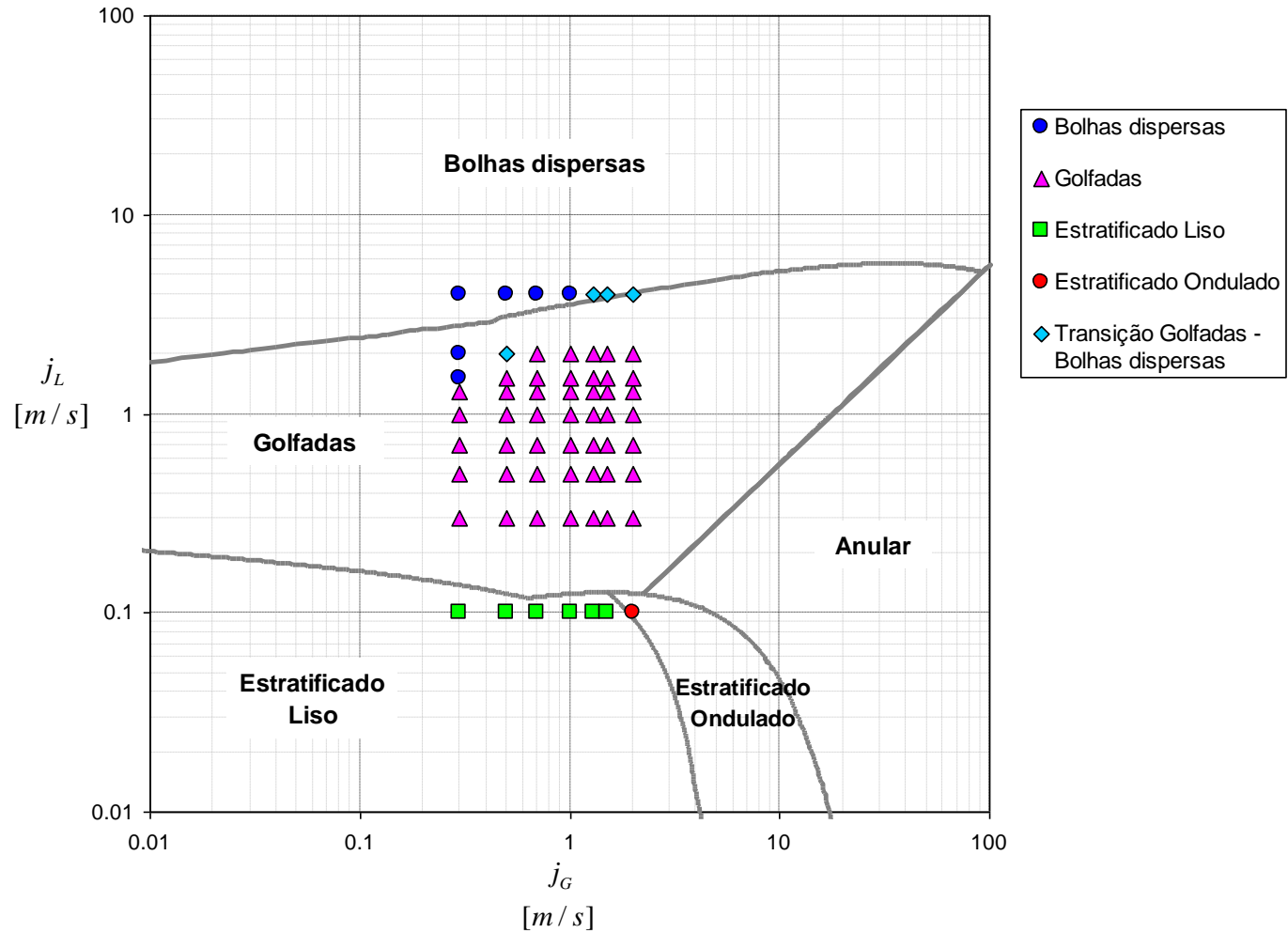


Figura 4.8 – Grade de experimentos localizados no mapa de fluxo para escoamentos horizontais em tubulações de 0,026m de diâmetro

5 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados conduzidos em uma tubulação horizontal com escoamento simultâneo de água e gás em temperatura ambiente.

5.1 ANÁLISE POR VOLUME CONTROLADO

O objetivo principal deste experimento foi validar a capacidade do sensor *wire-mesh* juntamente com o algoritmo desenvolvido para o cálculo do volume das bolhas em um escoamento bifásico.

5.1.1 Visualização

A análise visual do escoamento permite a determinação de alguns parâmetros e a validação dos dados. Na Figura 5.1 observa-se a reconstrução das medidas realizadas pelo sensor *wire-mesh* e pela câmera de alta velocidade, conforme técnica descrita na sessão **Erro! onte de referência não encontrada.**

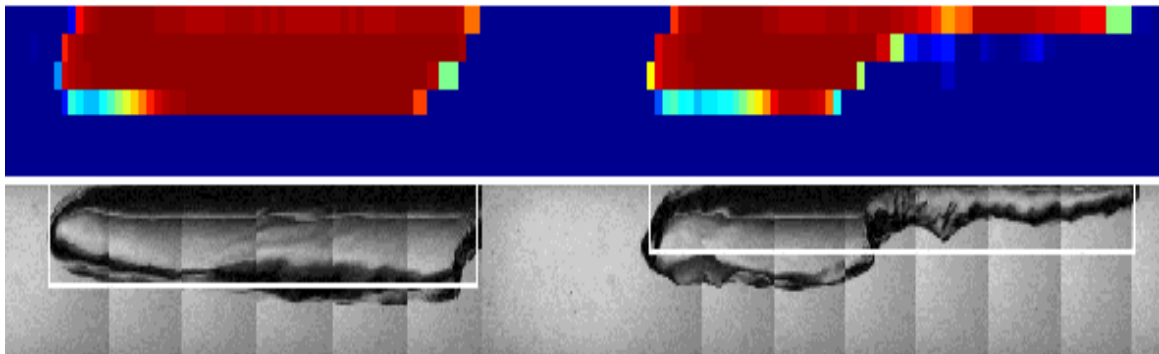


Figura 5.1 – Reconstrução do escoamento bifásico a partir do sensor *wire-mesh* e da câmera de alta velocidade

5.1.2 Volume

A Figura 5.2 mostra a proximidade do resultado comparativo entre ambas as técnicas. Observa-se que os valores resultantes do sensor *wire-mesh* ficam dentro da faixa de 10% de erro em sua maioria. É possível também observar a barra de erro que corresponde ao desvio padrão calculado para as 10 medidas realizadas. Para os resultados da técnica de processamento de imagens da câmera de alta velocidade, observa-se uma tendência linear de 10% abaixo do valor ideal. Esta diferença pode estar relacionada com a técnica de aproximação de um formato regular da bolha conforme apresentado na seção 2.3.2.

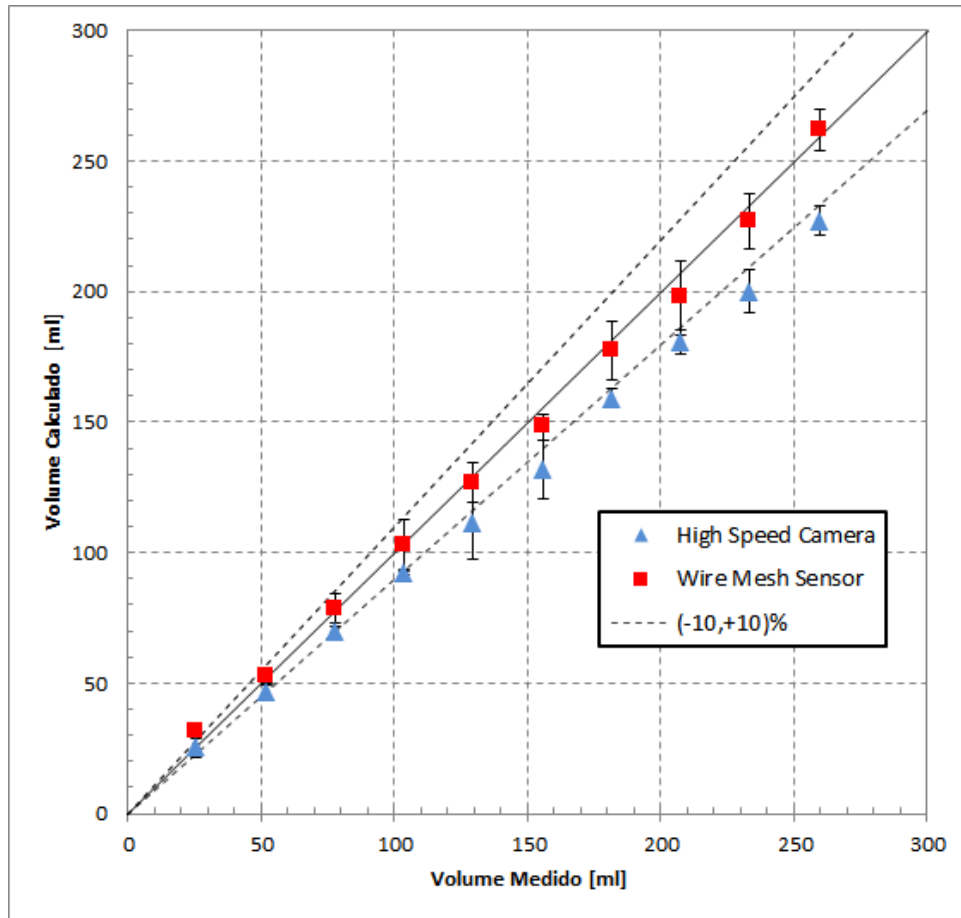


Figura 5.2 – Análise de volume de gás calculado para o sensor *wire-mesh* e a câmera de alta velocidade

O volume de dados da câmera de alta velocidade que foi executado no *software* MatLab foi de $9603,36 \times 10^6$ pixels e para o software do sensor *wire-mesh* $6,396 \times 10^6$. Vários fatores influenciam no desempenho computacional de um algoritmo, um deles é de que o *software* MatLab é uma linguagem "interpretada" e não "compilada", por tanto mais lenta. Em geral, com o resultado apresentado, foi possível validar a técnica de identificação de bolhas pelo método de segmentação de dados 3D.

5.2 ESCOAMENTO BIFÁSICO

Após a validação da técnica, testaram-se vários experimentos de modo a verificar o desempenho e precisão do algoritmo. Dessa forma são apresentados neste capítulo os resultados obtidos durante os testes realizados em padrões de escoamentos bifásicos.

5.2.1 Validação Visual

A validação visual (Tabela 5.1) e (Tabela 5.2) do escoamento reconstruído pelo *software* confirma a qualidade de resolução espacial do sensor *wire-mesh*. As imagens da

câmera de alta velocidade permitem a comparação visual dos testes realizados na investigação do escoamento horizontal bifásico para os três padrões de escoamentos (Figura 5.3).

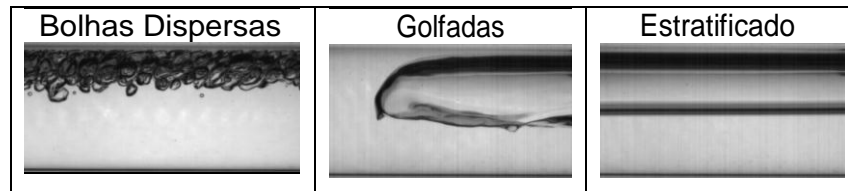


Figura 5.3 – Padrões de escoamento investigados na validação visual

Tabela 5.1 – Comparação da reconstrução das imagens realizadas pelo *software* com os dados de videometria

Experimento	Sensor <i>wire-mesh</i>	Câmera de alta velocidade
$j_L = 0,1$ m/s $j_G = 0,3$ m/s		
$j_L = 0,1$ m/s $j_G = 1,0$ m/s		
$j_L = 2,0$ m/s $j_G = 0,5$ m/s		
$j_L = 4,0$ m/s $j_G = 2,0$ m/s		

Na Tabela 5.1 e Tabela 5.2 observa-se a fase gasosa, representada pela cor vermelha e a fase líquida pela cor azul. Estas imagens fornecem informações qualitativas sobre o escoamento em diferentes tipos de padrões. Observa-se também uma variação de cor entre o tom azul e o vermelho. Esta diferença é devida ao preenchimento parcial da área do ponto de medição, ocorrendo geralmente na interface das fases ou no pistão aerado. É possível observar as bolhas alongadas bem definidas, com uma forma arredondada do nariz e achatada da cauda. Pequenas bolhas que ocorrem no padrão disperso ou que acompanham a bolha de Taylor apresentam uma menor definição devido à resolução espacial limitada de 3 mm em tubo de seção transversal ou reduzem a capacidade de leitura do sensor. A resolução espacial neste caso não pode ser aumentada, pois ao reduzir a distância entre os fios, aumenta-

se a resistência ao escoamento. A Tabela 5.3 apresenta as visualizações laterais e superiores simultâneas do escoamento. É possível obter imagens para cada i, j (Figura 5.4) do sensor, ou seja, cortes fictícios representados pela Figura 5.5.

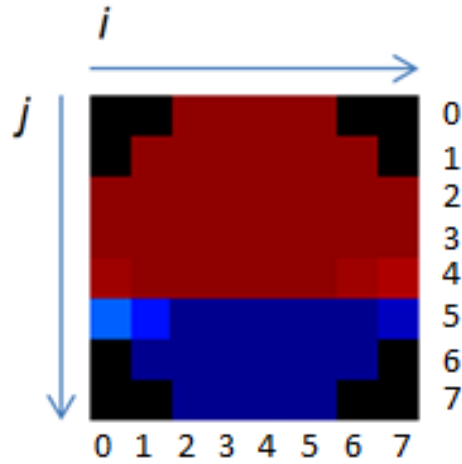


Figura 5.4 – Visão axial do tubo, com a representação das coordenadas i, j

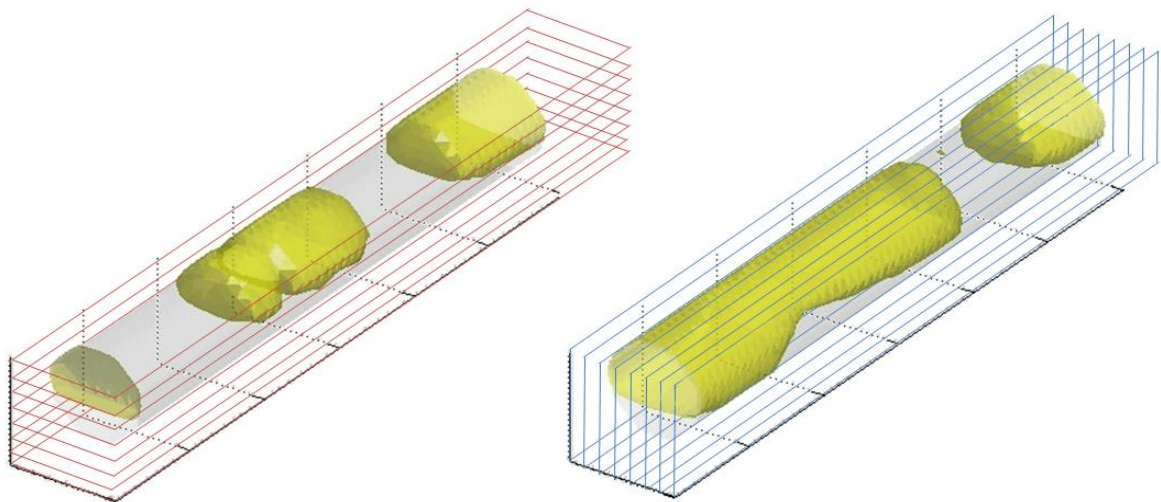


Figura 5.5 – Representação tridimensional do escoamento em golfadas em vários níveis

Tabela 5.2 – Comparação da reconstrução das imagens realizadas pelo *software* para o regime intermitente


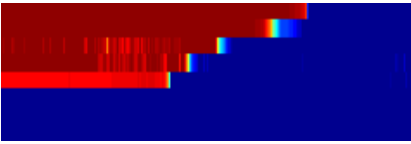
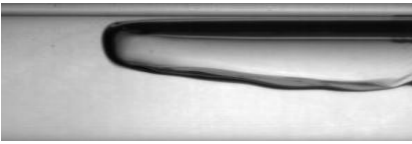

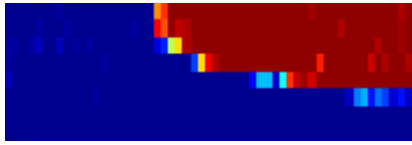

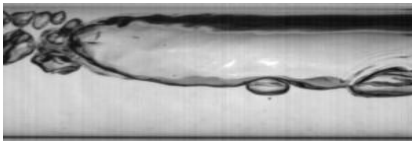
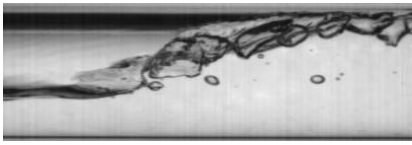
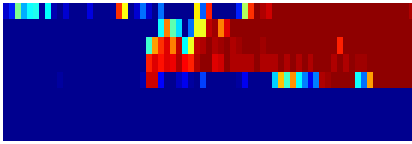
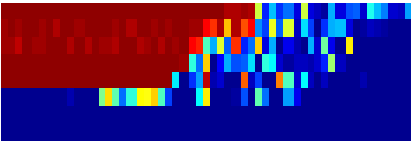

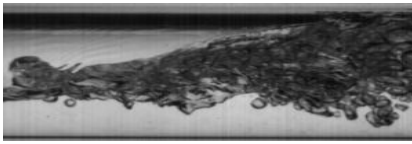
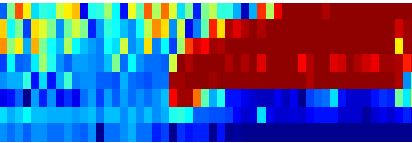
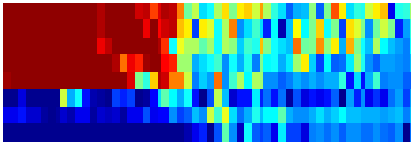
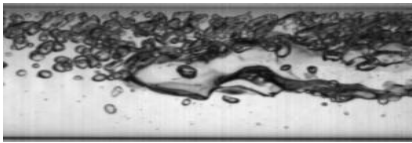
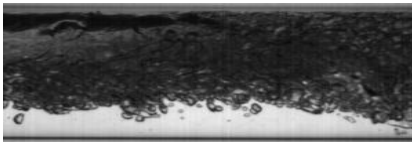
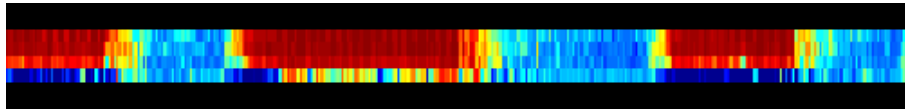
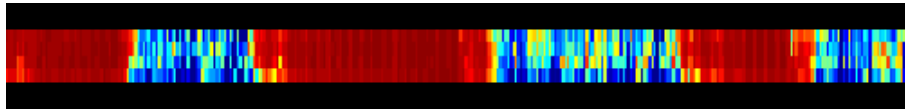
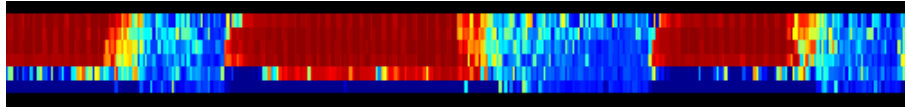
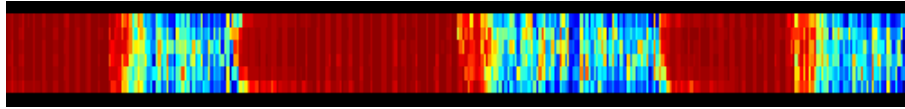
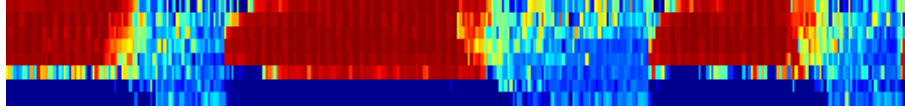
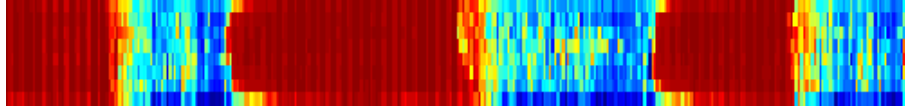
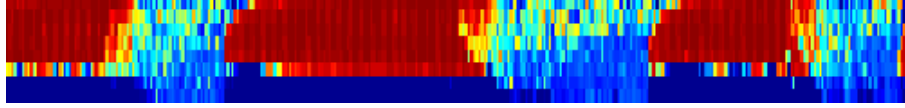
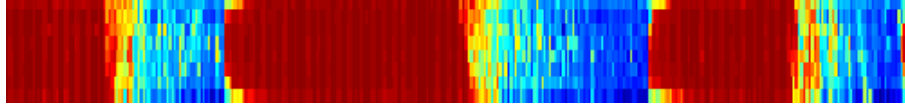
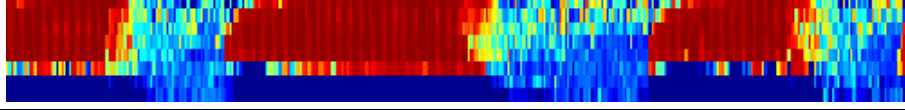
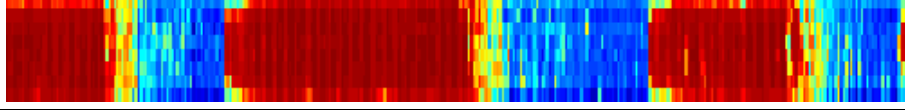
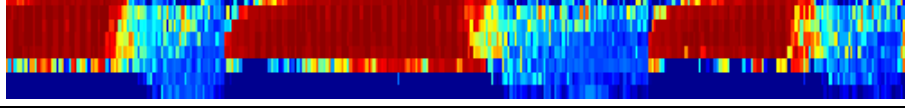
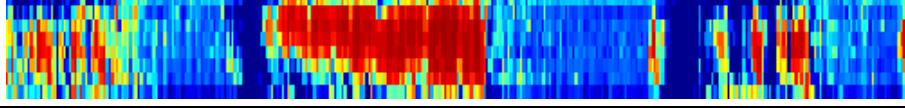
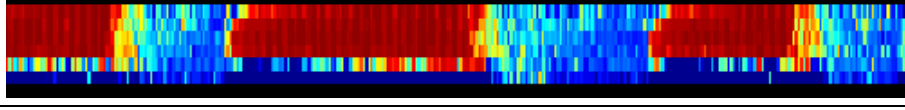
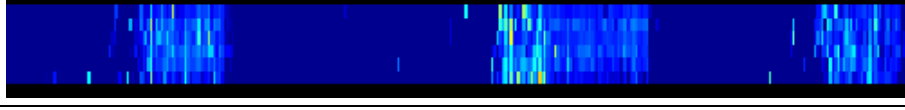
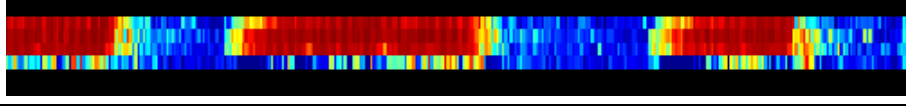

Experimento	Nariz da bolha	Calda da bolha	Nariz da bolha	Calda da bolha
$j_L = 0,3 \text{ m/s}$ $j_G = 0,3 \text{ m/s}$				
$j_L = 1,3 \text{ m/s}$ $j_G = 0,3 \text{ m/s}$				
$j_L = 1,3 \text{ m/s}$ $j_G = 1,3 \text{ m/s}$				
$j_L = 2,0 \text{ m/s}$ $j_G = 2,0 \text{ m/s}$				

Tabela 5.3 – Reconstruções laterais e superiores do escoamento em golfadas pelos índices espaciais i, j

i	Lateral	j	Superior
0		0	
1		1	
2		2	
3		3	
4		4	
5		5	
6		6	
7		7	

5.2.2 Fração de vazio média

As frações de vazio médias calculadas neste experimento (Figura 5.6) foram comparadas com correlações elaboradas por Gregory e Scott, (1969) e Mattar e Gregory, (1974) conforme seção 2.2.2 e apresentaram bons resultados.

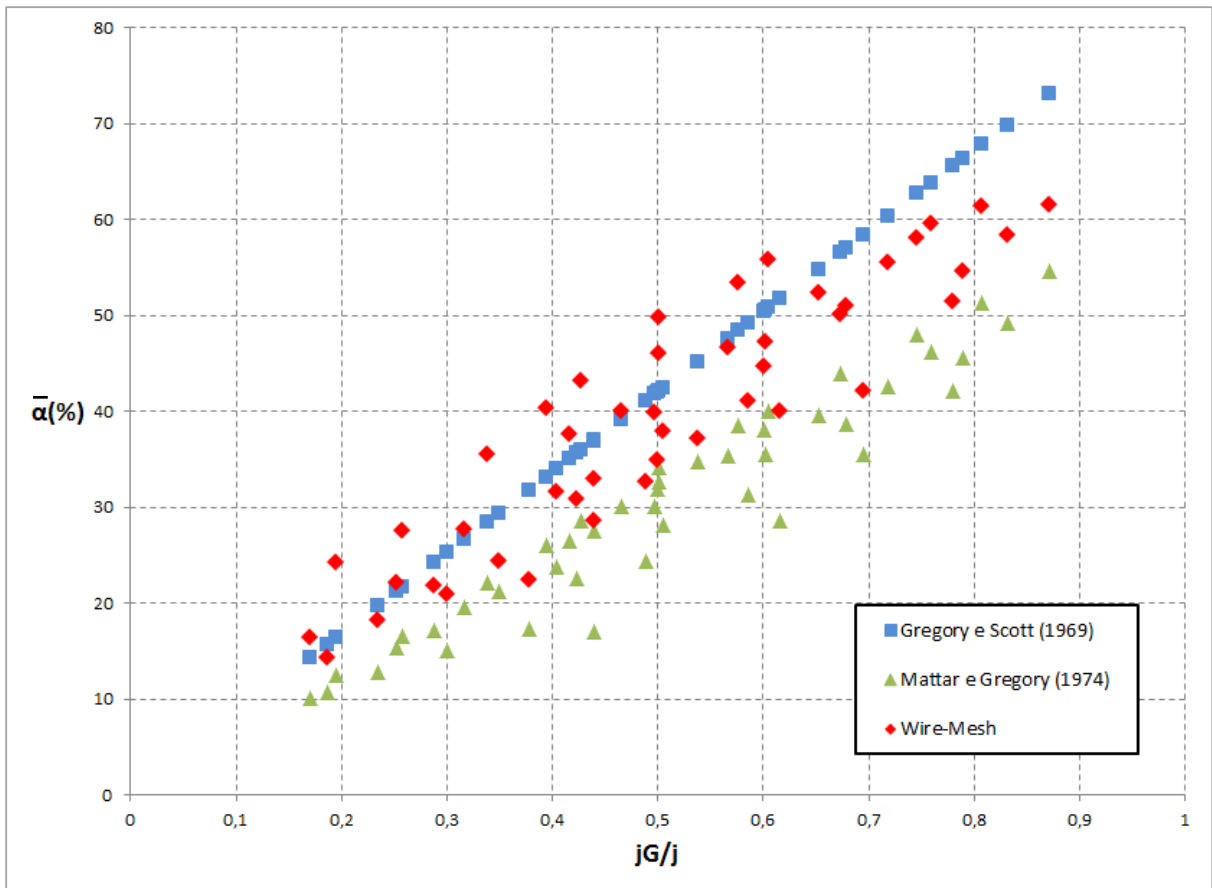


Figura 5.6 – Variação da fração de vazio média

A partir dos valores de fração de vazio das seções transversais medidas pelo sensor *wire-mesh*, as séries temporais para todas as condições experimentais testadas foram calculadas. As curvas apresentadas nas séries temporais dos três padrões investigados têm curvas características como exemplificado na Figura 5.7. Em escoamentos estratificados a série temporal tem um comportamento constante ao longo do tempo. No padrão golfadas, observa-se regiões aonde o valor de fração de vazio médio na seção transversal chega a 0 % ou próximo. Essas regiões caracterizam a passagem de um pistão de líquido. Para o padrão de bolhas dispersas o sinal apresenta uma aparência de ruído, porém linear ao longo do tempo, oscilando com pequenos níveis de amplitude.

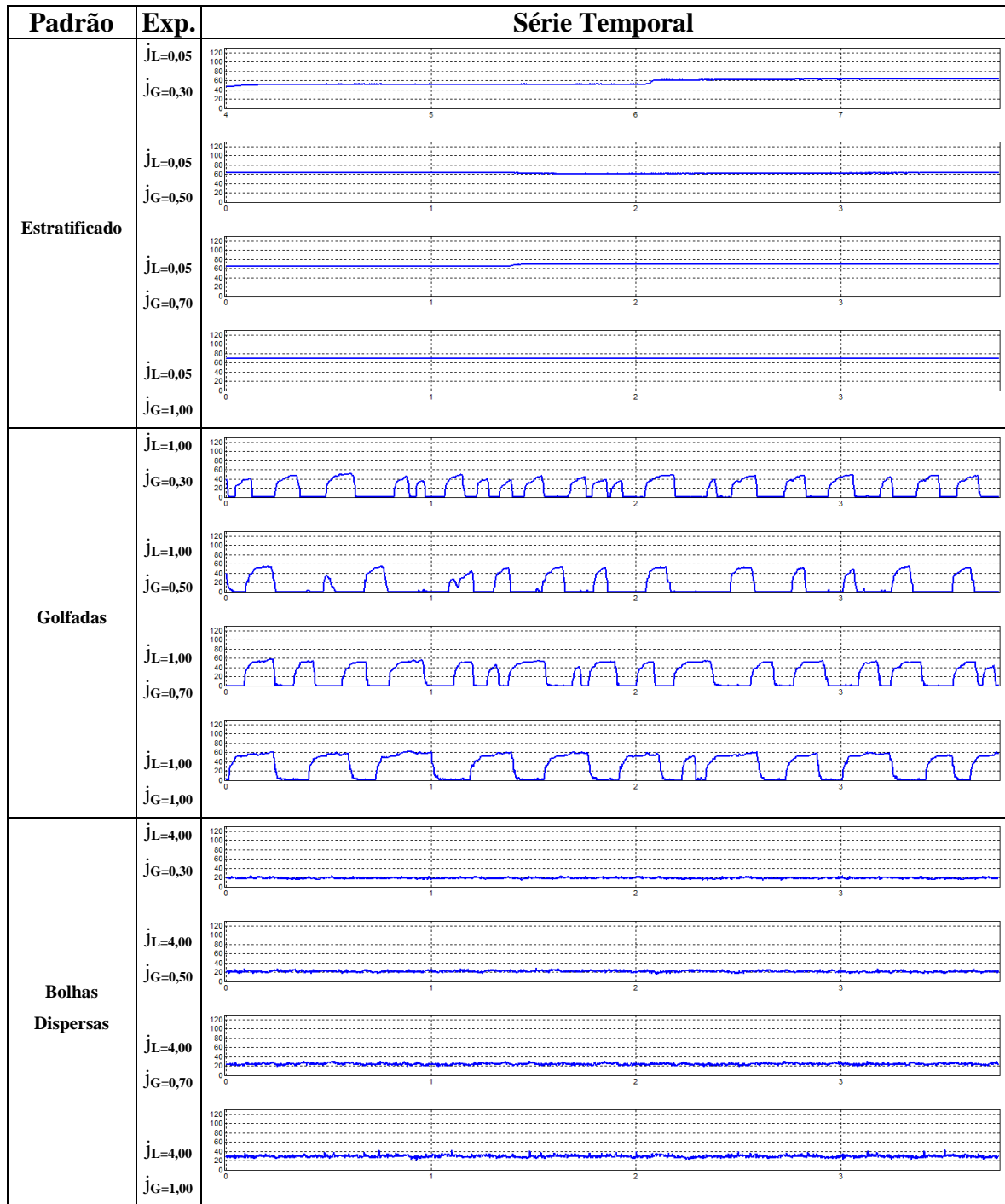


Figura 5.7 – Valores resultantes das séries temporais

5.2.3 Fração de líquido no pistão média

Na grande maioria de estudos bifásicos utiliza-se este parâmetro para investigar o aeramento dos pistões de líquido. Seu conhecimento é necessário no cálculo de fração de líquido na região do filme de líquido, uma vez que o gás presente na célula unitária está dividido entre a bolha alongada e as bolhas dispersas.

Com o sensor *wire-mesh* junto com o algoritmo proposto, foi possível determinar os limites do pistão conforme seção 3.2.9 e calcular a fração de líquido com base na fração de gás. Os resultados (Figura 5.8) foram comparados com os modelos de Gregory et al. (1978), Marcano et al. (1998) e Abdul-Majeed (2000) conforme descrito na seção 2.2.2.

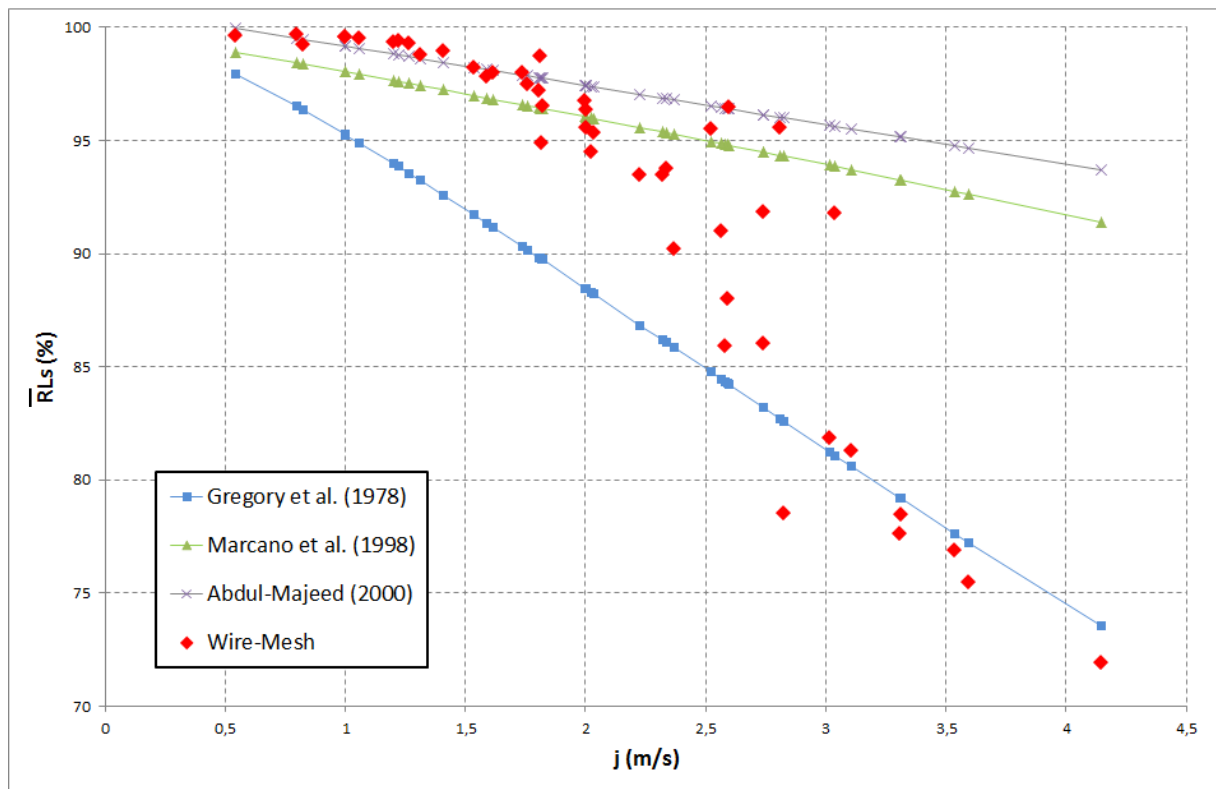


Figura 5.8 – Fração média de líquido no pistão

Observa-se um comportamento inicial ($j < 1,7$ m/s) próximo do modelo de Abdul-Majeed, (2000), com o aumento da velocidade da mistura a fração de líquido no pistão reduziu, ou seja, a concentração de gás no pistão aumentou, aproximando-se do modelo proposto por Marcano et al., (1998) ($1,7$ m/s $< j < 2,5$ m/s). Por ultimo o comportamento da fração de líquido correspondeu à relação proposta por Gregory et al., (1978), onde a velocidade da mistura é mais elevada. Com base nos resultados obtidos é possível avaliar que, com o aumento da velocidade da mistura j , o pistão de líquido fica mais aerado.

5.2.4 Frequência da célula unitária

A maioria dos modelos encontrados na literatura baseia-se em análises com dados experimentais. Para a comparação dos dados calculados (Figura 5.9) utilizou-se as relações de Gregory e Scott (1969), Greskovich e Shrier (1972) e Heywood e Richardson (1979),

descritas em 2.2.2, em função da razão da velocidade superficial de gás pela velocidade de mistura das fases.

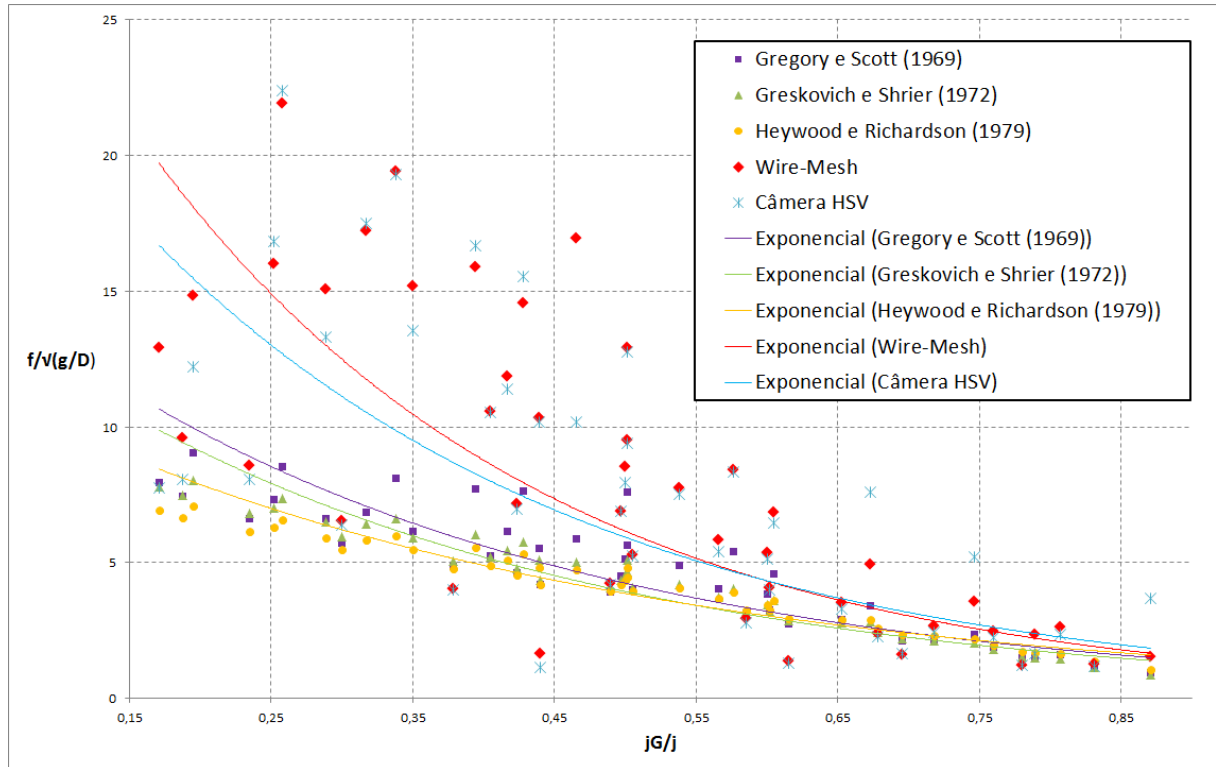


Figura 5.9 – Comparação dos resultados de frequência da célula unitária

Além dos modelos apresentados na literatura, os valores de frequência foram comparados com os resultados obtidos pela técnica da câmera de alta velocidade, a qual apresentou resultados semelhantes. Observa-se que a dispersão do comportamento exponencial diminui conforme o aumento da razão j_G/j , ou seja com o aumento da velocidade superficial do líquido para uma mesma velocidade superficial de gás.

5.2.5 Análise de velocidade

A velocidade de translação da bolha alongada, ou bolha de Taylor, tem um comportamento diferente das bolhas dispersas. Neste estudo, foi analisado apenas o caso das bolhas no padrão golfadas. Para analisar-se a influência da velocidade da mistura foram utilizadas as combinações de velocidades superficiais j_L e j_G da grade experimental. Os valores da velocidade da frente da bolha foram comparados com os valores adquiridos pela câmera de alta velocidade e com o modelo de Bendiksen (1984) descrito em 2.2.2.

A Figura 5.11 apresenta as velocidades frontais da bolha em relação à velocidade da mistura J , observa-se que a velocidade da bolha aumenta de forma proporcional ao aumento

de U_M . Para valores onde ($U_M > 3 \text{ m/s}$), a velocidade de translação da bolha se afasta do modelo. Esta característica pode estar relacionada ao fato de que, com o aumento da velocidade das fases, ocorre um aeramento maior no pistão de líquido, formando bolhas dispersas ao longo do pistão e aproximando-se da frente da próxima bolha (Figura 5.10). Este fenômeno pode acarretar uma má interpretação do início da bolha pelo algoritmo, assim, calculando sua velocidade real erroneamente.

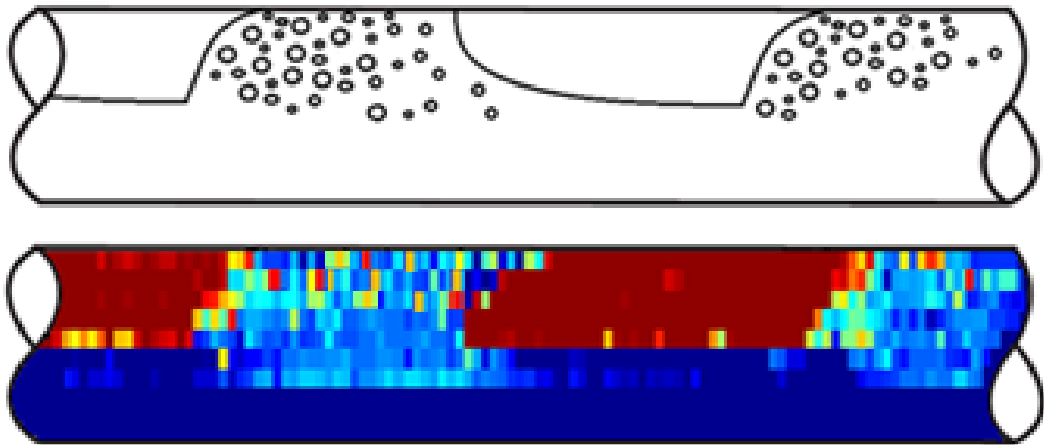


Figura 5.10 – Aeramento no pistão de líquido para escoamentos em golfadas com alta velocidade superficial de gás

Por meio de observações, constata-se também que as velocidades da frente e da cauda da bolha aumentam conforme a velocidade da mistura. A velocidade da bolha é maior do que a velocidade da cauda, especialmente onde a velocidade da mistura é maior. De modo geral, a técnica de segmentação 3D proporcionou bons resultados.

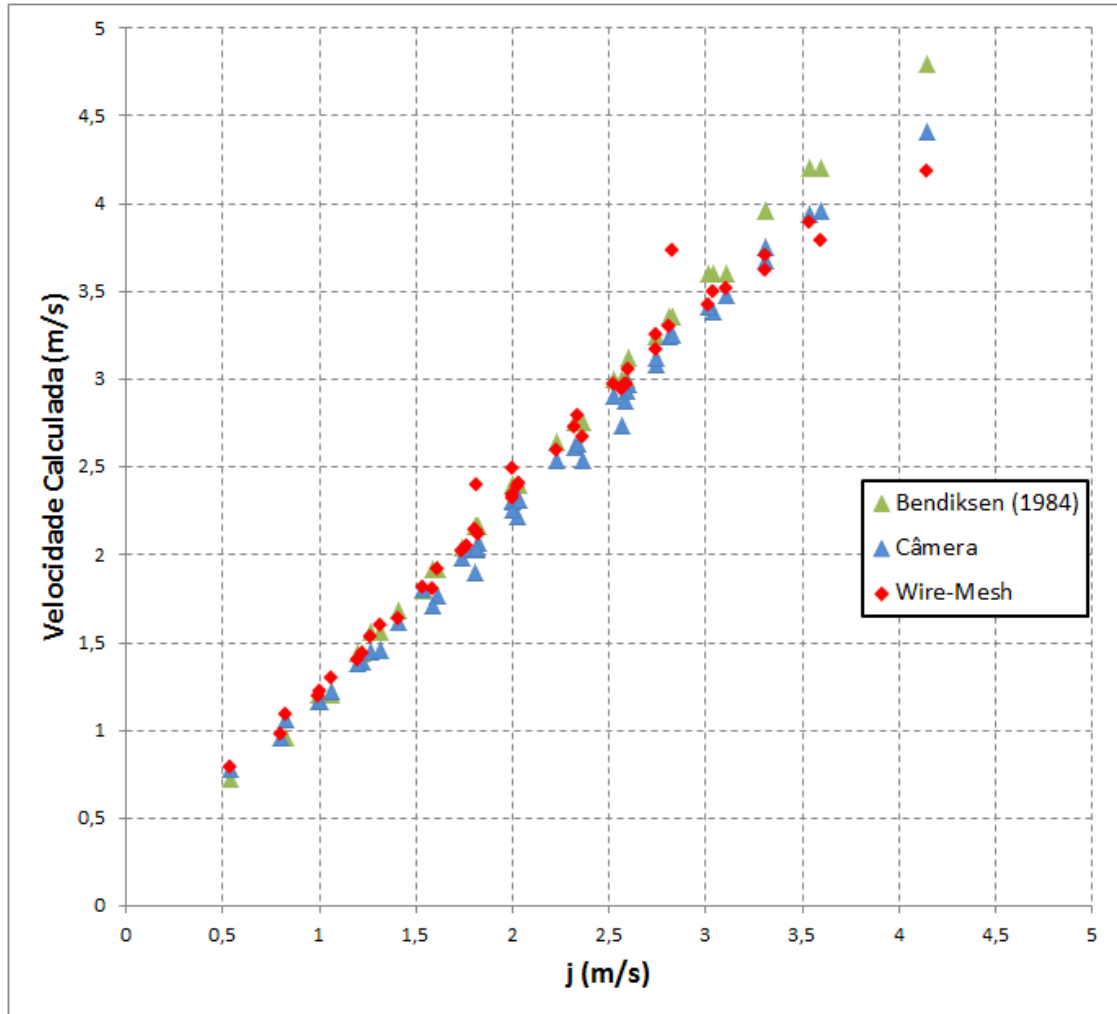


Figura 5.11 – Comparação da velocidade de translação (frontal) da bolha

5.2.6 Dimensões

Dados como comprimento da bolha (Figura 5.12), comprimento do pistão (Figura 5.13) e fator de intermitência (β) (Figura 5.14) foram analisados a fim de avaliar a variação do comprimento em razão da velocidade superficial de gás sobre a velocidade da mistura. Na Figura 5.12, observa-se um aumento no comprimento da bolha conforme o aumento da razão j_G/j . Isto pode ser notado de forma contrária na frequência das bolhas, ou seja, quanto maior o comprimento da bolha, maior será o período entre uma bolha e outra, desta forma a frequência será menor.

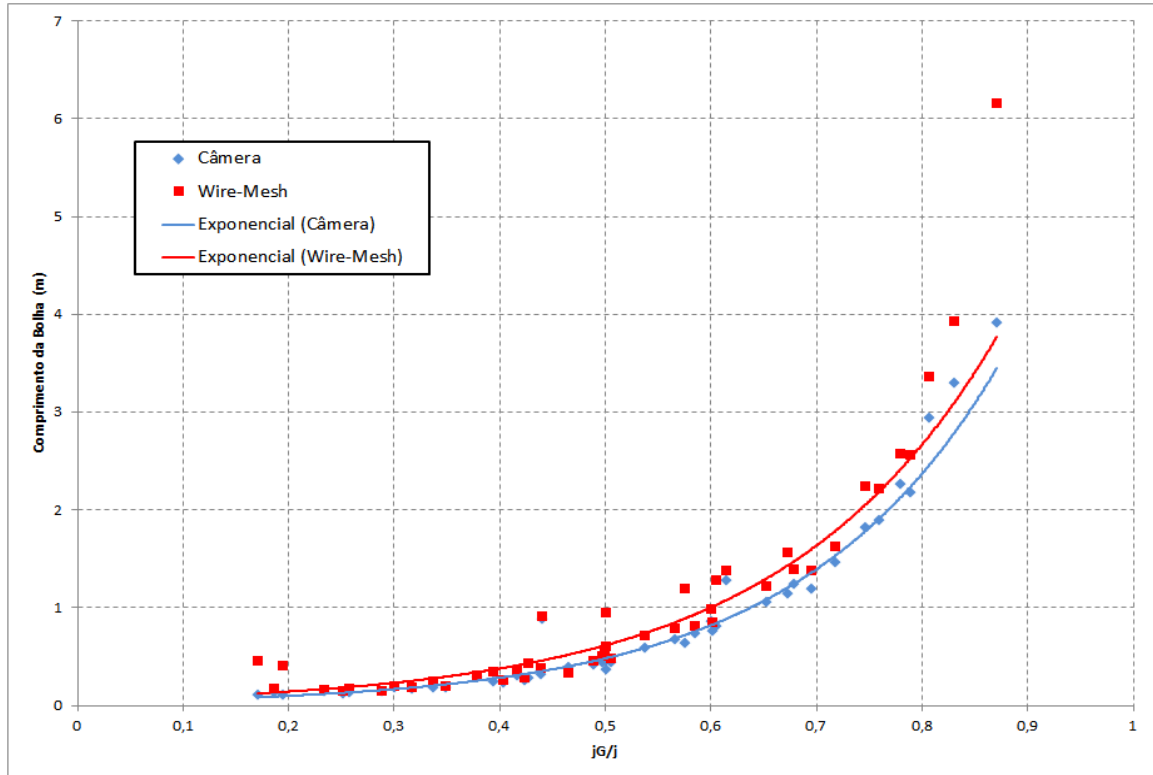


Figura 5.12 – Análise do comprimento de bolha WMS x Câmera

De forma geral, a análise dos dados do padrão intermitente no escoamento horizontal tem diversos fatores, um deles, é que a variação dos comprimentos de bolhas e pistão está ligada a dois efeitos: expansão do gás e interação (coalescência) de bolhas.

Na Figura 5.13, com o aumento da velocidade superficial do líquido para uma mesma velocidade superficial de gás, observa-se uma tendência de crescimento do comprimento do pistão. Os dados da câmera de alta velocidade também demonstraram comportamento similar. Outro parâmetro apresentado na Figura 5.14 é o fator de intermitência, este valor permite definir a frequência das células unitárias. Observa-se também que seu crescimento ocorre com a redução da velocidade de líquido para uma velocidade de gás constante.

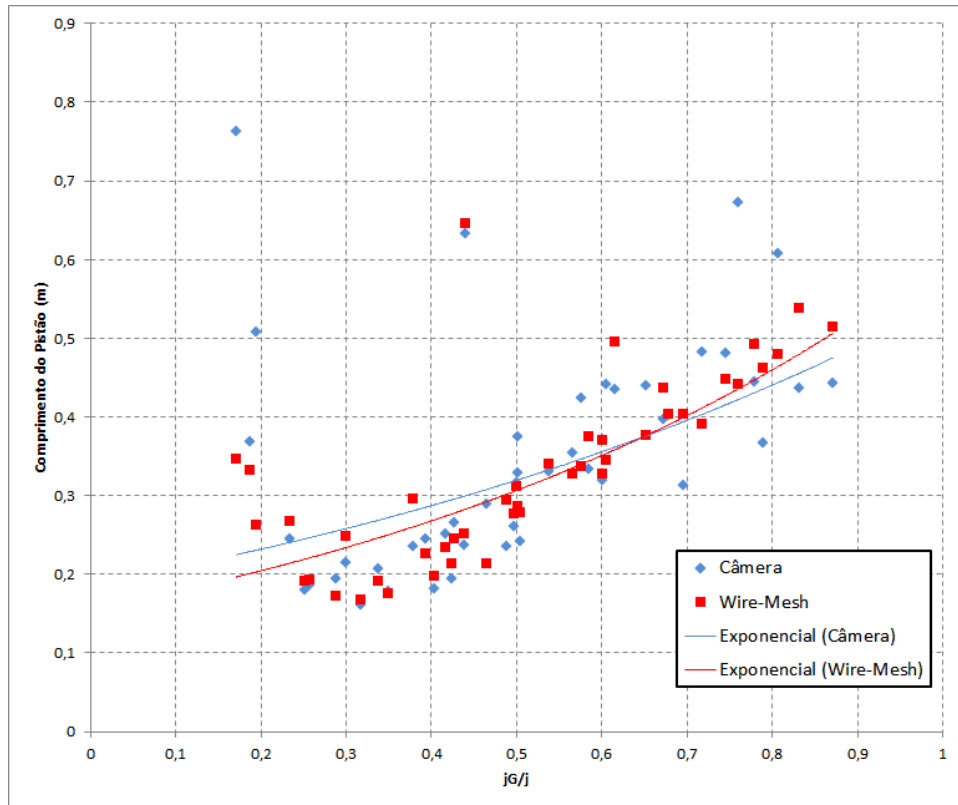


Figura 5.13 – Análise do comprimento do pistão WMS x Câmera

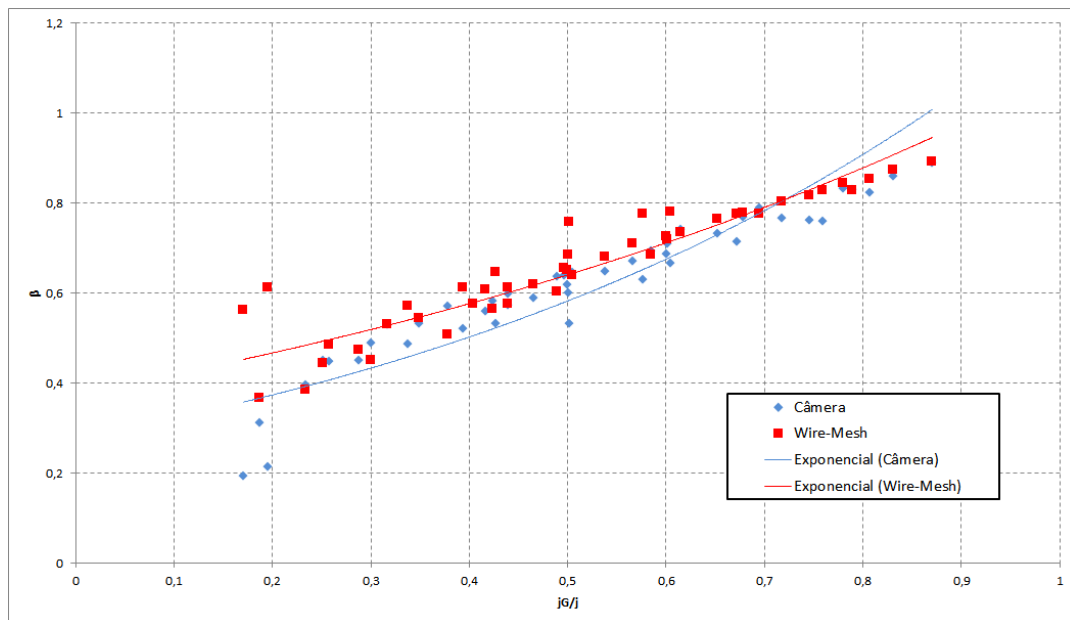


Figura 5.14 – Relação comprimento do pistão x comprimento célula unitária – Fator de intermitência

De forma geral os resultados aqui apresentados têm como objetivo aferir a técnica com dados da câmera de alta velocidade. Analisando os valores de comprimento e fator de intermitência observa-se uma boa concordância da técnica.

5.2.7 Velocidade superficial do gás

Como resultado quantitativo de forma a fundamentar o funcionamento do algoritmo proposto, podem-se visualizar os resultados obtidos de velocidade superficial do gás na Figura 5.15. Para determinar o j_G foi calculada a vazão da fase gasosa e dividida pela área transversal da tubulação descrita na sessão 2.1.1.

O algoritmo de processamento dos dados da câmera de alta velocidade teve seus dados apresentados no mesmo gráfico. Podemos observar que em geral, os resultados do algoritmo proposto tem uma correlação satisfatória para a maioria dos experimentos realizados, dentro da margem de + ou - 10% de incerteza.

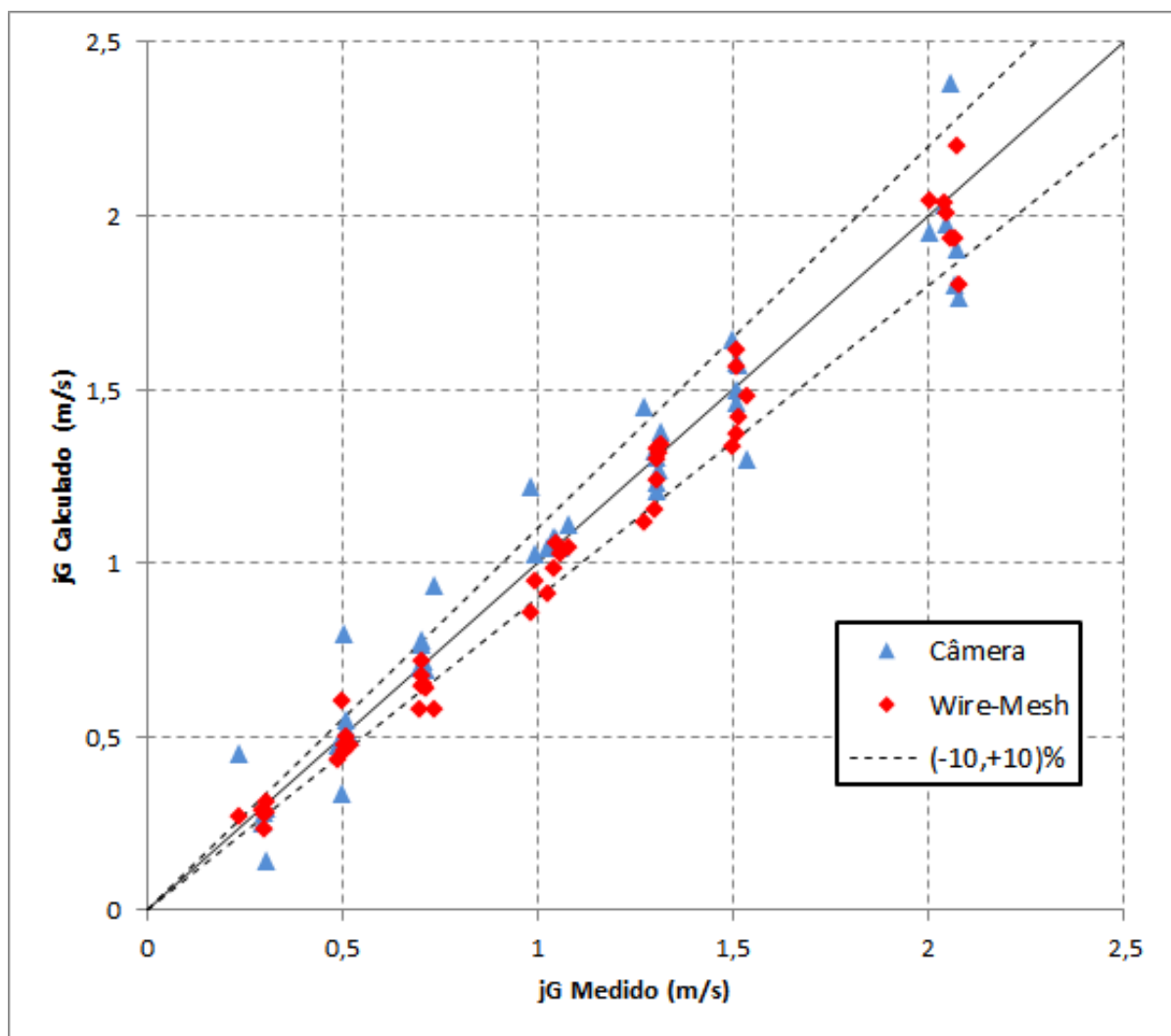


Figura 5.15 – Comparativo da velocidade superficial do gás calculada pelo algoritmo proposto

6 CONCLUSÃO

Durante todo o desenvolvimento deste trabalho foi realizado um estudo em escoamentos bifásicos gás-líquido analisando seus fenômenos nas investigações experimentais. Neste trabalho foi utilizado o escoamento bifásico em sua configuração horizontal com as substâncias água e ar. O padrão intermitente foi escolhido devido a sua importância no estudo do escoamento bifásico.

A fim de analisar este padrão em detalhes, optou-se utilizar o sensor *wire-mesh* devido as suas características quanto à resolução espacial e temporal, possibilitando extrair dados com maior grau de detalhamento. Por ser um sensor de imageamento, a área de processamento de imagens teve uma participação essencial no desenvolvimento, onde o uso de técnicas de segmentação de imagens se mostram eficientes no auxílio de identificação de objetos. Neste trabalho o uso da técnica de segmentação 3D utilizando crescimento de regiões foi utilizada devida melhor compatibilidade com o tipo de dado a ser tratado. Com base nas informações extraídas a partir do sensor *wire-mesh* foi apresentada uma metodologia para extração de parâmetros quantitativos do escoamento, que possibilita a extração de parâmetros como fração das fases, velocidade de translação das bolhas, comprimento dos componentes da célula unitária, volume e vazão de gás, velocidade superficial da fase gasosa entre outros.

Neste trabalho, apresentou-se o desenvolvimento de um software para interpretar os dados do sensor *wire-mesh*. Por tanto, foi desenvolvido um algoritmo para extração de parâmetros de interesse em escoamentos bifásicos com base em métodos de processamento de imagem para aquisição, análise e reconstrução de dados. A principal contribuição desta dissertação consiste em disponibilizar uma ferramenta para o estudo experimental de escoamentos bifásicos utilizando o sensor *wire-mesh*, a qual poderá ser empregada em estudos posteriores.

Para a validação do algoritmo proposto, foram realizados testes com injeção de volume controlado no circuito experimental. Os resultados obtidos neste teste apresentaram valores com boa concordância com os valores de volume injetados e possibilitaram a submeter o algoritmo a testes em escoamentos bifásicos gerados de forma contínua para vários padrões de escoamento na configuração horizontal. Estes testes tiveram seus resultados comparados com outras técnicas de medição e modelos propostos na literatura. Em geral, esses resultados apresentaram boa concordância, comprovando a eficiência de todo o sistema.

Com base nos dados experimentais obtidos, é possível analisar e desenvolver ou refinar modelos sobre o comportamento do escoamento, além de proporcionar uma base de dados para estudos posteriores.

Alguns pontos que não foram abordados neste trabalho e que podem ser analisados em trabalhos futuros:

- Uso extensivo do *software* para análise dos escoamentos.
- Utilizar outros sensores *wire-mesh* com maior resolução.
- Reprodução e reconstituição do escoamento em visualização 3D.
- Estudo detalhado para outros padrões, como por exemplo: bolhas dispersas, anular.

REFERÊNCIAS

- ABDUL-MAJEED, G. H. Liquid slug holdup in horizontal and slightly inclined two-phase slug flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 27, p. 27-32, 2000.
- AHMED, W. H.; ISMAIL, I. B. Innovative Techniques for Two-Phase Flow Measurements. **Recent Patents on Electrical Engineering**, v. 1, n. 1, 2008.
- AMARAL, C. E. F. ALVES, R. F. DA SILVA, M. J. et al. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal turbulent two-phase slug flows. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. **Anais...**, 2011. Denver, USA.
- ANDREUSSI, P. BENDIKSEN, K. H.; NYDAL, O. J. Void distribution in slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 19, p. 817-828, 1993.
- BAKER, O. Simultaneous Flow of Oil and Gas. **Oil and Gas Journal**, v. 53, n. 12, p. 183 - 195, 1954.
- BARNEA, D.; TAITEL, Y. Flow pattern transition in two-phase gas-liquid flows. **Encyclopedia of Fluid Mechanics**, 1986.
- BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of the long bubbles in inclined tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 10, p. 467-483, 1984.
- BEUCHER, S.; LANTUEJOL, C. Use of watersheds in contour detection. International Workshop on Image Processing. **Anais...** p.2.1-2.12, 1979. Rennes, France.
- BIENIEK, A. BURKHARDT, H. MARSCHNER, H. NÖLLE, M.; SCHREIBER, G. A parallel watershed algorithm. 10th Scandinavian Conference on Image Analysis (SCIA97). **Anais...** p.237-244, 1997.
- BRENNEN, C. E. **Fundamentals of Multiphase Flow**. Cambridge University, 2005.
- CAO, Z. WANG, H. X. YANG, W Q; YAN, Y. A calculable sensor for electrical impedance tomography. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 140, n. 2, p. 156-161, 2007. Elsevier Science SA.
- COOK, M.; BEHNIA, M. Film profiles behind liquid slugs in gas-liquid pipe flow. **AIChE Journal**, v. 43, n. 9, p. 2180-2186, 1997.
- CROWE, C. T. **Multiphase Flow Handbook**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.
- DA SILVA, M. J. **Impedance Sensors for Fast Multiphase flow**, 2008. Technical University of Dresden, Alemanha.

DA SILVA, M. J. SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. Capacitance wire-mesh sensor for fast measurement of phase fraction distributions. **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 7, p. 2245-2251, 2007. IOP PUBLISHING LTD.

DA SILVA, M. J. THIELE, S. ABDULKAREEM, L. AZZOPARDI, B. J.; HAMPEL, U. High-resolution gas–oil two-phase flow visualization with a capacitance wire-mesh sensor. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 21, n. 3, p. 191-197, 2010. Elsevier Ltd.

DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal and near horizontal tubes. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 14, n. 4, p. 337-347, 1975.

DUNS, H.; ROS, N. C. J. Vertical flow of gas and liquid mixtures in wells. **Proc. World Petroleum Congress**, v. 6, p. 451-465, 1963.

DYAKOWSKI, T. Applications of electrical tomography for gas–solids and liquid–solids flows — a review. **Powder Technology**, v. 112, n. 3, p. 174-192, 2000.

FAGUNDES NETTO, J. R. FABRE, J.; PARESSON, L. Shape of long bubbles in horizontal slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 25, p. 1129-1160, 1999.

FALCONE, G. HEWITT, G. F.; ALIMONTI, C. **Multiphase Flow Metering: Principles and Applications - Developments in Petroleum Science**. Elsevier Science, 2009.

FU, K. S.; MUI, J. K. A survey on image segmentation. **Pattern Recognition**, v. 13, n. 1, p. 3-16, 1981.

GHAJAR, A. J. Non-boiling heat transfer in gas-liquid flow in pipes: a tutorial. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 27, p. 46-73, 2005. scielo.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. Addison-Wesley, 1987.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. Addison-Wesley, 1993.

GOULD, T. L. TEK, M. R.; KATZ, D. L. Two phase flow through vertical, inclined or curve pipes. **Journal of Petroleum Technology**, v. 26, p. 915-926, 1974.

GOVIER, G. W.; AZIZ, K. **The flow of complex mixtures in pipes**. Van Nostrand Reinhold Co., 1972.

GREGORY, G. A. NICHOLSON, M. K.; AZIZ, K. Correlation of the liquid volume fraction in the slug for horizontal gas-liquid slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 1, p. 33-39, 1978.

GREGORY, G. A.; SCOTT, D. S. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid. **AIChE Journal**, 1969.

GRESKOVICH, E. J.; SHRIER, A. L. Slug Frequency in Horizontal Gas-Liquid Slug Flow. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**, v. 11, n. 2, p. 317-318, 1972.

GRIFFITH, P.; WALLIS, G. B. Two-Phase Slug Flow. **Journal of Heat Transfer**, v. 83, p. 307-320, 1961.

GRIMSON, W. E. L.; LOZANO-PEREZ, T. Localizing Overlapping Parts by Searching the Interpretation Tree. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 9, n. 4, p. 469-482, 1987.

GUO, F. YANG, Y. CHEN, B.; GUO, L. A novel multi-scale edge detection technique based on wavelet analysis with application in multiphase flows. **Powder Technology**, v. 202, n. 1-3, p. 171-177, 2010. Elsevier B.V.

HALE, C. P. **Slug formation, growth and decay in gas-liquid flows**, 2000. Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.

HALL, L. D. Roles for Magnetic resonance imaging in process tomography. **IEEE Sensors Journal**, v. 5, 2005.

HAMPEL, U. BIEBERLE, A. HOPPE, D. et al. High resolution gamma ray tomography scanner for flow measurement and non-destructive testing applications. **Review of Scientific Instruments**, v. 78, 2007.

HARALICK, R. M.; SHAPIRO, L. G. **Computer and Robot Vision**. Addison-Wesley, 1992.

HEINDEL, T. J. GRAY, J. N.; JENSEN, T. C. An X-ray system for visualizing fluid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 19, p. 67-78, 2008.

HEWITT, G. F.; ROBERTS, D. N. **Studies of two-phase flow patterns by simultaneous x-ray and flash photography**. 1969.

HEYGSTER, G. Rank filters in digital image processing. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 17, p. 148-164, 1982.

HEYWOOD, N. I.; RICHARDSON, J. F. Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: Determination of liquid holdup by y-ray absorption. **Chemical Engineering Science**, v. 34, n. 1, p. 17-30, 1979.

HORI, K. FUJIMOTO, T.; KAWANISHI, K. Development of ultra-fast X-ray computed tomography scanner system. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 45, p. 2089-2094, 1998.

HOUGH, P. V. C. **Methodos and Means for Recognizing Complex Patterns**. ,1962.

HOUT, R. V. BARNEA, D.; SHEMER, L. Translational velocities of elongated bubbles in continuous slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, n. 8, p. 1333-1350, 2002.

HOYLE, B. S. Process tomography using ultrasonic sensors. **Measurement Science and Technology**, v. 7, p. 272-280, 1996.

JOHANSEN, G. A. Nuclear tomography methods in industry. **Nuclear Physics**, v. 752, p. 696c-705c, 2005.

KOKAL, S. L.; STANISLAV, J. F. An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes – II: liquid holdup and pressure drop. **Chemical Engineering Science**, v. 44, n. 3, p. 681-693, 1989.

LOPES, E. **Tutorial de Geoprocessamento**. Springer-Verlag, 1996.

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, n. 55, p. 537, 1974.

MANTLE, M. D.; SEDERMAN, A. J. Dynamic MRI in chemical process and reaction engineering. **Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy**, v. 43, p. 3-60, 2003.

MARASHDEH, Q. WARSITO, W. FAN, L. S.; TEIXEIRA, F. L. A Multimodal Tomography System Based on ECT Sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 7, p. 426-433, 2007.

MARCANO, R. CHEN, T. X. SARICA, C.; BRILL, J. P. A Study of Slug Characteristics for Two-Phase Horizontal Flow. International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico. **Anais...** p.213-219, 1998.

MATTAR, L.; GREGORY, G. A. Air oil slug flow in an upward-inclined pipe – I: Slug velocity, holdup and pressure gradient. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, v. 13, n. 1, 1974.

MAYOR, T. PINTO, A.; CAMPOS, J. Vertical slug flow in laminar regime in the liquid and turbulent regime in the bubble wake—Comparison with fully turbulent and fully laminar regimes. **Chemical Engineering Science**, v. 63, n. 14, p. 3614-3631, 2008. Elsevier Ltd.

MCKEEN, T. R.; PUGSLEY, T. S. The influence of permittivity models on phantom images obtained from electrical capacitance tomography. **Measurement Science and Technology**, v. 13, p. 1822-1830, 2002.

MEIJSTER, A; ROERDINK, J B T M. A Proposal for the Implementation of a Parallel Watershed Algorithm. (V. Hlaváč & R. Šára, Eds.) **Computer Analysis of Images and Patterns**, v. 970, p. 790-795, 1995. Springer-Verlag.

MEYER, F. Topographic distance and watershed lines. **Signal Processing**, v. 38, p. 113-125, 1994.

MEYER, F.; BEUCHER, S. Morphological segmentation. **Journal of Visual Communications and Image Processing**, v. 1, n. 1, p. 21-46, 1990.

NICHOLSON, M. K. AZIZ, K.; GREGORY, G. A. Intermittent two phase flow in horizontal pipes: predictive models. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 56, p. 653-663, 1978.

NICKLIN, D. Two-phase bubble flow. **Chemical Engineering Science**, v. 17, n. 9, p. 693-702, 1962.

OSORIO, F. S.; BITTENCOURT, J. R. Sistemas inteligentes baseados em redes neurais artificiais aplicados ao processamento de imagens. Workshop de Inteligencia Artificial. **Anais...** v. 1, 2000.

PARKER, D. J.; MCNEIL, P. A. Positron emission tomography for process applications. **Measurement Science and Technology**, v. 7, p. 287 - 296, 1996.

PECCINI, G; ORNELLAS, M. C. Segmentação de Imagens por Watersheds: Uma implementação Utilizando a Linguagem Java. **REIC - Revista Eletrônica de Iniciação Científica ANO V. Nº 5**, 2005.

PHAM, D. L.; PRINCE, J. L. A Survey of Current Methods in Medical Image Segmentation. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, v. 18, n. 9, p. 737-752, 1999.

PRASSER, H. M. BÖTTGER, A.; ZSCHAU, J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 9, p. 111-119, 1998.

RAHIMAN, M. H. F. RAHIM, R. A.; TAJJUDIN, M. Ultrasonic transmission-mode tomography imaging for liquid/gas two-phase flow. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, p. 1706 - 1715, 2006.

ROERDINK, JOS B. T. M.; MEIJSTER, ARNOLD. The Watershed Transform: Definitions, Algorithms and Parallelization Strategies. **Fundamenta Informaticae**, v. 41, p. 187-228, 2001.

ROSENFELD, A.; KAK, A. **Digital Picture Processing**. 1st ed. Academic Press, 1982.

RUSS, J. C. **The Image Processing Handbook**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995.

SHOHAM, O. **Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow**. 1st ed. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2006.

SOARES, M. A. **Caracterização do escoamento bifásico gás-líquido utilizando o sensor de malha de eletrodos - wire-mesh sensor**, 2010. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

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

SUPARDAN, M. D. MASUDA, Y. MAEZAWA, A.; UCHIDA, S. The Investigation of gas holdup distribution in a two-phase bubble column using ultrasonic computed tomography. **Chemical Engineering Journal**, v. 130, p. 125-133, 2007.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, 1976.

TAPP, H. S. PEYTON, A. J. KEMSLEY, E. K.; WILSON, R. H. Chemical engineering applications of electrical process tomography. **Sensors and Actuators**, v. B 92, p. 17-24, 2003.

UJANG, P. M. **Studies of slug initiation and development in two-phase gas-liquid pipeline flow**, 2003. Imperial College London.

URSENBACHER, T. Interfacial measurements in stratified types of flow. Part I: New optical measurement technique and dry angle measurements. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 30, n. 2, p. 107-124, 2004. Elsevier.

VIEIRA, N. H.; OGE, M. F. **Processamento Digital de Imagens**. São Paulo: Brasport, 1999.

VINCENT, L.; SOILLE, P. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 13, n. 6, p. 583-598, 1991.

WALLIS, G. B. **One dimensional two-phase flow**. New York: McGraw Hill, 1969.

WEISMAN, J.; KANG, S. Y. Flow pattern transition in vertical and upwardly inclined lines. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 7, p. 272-291, 1981.

XIE, C. G. REINECKE, N. BECK, M. S. MEWES, D.; WILLIAMS, R. A. Electrical Tomography Techniques for Process Engineering Applications. **The Chemical Engineering Journal**, v. 56, p. 127-133, 1995.

YANG, M. SCHLABERG, H. I. HOYLE, B. S. BECK, M. S.; LENN, C. Real-time ultrasound process tomography for two-phase flow imaging using a reduced number of transducers. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 46, p. 492-501, 1999.

YANG, W. Q.; PENG, L. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography. **Measurement Science and Technology**, v. 14, p. R1-R13, 2003.

YORK, T. A. Status of electrical tomography in industrial applications. **Journal of Electronic Imaging**, v. 10, p. 698-619, 2001.

ZAMPERONI, P. Analysis of some region growing operators for Image segmentation. In: V. Cappellini; R. Marconi (Eds.); **Advances in Image processing and Pattern Recognition**. p.204-208, 1986. North Holland, Amsterdam.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DO CIRCUITO EXPERIMENTAL

A.1 SISTEMA DE GÁS

Para o circuito de alimentação de gás além do rotâmetro, foi utilizado um sistema de medição de vazão por placa de orifício. Um transdutor de pressão diferencial realiza a leitura da pressão antes e depois do orifício. Desta forma, é possível enviar os dados das medições para o *software* de instrumentação, efetuando o cálculo de vazão para as medições posteriores.

Inicialmente analisa-se a tabela de calibração do rotâmetro (Tabela A.1) onde se verifica que para ar à temperatura de 20.0 °C e pressão de 101,325 kPa, tem-se a seguinte relação entre SKT e Vazão.

Tabela A.1 – Dados da curva de calibração do rotâmetro

SKT	Vazão [l/h]	SKT	Vazão [l/h]
0,2	320	54,8	1900
6,8	500	58,2	2000
10,5	600	61,6	2100
14,2	700	65	2200
17,8	800	68,4	2300
21,5	900	71,8	2400
25,1	1000	75,2	2500
28,3	1100	79,1	2600
31,5	1200	83	2700
34,7	1300	86,9	2800
37,9	1400	90,8	2900
41,2	1500	94,8	3000
44,6	1600	98,7	3100
48	1700	102,6	3200
51,4	1800		

Analisando estes dados em um gráfico (Figura A.1), acha-se uma reta que os interpola, tendo assim uma relação para o SKT e a vazão nas condições de calibração.

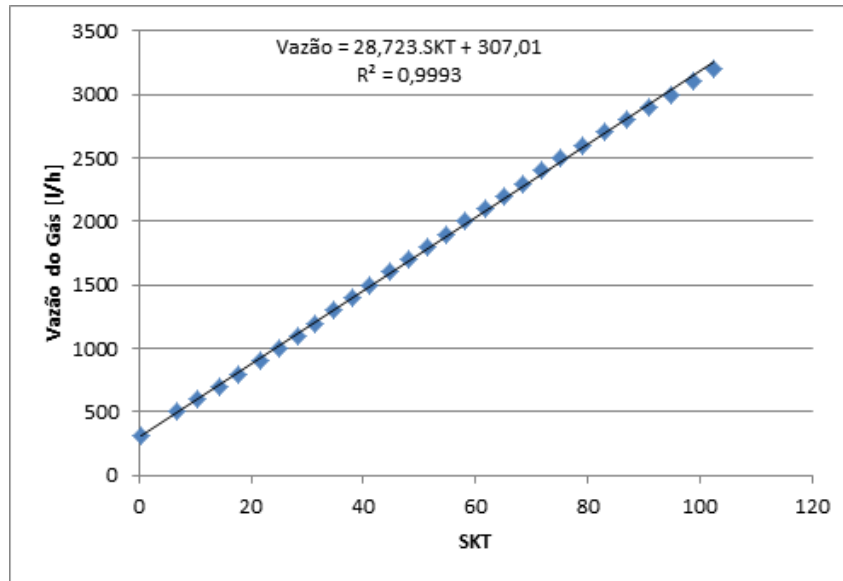


Figura A.1 – Curva de calibração do rotâmetro

Assim sendo, a 20.0 °C e 1,01325 bar a conversão se SKT para vazão \dot{Q}_{ROT} [l/h] é:

$$\dot{Q}_{ROT} = 28,723.SK + 307,01 \quad (A.1.)$$

Como o gás é compressível, é necessário corrigir a vazão lida no rotâmetro \dot{Q}_{ROT} com a pressão e a temperatura do gás. Obtendo a vazão volumétrica correta (\dot{Q}_C).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_C &= \dot{Q}_{ROT} \sqrt{\frac{(P_{ROT} + P_{atm})}{1,0325} \frac{(20 + 273,15)}{(T_{GAS} + 273,15)}} \\ &= (28,723.SK + 307,01) \sqrt{\frac{(P_{ROT} + P_{atm})}{1,0325} \frac{(20 + 273,15)}{(T_{GAS} + 273,15)}} \end{aligned} \quad (A.2.)$$

Os valores acima 20 °C e 1,0325 bar provêm das condições de calibração, enquanto que P_{ROT} e T_{GAS} vem das condições de operação.

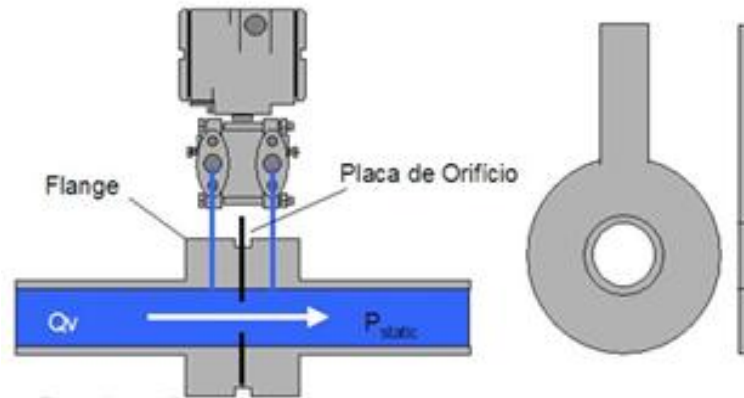


Figura A.2 – Ilustração de uma placa de orifício

Analisando a vazão na placa de orifício (Figura A.2), temos que pode ser descrita por:

$$\dot{Q}_{P.O.} = C_d Y \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P_{P.O.} \cdot 9.80665}{\rho}} \quad (A.3.)$$

Onde $\beta = \frac{d_2}{d_1}$ e $A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$ são os parâmetros geométricos do sistema; o fator 9.80665 dentro da raiz é a conversão de mmH₂O para Pa. Y é fator de expansão e é dado pela seguinte fórmula:

$$Y = 1 - \frac{(0,41 + 0,35\beta^4)}{k} \left[1 - \frac{(P_{GAS} + P_{atm} - \Delta P_{P.O.} \cdot 9.80665 \cdot 10^{-5})}{(P_{GAS} + P_{atm})} \right] \quad (A.4.)$$

Onde $k = 1,4$ e o fator 9.80665×10^{-5} é a conversão de mmH₂O para bar. A densidade do ar ρ , é calculada da seguinte forma:

$$\rho = \frac{28,97 \cdot (P_{GAS} + P_{atm}) 10^5}{8314 (T_{GAS} + 273,15)} \quad (A.5.)$$

Onde C_d é o coeficiente de descarga, à ser obtido pela calibração.

Tendo obtido a vazão corrigida para o Rotâmetro \dot{Q}_C , relaciona-se com a equação da vazão na placa de orifício $\dot{Q}_{P.O.}$ para obter o coeficiente de descarga C_d :

$$(28,723.SKT + 307,01) \sqrt{\frac{(P_{ROT} + P_{atm}) (20 + 273,15)}{1,0325 (T_{GAS} + 273,15)}} = C_d Y \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P_{P.O.}}{\rho}} \quad (A.6.)$$

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_{P.O.} \quad (A.7.)$$

Assim sendo isolando C_d :

$$(28,723.SKT + 307,01) \sqrt{\frac{(P_{ROT} + P_{atm}) (20 + 273,15)}{1,0325 (T_{GAS} + 273,15)}} \left[Y \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P_{P.O.}}{\rho}} \right]^{-1} = C_d \quad (A.8.)$$

O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \rho \frac{\dot{Q}_{P.O.}}{A_2} d_2 \frac{1}{\mu} \quad (A.9.)$$

Onde μ é a viscosidade do ar.

Para obtenção do coeficiente de descarga, primeiramente é selecionado uma pressão, a montante da placa de orifício (P_{GAS}), que é regulado pela válvula reguladora na saída do tanque de gás.

Mantendo a pressão constante, regula-se um determinado SKT e calcula-se o C_d , este passo é repetido até completar toda a escala SKT do rotâmetro. É realizada uma média das medidas e o procedimento se repete para novas pressões.

Observa-se que C_d fica próximo de uma constante depois que o número de Reynolds é maior que 10^4 por esta razão, operamos a placa com esta calibração somente para números de Reynolds maiores que 10^4 .

Verifica-se que o comportamento de C_d é linear com a pressão absoluta (Figura A.3).

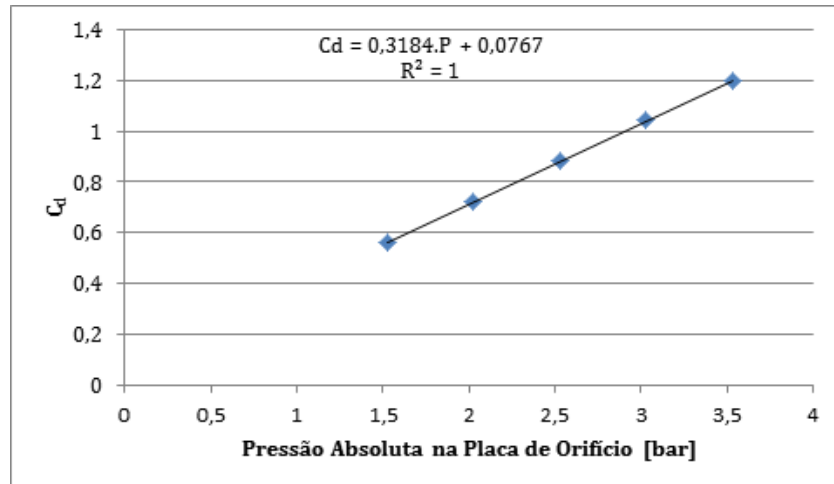


Figura A.3 – Relação entre a pressão absoluta da placa de orifício e o coeficiente de descarga

Avaliando a forma com que o valor de C_d varia, pode-se agora aferir a vazão na placa de orifício, da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{P.O.} = C_d Y \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P_{P.O.}}{\rho}} \quad (\text{A.10.})$$

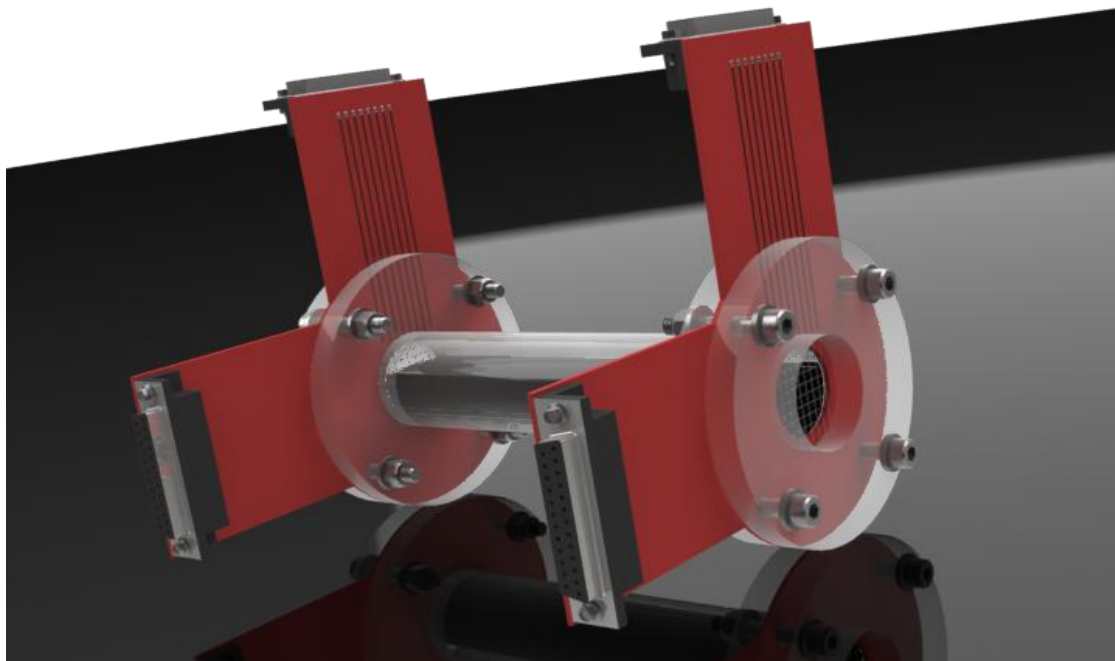
$$\dot{Q}_{P.O.} = [0,3184(P_{GAS} + P_{atm}) + 0,0767] Y \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P_{P.O.}}{\rho}} \quad (\text{A.11.})$$

A.1 SISTEMA DE LÍQUIDO

O circuito de líquido contém dois medidores de vazão de líquido do tipo coriolis. Em nosso estudo, utilizamos o medidor utilizado é o Optimass 7000 S25 da Krohme. Capaz de medir a vazão mássica, a densidade e temperatura, pode também calcular o volume e a velocidade do fluido. Sua capacidade máxima de operação é de 15800 lbs/min.

APÊNDICE B – MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO *SOFTWARE* WMA – *WIRE-MESH* ANALYSER

O WMA é um *software* capaz de extrair parâmetros de interesse a partir de dados oriundos do sensor *wire-mesh*.



B.1 RECOMENDAÇÕES DE SISTEMA

CPU: Dual Core Processor ou Athlon compatível.

Clock: 2.0 GHz

RAM: 4.0 GB

Memória de Vídeo: 64 MB

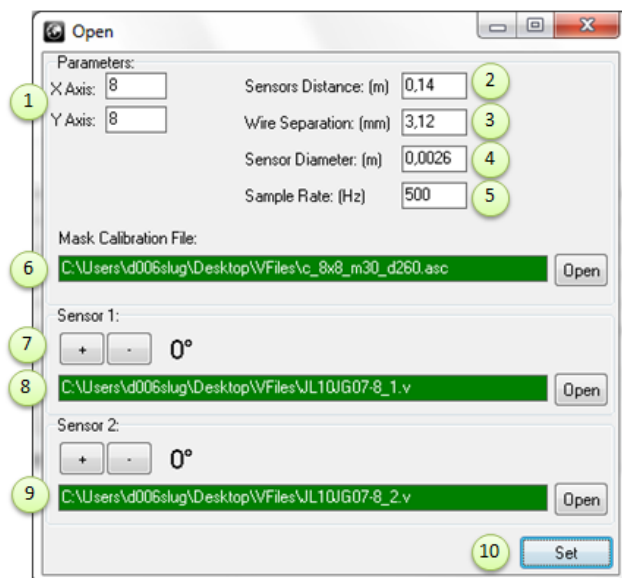
Sistema Operacional: Microsoft® Windows® 2000/XP/Vista/7

Espaço em disco: 50 M

B.2 TELAS

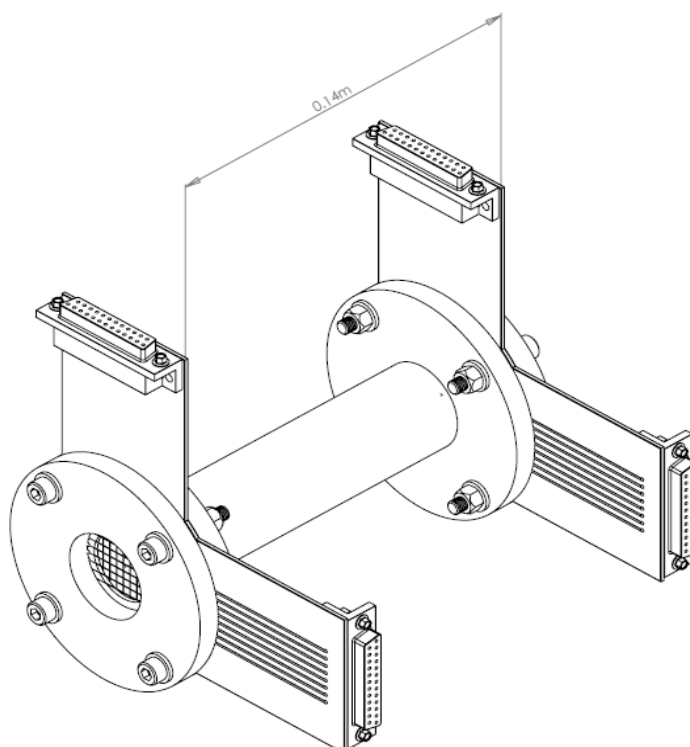
Nesta seção será apresentado um resumo das telas que compõem o sistema a fim de descrever suas funcionalidades.

B.2.1 Abrir arquivos

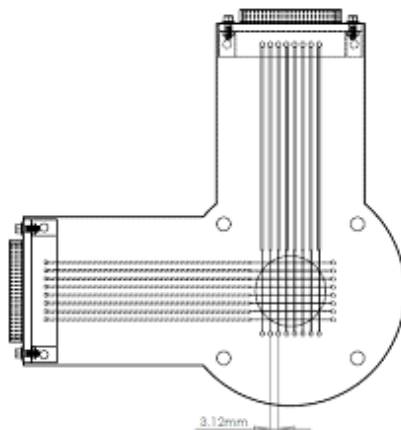


1 – Dimensão da malha do sensor

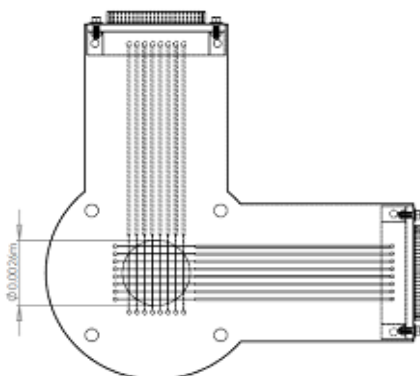
2 – Para o uso de dois sensores, deve ser informada a distância em (m) entre eles.



3 – Distância entre os fios do sensor.



4 – Diâmetro Interno do sensor.



5 – Taxa de aquisição das leituras (frequência de amostragem do sensor).

6 – Arquivo de configuração do sensor.

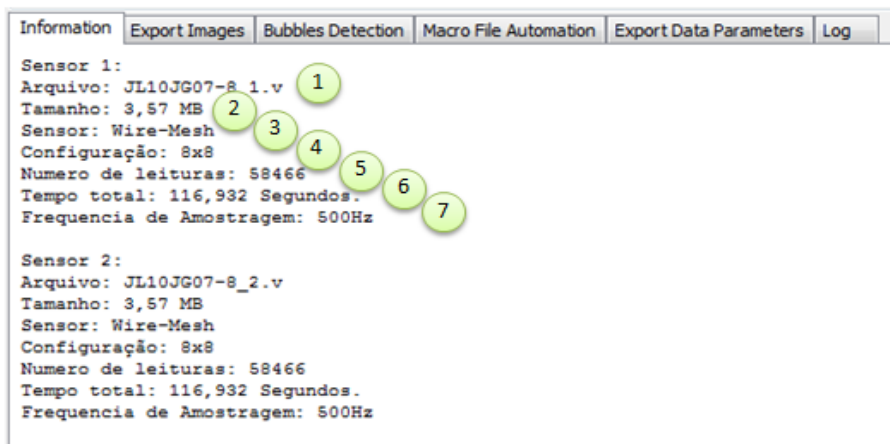
7 – Botões para rotacionar virtualmente os dados do sensor.

8 – Arquivo de dados do sensor 1.

9 – Arquivo de dados do sensor 2.

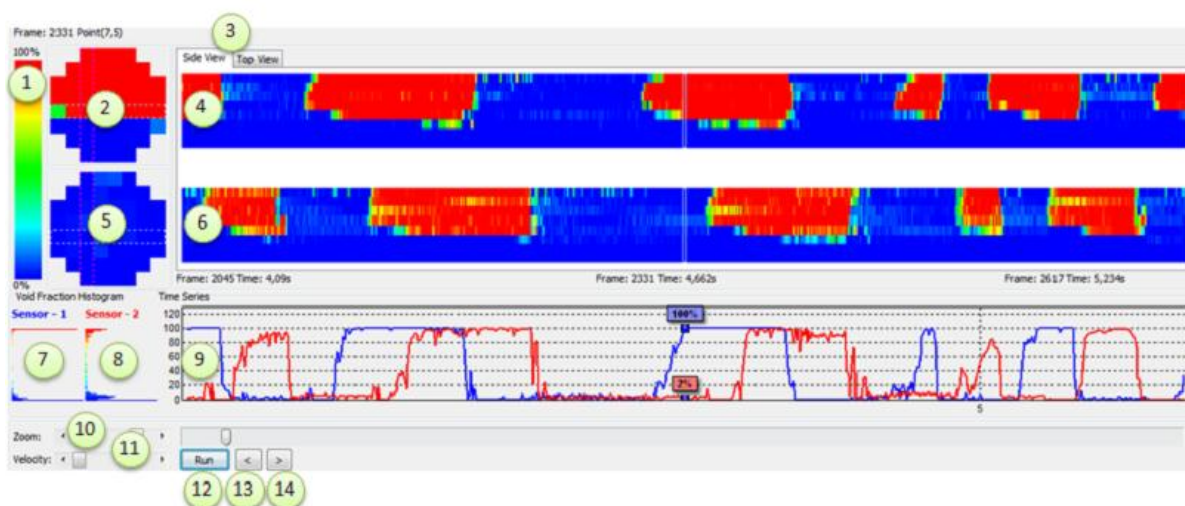
10 – Botão para salvar as alterações e abrir os arquivos selecionados.

B.2.2 Informações dos arquivos .V



- 1 – Nome do arquivo .V
- 2 – Tamanho do arquivo .V
- 3 – Tipo do sensor.
- 4 – Dimensões do sensor.
- 5 – Número de *frames* do arquivo carregado.
- 6 – Tempo total em (s) da leitura.
- 7 – Frequência de amostragem.

B.2.3 Visualizações



- 1 – Paleta de cores.
- 2 – Vista frontal do sensor 1.
- 3 – Seleccionador para vista lateral e superior.
- 4 – Vista lateral ou superior do sensor 1.

- 5 – Vista frontal do sensor 2.
- 6 – Vista lateral ou superior do sensor 2.
- 7 – Histograma da seção visualizada para o sensor 1.
- 8 – Histograma da seção visualizada para o sensor 2.
- 9 – Frações de vazio de ambos os sensores
- 10 – Controle de zoom.
- 11 – Controle de velocidade.
- 12 – Botão de iniciar ou parar animação.
- 13 – Botão para deslocar um frame para trás.
- 14 – Botão para deslocar um frame para frente.

B.2.4 Exportação de imagens



- 1 – Sensor.
- 2 – Tipo de vista a ser exportada.
- 3 – Intervalo de *frames*.
- 4 – Largura da imagem em *pixels*.
- 5 – Altura da imagem em *pixels*.
- 6 – Botão para atualizar imagem a ser exportada.
- 7 – Aumenta ou diminui o tamanho da imagem mantendo a proporção.
- 8 – Salva a imagem.

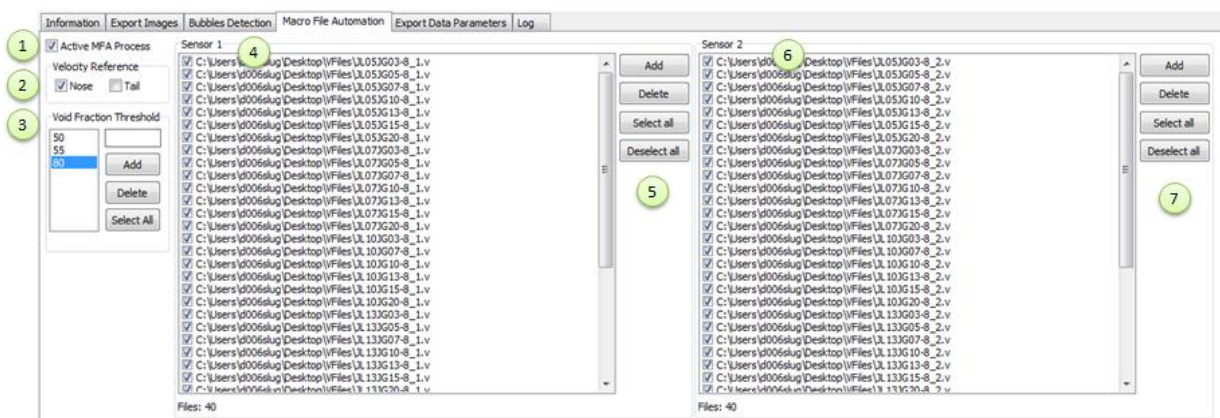
B.2.5 Detecção de bolhas

ID	Bubble 1	Bubble 2	Bubble Coordinates	Bubble X Size [cm]	Bubble Y Size [cm]	Bubble K Size [cm]	Piston K Size [cm]	Bubble KD [µs]	Bubble Gas Volume [ml]	Mean α Piston [%]	Velocity [m/s]	Transit Time [s]
1	2		0.7,0.5,45.120	2.5	1.87	31.29	18.94	45	0.9848	2.24	2.0588	0.152
12	2	3	0.7,0.5,165.218	2.5	1.87	21.6	26.4	165	0.6186	1.21	2	0.108
15	3	4	0.7,0.4,283.346	2.5	1.56	26.35	22.24	283	0.733	1.07	2.0588	0.128
18	4	5	0.7,0.5,399.487	2.5	1.87	36.65	28.41	399	1.1213	1.38	2.0588	0.178
29	5	6	0.7,0.5,555.604	2.5	1.87	20	13.2	555	0.5676	1.46	2	0.1
34	6	7	0.7,0.4,636.666	2.5	1.56	12.06	9.33	636	0.2608	1.92	1.9444	0.062
37	7	8	0.7,0.5,689.784	2.5	1.87	39.53	25.94	689	1.1965	1.71	2.0588	0.192

ID	Bubble 2	Bubble 1	Bubble Coordinates	Bubble X Size [cm]	Bubble Y Size [cm]	Bubble K Size [cm]	Piston K Size [cm]	Bubble KD [µs]	Bubble Gas Volume [ml]	Mean α Piston [%]	Velocity [m/s]	Transit Time [s]
1		1	0.7,0.4,0.24	8	5	25	56	0	6.69095890276642E-5	2.59		0.05
4	2	1	0.7,0.5,79.154	2.5	1.87	31.29	19.35	79	0.914	3.99	2.0588	0.152
9	3	2	0.7,0.4,200.254	2.5	1.56	22	25.6	200	0.5977	2.46	2	0.11
11	4	3	0.7,0.4,317.381	2.5	1.56	26.76	21.82	317	0.7198	2.46	2.0588	0.13
13	5	4	0.7,0.5,433.522	2.5	1.87	37.06	28.41	433	1.1035	2.9	2.0588	0.18
15	6	5	0.7,0.4,590.639	2.5	1.56	20	13.6	590	0.5566	3.18	2	0.1
17	7	6	0.7,0.4,672.698	2.5	1.56	10.5	10.11	672	0.2449	3.58	1.9444	0.054

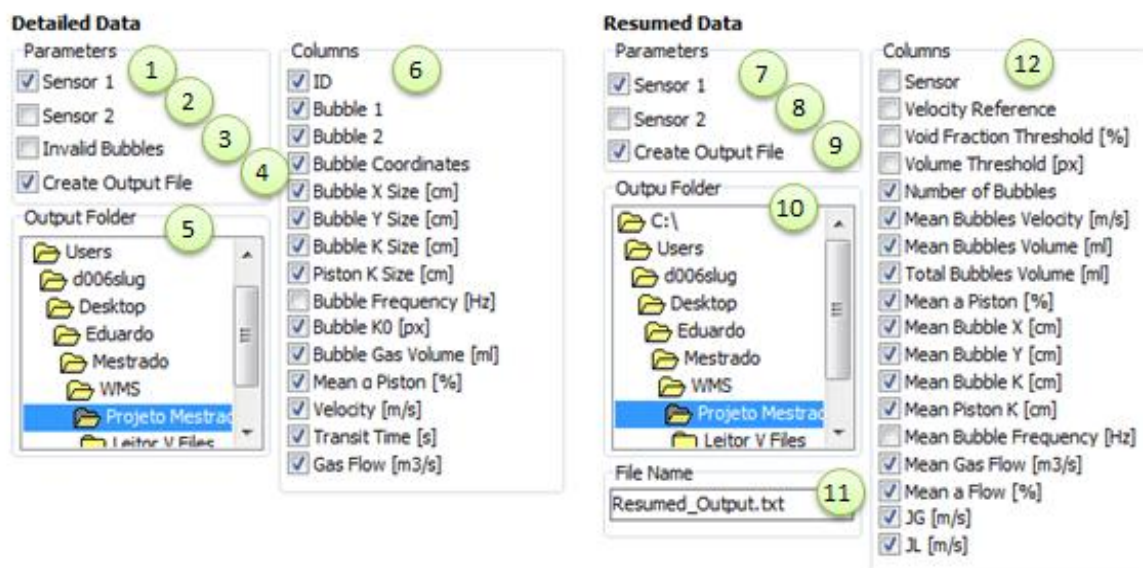
- 1 – Limiar de fração de vazio: Este valor determina a separação do gás e do líquido.
- 2 – Determina o volume mínimo para necessário em pixels³ para a bolha ser considerada como tal.
- 3 – Valor de fração de vazio automático: Utiliza a fração de vazio média como limiar.
- 4 – Referência de velocidade: Determina qual velocidade utilizar como referência para calculo dos demais parâmetros (frente, traseira, média).
- 5 – Calcula a perda de carga do misturador até a leitura do *wire-mesh* (utilizado para testes apenas).
- 6 – Opção que acompanha a visualização da bolha em sincroniza com os dados da tabela.
- 7 – Processa os dados.
- 8 – Processa os dados em massa.
- 9 – Valores calculados para o sensor 1.
- 10 – Valores médios calculados para o sensor 1.
- 11 – Valores calculados para o sensor 2.
- 12 – Valores médios calculados para o sensor 2.

B.2.6 MFA – Modo de processamento em lote



- 1 – Ativa o modo automático
- 2 – Referências de velocidade a serem utilizadas.
- 3 – Valores de fração de vazio a serem utilizados.
- 4 – Arquivos do sensor 1.
- 5 – Botões para manusear os arquivos.
- 6 – Arquivos do sensor 2.
- 7 – Botões para manusear os arquivos.

B.2.7 Configuração dos parâmetros de exportação



- 1 – Valores detalhados do sensor 1.

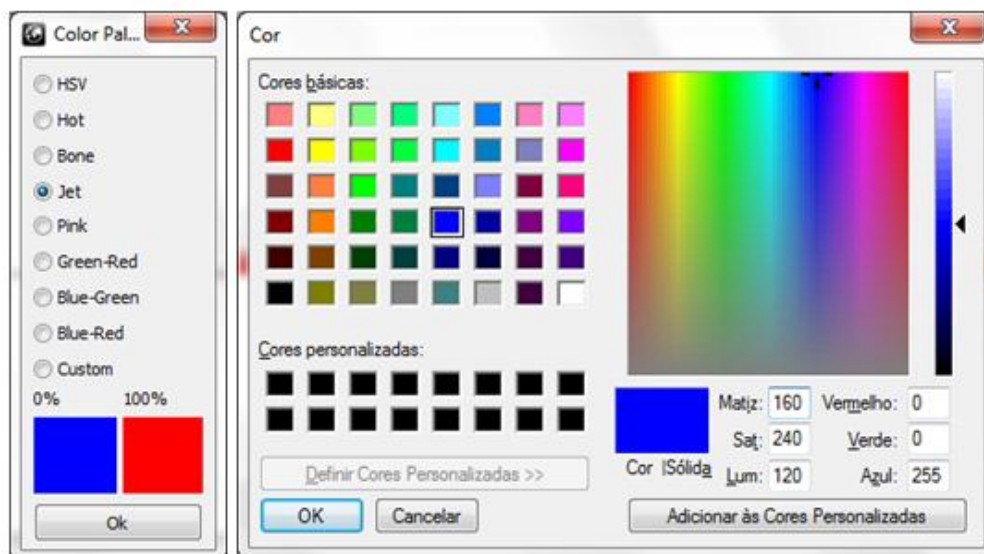
- 2 – Valores detalhados do sensor 2.
- 3 – Considera as bolhas inválidas nos dados.
- 4 – Cria arquivo para valores detalhados do processamento.
- 5 – Diretório onde será salvo o arquivo com os valores detalhados.
- 6 – Parâmetros a serem exportados.
- 7 – Valores resumidos do sensor 1.
- 8 – Valores resumidos do sensor 2.
- 9 - Cria arquivo para valores resumidos do processamento.
- 10 - Diretório onde será salvo o arquivo com os valores resumidos.
- 11 – Nome do arquivo resumido.
- 12 - Parâmetros a serem exportados

B.2.8 LOG de eventos

Information	Export Images	Bubbles Detection	Macro File Automation	Export Data Parameters	Log
01/03/11 - 14:46:25.192 - > Initializing Main Parameters					
01/03/11 - 14:46:25.196 - > Loading Calibration File					
01/03/11 - 14:46:25.222 - > Loading Sensor 1 Data					
01/03/11 - 14:46:25.838 - > Loaded Sensor 1 Data					
01/03/11 - 14:46:25.875 - > Loading Sensor 2 Data					
01/03/11 - 14:46:26.471 - > Loaded Sensor 2 Data					
01/03/11 - 14:46:26.506 - > Adjusting visual parameters					
01/03/11 - 16:09:59.179 - > Bubble Recognition Process - Sensor 1 Started					
01/03/11 - 16:09:59.180 - > Segmentaion Process - Sensor 1 Started					
01/03/11 - 16:09:59.320 - > Segmentaion Process - Sensor 1 Finished					
01/03/11 - 16:09:59.321 - > Primary Parameters Extraction - Sensor 1 Started					
01/03/11 - 16:10:23.925 - > Primary Parameters Extraction - Sensor 1 Finished					
01/03/11 - 16:10:23.926 - > Bubble Recognition Process - Sensor 1 Finished					
01/03/11 - 16:10:23.928 - > Bubble Recognition Process - Sensor 2 Started					
01/03/11 - 16:10:23.930 - > Segmentaion Process - Sensor 2 Started					
01/03/11 - 16:10:24.062 - > Segmentaion Process - Sensor 2 Finished					
01/03/11 - 16:10:24.064 - > Primary Parameters Extraction - Sensor 2 Started					
01/03/11 - 16:10:40.903 - > Primary Parameters Extraction - Sensor 2 Finished					
01/03/11 - 16:10:40.905 - > Bubble Recognition Process - Sensor 2 Finished					
01/03/11 - 16:10:40.907 - > Crossing Bubbles Data Started					
01/03/11 - 16:10:40.957 - > Calculating Parameters					
01/03/11 - 16:10:40.972 - > Crossing Bubbles Data Finished					
01/03/11 - 16:10:40.975 - > Adjusting Results					
01/03/11 - 16:10:40.984 - > Process Completed - (JL10JG07-8_1.v)/(JL10JG07-8_2.v)					

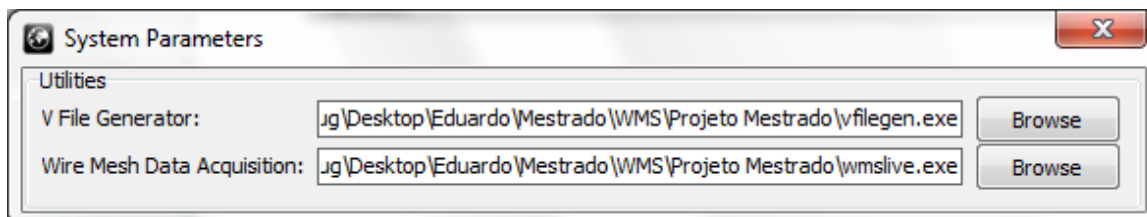
Apresenta informações sobre o processamento e atividades executadas no *software*.

B.2.9 Paleta de cores



Permite configurar as cores para os valores de fração das fases.

B.2.10 Parâmetros globais do sistema



Permite configurar diretórios para programas auxiliares.