

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

CÉSAR YUTAKA OFUCHI

**TÉCNICAS AVANÇADAS PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-
LÍQUIDO EM GOLFADAS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2011

CÉSAR YUTAKA OFUCHI

**TÉCNICAS AVANÇADAS PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-
LÍQUIDO EM GOLFADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do grau de "Mestre em Ciências" - Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Júnior

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Lúcia Valéria Ramos de Arruda

CURITIBA

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

O33 Ofuchi, César Yutaka
Técnicas avançadas para análise de escoamento bifásico gás-líquido em golfadas / César Yutaka Ofuchi — 2011.
78 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Flávio Neves Júnior.

Coorientadora: Lúcia Valéria Ramos de Arruda.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2011.

Bibliografia: f. 75-77.

1. Ultrassom. 2. Malha de Eletrodos. 3. Escoamento bifásico. 4. Processamento de sinais. 5. Gás – Escoamento. 6. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Neves Júnior, Flávio, orient. II. Arruda, Lúcia Valéria Ramos de, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Título da Dissertação N° 564:

“Técnicas Avançadas para Análise de Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Golfadas”

por

César Yutaka Ofuchi

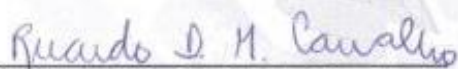
Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba, às 9h do dia 08 de julho de 2011. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:



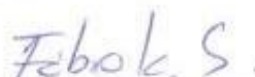
Prof. Flávio Neves Junior, Dr.
(Presidente – UTFPR)



Prof. Valdir Estevam, Dr.
(PETROBRAS)



Prof. Ricardo Dias Martins de Carvalho, Dr.
(UNIFEI)



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

Visto da coordenação:

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Nelson e Marina;
E a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha família e minha namorada, por todo carinho e apoio incondicional durante toda a fase de desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Flávio Neves Junior, e minha co-orientadora Prof.^a Lúcia Valéria Ramos de Arruda, pelo acompanhamento e orientação de todo o trabalho.

Aos professores Marco e Rigoberto pelas sugestões para realização desse trabalho.

Ao professor Carlos Amaral pelo companheirismo e ajuda prestada no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Rafael Daciuk, Geraldo Trabaquini e Galileu Terada por sempre estarem dispostos a me ajudar.

Aos colegas do LACIT, pela ajuda nos experimentos realizados.

Aos demais colegas do LASCA, pela amizade e companheirismo.

À UTFPR, pelas instalações oferecidas para a realização desse trabalho.

A toda equipe executora do projeto "Técnicas Ultrassônicas para Medição de Fração de Vazio e Concentração de Particulados em Escoamentos Multifásicos", realizada em parceria com as universidades UNICAMP e UNIFEI.

A todos os colegas que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Instituto de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) que por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor de Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-UTFPR) apoiaram financeiramente este projeto.



RESUMO

OFUCHI, César Yutaka. **Técnicas Avançadas para Análise de Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Golfadas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba.

A caracterização de escoamentos bifásicos em golfadas é de grande valia para o monitoramento e controle de processos industriais em que ele ocorre. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo utilizar técnicas de ultrassom, *wire-mesh* e filmagem de alta velocidade, para obter parâmetros que permitam a caracterização do fenômeno. Os dados experimentais foram obtidos em uma planta de testes, onde foi gerado um escoamento bifásico horizontal água-ar, no padrão em golfadas, em uma linha de 9 m de comprimento e 26 mm de diâmetro. Os dados adquiridos por ultrassom e *wire-mesh* foram tratados para obter informações de fração de vazio e de velocidade da bolha. Para auxiliar a análise, foram utilizadas outras técnicas como filmagens de alta velocidade e modelos mecânicos conhecidos na literatura.

Palavras-chave: ultrassom, *wire-mesh*, filmagem de alta velocidade, fração de vazio, escoamento bifásico, processamento de sinais.

ABSTRACT

OFUCHI, César Yutaka. **Two-phase Gás-Líquid Slug Flow Analysis using Advanced Techniques**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba.

Characterization of two-phase flows is important for monitoring and control of many industrial processes. In this regard, the proposed paper uses ultrasonic techniques, wire-mesh sensor and high-speed videometry to extract parameters of interest in horizontal gas-liquid two-phase slug flows. The experimental data were obtained from a test rig, where two-phase flow was generated in a horizontal line of 9 meters in length and 26mm in diameter. The ultrasound and wire-mesh data were processed to obtain parameters for characterizing the two-phase slug flow, such as void fraction and the elongated bubble velocity. To assist the analysis, other techniques such as high speed image acquisitions and theoretical models well know in the literature were used.

Keywords: ultrasound, wire-mesh, high-speed videometry, void fraction, two-phase flow, signal processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das variáveis de um escoamento em golfadas. Adaptado de Rodrigues (2009).	13
Figura 2 - Padrões de escoamento bifásico horizontal. (Fonte: Adaptado de http://www.thermopedia.com).	17
Figura 3 - Mapa de fluxo para escoamentos bifásicos horizontais em tubulação horizontal de 26 mm de diâmetro, pressão de 1 bar e temperatura de 20°C (Taitel e Dukler, 1976).	18
Figura 4 - Seção transversal de um duto com escoamento bifásico.	19
Figura 5 - Modos de propagação: (a) onda longitudinal. (b) onda transversal.	21
Figura 6 - Reflexão da onda em interfaces (Daciuk, 2008).	22
Figura 7 - Medidor de vazão ultrassônico por efeito Doppler.	23
Figura 8 - Aparato utilizado por Murakawa et al. (2005).	24
Figura 9 - Ultrassom modo transmissão recepção.	24
Figura 10 - Instrumentação ultrassônica utilizada por Superdan et al. (2007).	25
Figura 11 - Visão esquemática da instrumentação ultrassônica de Carvalho et al. (2009).	26
Figura 12 - Configurações de montagem de transdutores pulso-eco.	26
Figura 13 - Gráfico da energia do eco de Wada et al. (2006).	28
Figura 14 - Análise da energia do sinal de ultrassom (Carvalho et al., 2009).	28
Figura 15 - (a) Esquema simplificado do sensor <i>wire-mesh</i> . (b) Fotografia de um típico sensor desenvolvido. (Da Silva, 2008).	29
Figura 16 - Visualização dos dados obtidos pelo sensor <i>wire-mesh</i> em um escoamento vertical; (a) imagens da projeção lateral e (b) corte axial. Os padrões de escoamento também estão indicados (Da Silva, 2008).	30
Figura 17 - Circuito experimental de escoamento bifásico água-ar.	33
Figura 18 - Fotografia da seção de testes.	33
Figura 19 - (a) Seção transversal da instrumentação ultrassônica; (b) Esquemático lateral da instrumentação ultrassônica.	34
Figura 20 - Instrumentação ultrassônica na seção de testes.	35
Figura 21 - Transdutor de duplo elemento Panametrics.	35
Figura 22 - Sonda ultrassônica desenvolvida na UTFPR. (a) Placas de aquisição e excitação de sinais de ultrassom. (b) Invólucro mecânico utilizado para proteção do equipamento.	37
Figura 23 - Tela de aquisição em tempo real das ondas de ultrassom.	38
Figura 24 - Tela de "Aquisição em massa".	38
Figura 25 - Tela para abrir arquivo.	39
Figura 26 - Tela para configuração de parâmetros da Sonda Ultrassônica.	40
Figura 27 - Fotografia do sensor <i>wire-mesh</i> 8 x8 utilizado no estudo.	40
Figura 28 - Fotografia dos sensores <i>wire-mesh</i> instalados na seção de testes.	41
Figura 29 - Interface gráfica do programa de aquisição de dados do sensor <i>wire-mesh</i>	41
Figura 30 - Câmera de alta velocidade.	42
Figura 31 - Reflexões do pulso de ultrassom no escoamento.	44
Figura 32 - Conjunto de medidas de H_L	44
Figura 33 - Aquisição de imagem do escoamento. a) Corte no plano vertical, na quinta coluna de eletrodos. b) Corte no plano horizontal, na sexta linha de eletrodos c) Corte na seção transversal no instante de tempo 5 segundos.	45
Figura 34 - Diferença temporal entre os sinais medidos por ultrassom.	46
Figura 35 - Corelação cruzada entre dois sinais consecutivos.	47
Figura 36 - Imagens de uma bolha alongada adquiridas pela câmera de alta velocidade.	48
Figura 37 - Método para geração de série temporal de imagens do escoamento.	48

Figura 38 - Série temporal obtida com a junção de imagens.....	49
Figura 39 - Série temporal de fração de vazio.....	49
Figura 40 - Série temporal de um sensor capacitivo e os gráficos de <i>PDF</i> e <i>PSD</i> para um escoamento bifásico horizontal (dos Reis; Goldstein Jr., 2010).....	50
Figura 41 - Mapa de fluxo para um escoamento bifásico água-ar (Fonte: Adaptado de Taitel <i>et al.</i> , 1976).....	53
Figura 42 - Série temporal de fração de vazio gerada por técnicas de ultrassom e <i>wire-mesh</i>	55
Figura 43 - Variação da fração de vazio média com os parâmetros do escoamento.	56
Figura 44 - Série temporal de fração de vazio, para $J_L=0,5$ e $J_G=0,5$, por técnicas de ultrassom, imagem e <i>wire-mesh</i>	57
Figura 45 - (a) Seção considerada pelo ultrassom (b) Análise detalhada da seção feita pelo <i>wire-mesh</i>	57
Figura 46 - Série temporal de fração de vazio, para $J_L=2,0$ e $J_G=2,0$, por técnicas de ultrassom, imagem e <i>wire-mesh</i>	58
Figura 47 - Detalhes da série temporal de fração de vazio. (a) Nariz da bolha; (b) Meio da bolha; (c) Cauda da bolha; (d) Final da cauda da bolha.	59
Figura 48 - Comparação dos resultados obtidos pelas técnicas de ultrassom e <i>wire-mesh</i>	59
Figura 49 - Função densidade de probabilidade (<i>PDF</i>) da fração de vazio, para J_L constante J_G variável no padrão golfadas.	60
Figura 50 - Função densidade de probabilidade (<i>PDF</i>) da fração de vazio, para J_G constante e J_L variável, no padrão golfadas.	61
Figura 51 - <i>PSD</i> da fração de vazio de um escoamento bifásico de vazão constante do gás com o aumento progressivo da vazão do líquido.	62
Figura 52 - Séries temporais da fração de vazio de um escoamento bifásico em que a vazão do gás é mantida constante e a vazão do líquido é aumentada progressivamente.	62
Figura 53 - <i>PSD</i> da fração de vazio de um escoamento bifásico de vazão constante do líquido com aumento progressivo da vazão do gás.	63
Figura 54 - Séries temporais da fração de vazio de um escoamento bifásico em que a vazão do líquido é mantida constante a vazão do gás é aumentada progressivamente.	64
Figura 55 - Gráfico da velocidade da bolha conforme aumenta a velocidade superficial do líquido.	65
Figura 56 - Gráfico da velocidade da bolha conforme aumenta a velocidade superficial do gás.	65
Figura 57 - Gráfico da velocidade prevista por Bendiksen em relação à velocidade experimental obtida.	66
Figura 58 - Diferença nas velocidades da bolha obtidas pela técnica de ultrassom e pelo modelo teórico. a) Diferença percentual em relação à J_L e J_G . (b) Superfície de diferenças.	67
Figura 59- Gráfico da velocidade obtida pela técnica ultrassônica em relação a velocidade obtida pelo sensor <i>wire-mesh</i>	68
Figura 60 - Diferença na velocidade da bolha obtida pelas técnicas de ultrassom e <i>wire-mesh</i> . a) Diferença percentual em relação à J_L e J_G . (b) Superfície de diferenças.	68
Figura 61 - Séries temporais de fração de vazio geradas pelas técnicas <i>wire-mesh</i> e ultrassom para um escoamento de $J_L=1,0$ e $J_G=2,0$	69
Figura 62 - Análise da correlação cruzada da série temporal de fração de vazio do sensor <i>wire-mesh</i> . (abc) Gráficos em diversos níveis de zoom. (b) Diferença de tempo calculada pelo máximo da correlação cruzada.	70

Figura 63 - Análise da correlação cruzada da série temporal de fração de vazio do sensor ultrassônico. (abc) Gráficos em diversos níveis de zoom. (b) Diferença de tempo calculada pelo máximo da correlação cruzada. 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos para o cálculo da fração de vazio.	50
Tabela 2 - Coeficientes obtidos para o cálculo da velocidade da bolha.	51
Tabela 3 - Parâmetros combinados durante os testes experimentais.	52
Tabela 4 - Visualização do padrão em golfadas por imagens e pelas técnicas de ultrassom e wire-mesh.	53
Tabela 5 - Modelos para o cálculo da fração de vazio.	56

LISTA DE SIGLAS

AD	Analogic to digital
ANP	<i>Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis</i>
BCS	Bomba Centrífuga Submersa
FIFO	First in first out
IBP	<i>Instituto de Petróleo, Gás e Biocombustíveis</i>
IHM	Interface Homem Máquina
LACIT	Laboratório de Ciências Térmicas
LASCA	Laboratório de Sistema de Controle Avançado
MRI	Magnet Resonance Imaging
RAM	Random Access Memory
PDF	Probability Density Function
PIV	Particle Image Velocimetry
PSD	Power Spectral Density
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVO	14
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO.....	16
2.1.1 escoamento bifásico horizontal.....	16
2.1.2 Modelagem do escoamento bifásico em golfadas	18
2.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO PARA ESCOAMENTOS BIFÁSICOS	20
2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO ULTRASSÔNICAS	21
2.3.1 Método Doppler.....	23
2.3.2 Método Transmissão-Recepção.....	24
2.3.3 Método Pulso-Eco	26
2.3.3.1 Posição da interface	26
2.3.3.2 Energia do eco	27
2.4 TÉCNICA SENSOR WIRE-MESH.....	29
2.5 TÉCNICA DE FILMAGEM RÁPIDA	31
3 APARATO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	32
3.1 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO EXPERIMENTAL	32
3.2 INSTRUMENTAÇÃO ULTRASSÔNICA.....	33
3.2.1 Seção de teste.....	34
3.2.2 Sonda ultrassônica	35
3.2.2.1 Hardware	36
3.2.2.2 Software.....	37
3.3 SENSOR WIRE-MESH	40
3.4 INSTRUMENTAÇÃO DE FILMAGEM RÁPIDA	42
4 AQUISIÇÃO DE DADOS	43
4.1 ULTRASSOM.....	43
4.1.1 Medição do filme de líquido.....	43
4.1.2 Medição da fração de vazio	44
4.2 WIRE-MESH	45
4.3 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DA BOLHA	46
4.4 SÉRIE TEMPORAL DE IMAGENS DA CÂMERA	47
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	49
4.6 CORRELAÇÕES EMPIRÍCAS EXISTENTES NA LITERATURA	50
5 RESULTADOS	52
5.1 GRADE DE TESTES.....	52
5.2 VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO	53
5.3 ANÁLISE DA FRAÇÃO DE VAZIO	54
5.3.1 Séries temporais de fração de vazio	55
5.3.2 Funções densidade de probabilidade (PDF)	60
5.3.3 Função densidade espectral de potência (PSD).....	61
5.4 VELOCIDADE DA BOLHA.....	64
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	72
6.1 CONCLUSÕES.....	72
6.2 TRABALHOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS	75
ANEXO A	78

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de um escoamento composto simultaneamente por vários elementos em diferentes estados da matéria como, líquido, gasoso e sólido, caracteriza um escoamento multifásico. Na natureza, a grande maioria dos escoamentos é multifásico. Por exemplo, o transporte de sedimentos em rios e correntes marinhas e as nuvens formadas por gotas de líquido envoltas por gás. Em aplicações industriais, escoamentos multifásicos ocorrem em processos químicos que envolvam misturas, em geradores de energia a vapor, condensadores e no transporte de misturas em tubulações.

Um caso particular de escoamentos multifásicos são os escoamentos bifásicos de líquido e gás, frequentemente encontrados em tubulações de diversas atividades industriais, como na indústria química e de petróleo (Silva et al., 2000). Na área de exploração e produção de petróleo estes escoamentos estão presentes nas colunas de produção, linhas de surgência e *risers*. Nestes percursos, diferentes configurações interfaciais ou arranjos de fases acontecem, sendo o mais frequente o padrão de escoamento em “golfadas” ou *slug flow*.

O escoamento em golfadas é caracterizado pela sucessão de um pistão de líquido e uma bolha alongada, formando uma célula unitária. O pistão de líquido é uma região com grande quantidade de líquido, suficiente para separar duas bolhas alongadas adjacentes, podendo conter pequenas bolhas dispersas. No escoamento horizontal e inclinado, a bolha alongada localiza-se na parte superior da tubulação e o líquido na parte inferior.

A Figura 1 mostra uma célula unitária do escoamento em golfadas, contendo uma bolha alongada de comprimento L_B , volume de gás α e velocidade U_T , e um pistão de líquido de comprimento L_S e velocidade U_{LS} .

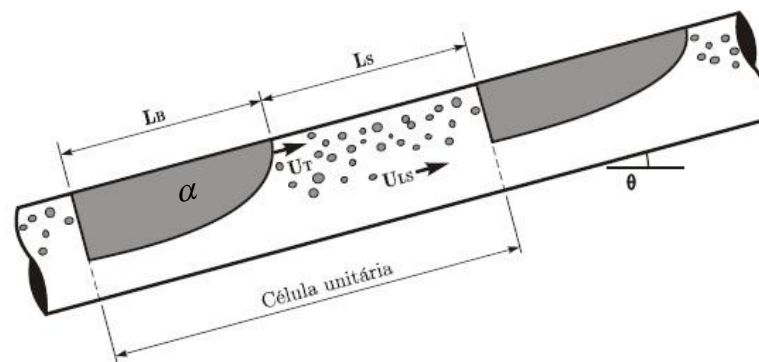


Figura 1 - Representação das variáveis de um escoamento em golfadas. Adaptado de Rodrigues (2009).

O escoamento em golfadas ocorre de maneira intermitente no espaço e no tempo, ou seja, os parâmetros citados anteriormente apresentam valores diferentes em um mesmo

referencial. Esta característica dificulta o funcionamento de equipamentos como separadores de produção de petróleo em plataformas, tornando fundamental a correta caracterização do escoamento bifásico em golfadas em relação à frequência de passagem da célula unitária, velocidade, comprimento e fração de vazio da bolha alongada, para que sejam tomadas medidas preventivas a fim de evitar a inundação do equipamento, e conseqüente parada na produção (Silva et al., 2000).

Para minimizar os problemas decorridos do fenômeno, faz-se necessário o uso de equipamentos de medição em tempo real de parâmetros como vazão, fração volumétrica, pressão, entre outros, necessários à compreensão e melhoria dos processos.

Diversas técnicas experimentais foram propostas no passado e têm sido utilizadas para investigar escoamentos bifásicos, entre elas podem-se citar as sondas condutivas e capacitivas, videometria de alta velocidade e técnicas complexas como a tomografia por raios-x e raios-gama (Da Silva, 2008). Entretanto, nenhuma das técnicas citadas tem uma aplicação universal e seu uso pode ser restrito a algumas condições específicas do escoamento.

Medidas por ultrassom possuem características desejáveis na indústria, pois são não-intrusivas, utiliza de radiação não-ionizante e os transdutores empregados são robustos. Contudo, a aplicação de técnicas ultrassônicas em escoamentos bifásicos ainda necessita de validação experimental. Já o sensor *wire-mesh*, sendo uma técnica mais complexa é capaz de fornecer imagens da distribuição de fase na seção transversal e propiciar informações detalhadas do escoamento, sendo, portanto, uma boa referência apesar de seu caráter intrusivo. Filmagens de alta velocidade possibilitam o acompanhamento visual do escoamento, sendo de grande valia para o seu entendimento.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo o estudo e a análise de um escoamento horizontal bifásico gás-líquido em golfadas, utilizando três técnicas de medição avançadas distintas: ultrassom, *wire-mesh* e filmagem de alta velocidade. Além das técnicas experimentais, também são utilizadas modelagens do fenômeno encontradas na literatura, a fim de verificar a coerência com trabalhos já consolidados.

Com isso, os seguintes objetivos específicos foram traçados para este trabalho:

- Gerar um escoamento bifásico água-ar na planta experimental e comparar os parâmetros obtidos a modelos mecânicos renomados na literatura, para que os dados obtidos sejam confiáveis.

- Empregar o protótipo (sistema de aquisição e geração de sinais de ultrassom) desenvolvido na UTFPR em uma planta experimental para monitoramento de escoamentos bifásicos água-ar em golfadas.
- Determinar parâmetros relevantes capazes de permitir a caracterização do escoamento como a fração de vazio, a velocidade e a frequência de passagem das bolhas alongadas a partir das técnicas de ultrassom e *wire-mesh*;
- Comparar os resultados obtidos com as filmagens de alta velocidade e modelos teóricos conhecidos na literatura.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos de escoamentos bifásicos em golfadas e das técnicas de medição por ultrassom e *wire-mesh*, utilizadas neste trabalho. Também é apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos com a medição de parâmetros de escoamento.

O Capítulo 3 mostra a seção de testes e a instrumentação utilizada.

O Capítulo 4 descreve o processamento dos dados para obtenção dos parâmetros para caracterização do escoamento.

O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos. Os parâmetros do escoamento, adquiridos pelas técnicas de ultrassom, *wire-mesh*, filmagem de alta velocidade e pelo modelo mecânico utilizado são comparados entre si.

No capítulo final, com base na pesquisa realizada, são apresentadas as conclusões e os possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica e a fundamentação teórica de escoamentos bifásicos, e as técnicas de medição existentes para caracterizar o fenômeno de escoamento bifásico. Primeiramente serão mostrados os fundamentos de escoamentos bifásicos, com enfoque no escoamento horizontal em golfadas. Em seguida, será apresentado o estado da arte em técnicas para caracterização do escoamento. Por último, será aprofundado o uso das técnicas de ultrassom e *wire-mesh*, utilizadas neste trabalho.

2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO

Em mecânica dos fluídos, uma fase se refere a um dos estados da matéria: sólido, líquido ou gasoso. Um escoamento bifásico é um escoamento composto por uma mistura de duas fases, como por exemplo, gás-líquido, líquido-sólido, sólido-líquido e assim por diante (Crowe, 2006). O comportamento das fases em um escoamento é sensível a variáveis como: geometria, tamanho e orientação do duto; condições operacionais (vazão, pressão, temperatura, etc.); propriedades das fases (densidade, viscosidade, etc.).

Os escoamentos também podem ser caracterizados de acordo com o posicionamento do duto em que ocorrem: horizontais, quando o duto se encontra em uma superfície plana; verticais, em que o duto está perpendicular ao plano; inclinados, quando a tubulação possui desde um pequeno ângulo com a horizontal, até chegar à posição vertical.

Em geral, os fenômenos mais estudados e de maior interesse para a indústria são os escoamentos bifásicos, gás-líquido, posicionados na vertical ou na horizontal. Nesta dissertação será estudado o caso de um escoamento bifásico horizontal água-ar.

2.1.1 Escoamento bifásico horizontal

As descrições dos padrões de escoamento horizontal, utilizadas neste trabalho, seguem de um modo geral os conceitos encontrados na literatura científica (Azzopardi, 2006; Silva, Filho, & Pinheiro, 2000; Crowe, 2006; Faccini, 2008; Guimarães, 2009). A Figura 2 apresenta os diferentes padrões de escoamento descritos a seguir:

- Bolhas Dispersas: o escoamento apresenta pequenas bolhas dispersas concentradas na parte superior da tubulação devido ao efeito gravitacional (o gás é mais leve que o líquido). A velocidade superficial do gás é muito menor que a do líquido.

- Estratificado Ondulado: acontece quando, em baixas velocidades, há uma clara separação entre líquido e o gás. Este estado é propício ao regime laminar, no qual as fases deslizam em camadas. O gás, mais leve, irá se organizar na parte superior e o líquido, mais denso, na parte inferior. Com o aumento da velocidade do gás, são formadas ondas na superfície do líquido, que resultam neste tipo de escoamento.
- Golfadas ou “*Slug*”: com aumento ainda maior da velocidade da fase gasosa do escoamento estratificado ondulado, surgem ondulações na superfície do líquido, as quais chegam a ocupar toda a seção transversal da tubulação, formando golfadas alternadas de líquido e gás.
- Anular: ocorre a partir de altas vazões de gás, que passa a se concentrar na parte central da tubulação. Com isso, o líquido escoava pela tubulação e forma uma fina película nas paredes do duto. Esta por sua vez, fica mais espessa na parte inferior, devido à ação da gravidade.

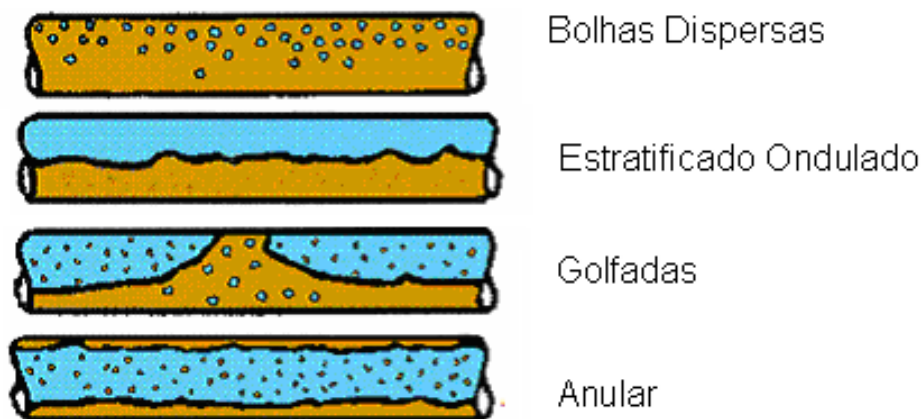


Figura 2 - Padrões de escoamento bifásico horizontal. (Fonte: Adaptado de <http://www.thermopedia.com>).

Outra forma de reconhecer os padrões de escoamento é o uso de diagramas chamados de mapas de fluxo, que relacionam alguns parâmetros característicos dos padrões de escoamento. O uso dessa ferramenta possibilita prever o padrão de escoamento, de maneira a evitar condições de operação indesejadas. Normalmente são relacionadas duas grandezas de maneira direta, como o exemplo mostrado na Figura 3, em que as velocidades superficiais são relacionadas aos diferentes padrões.

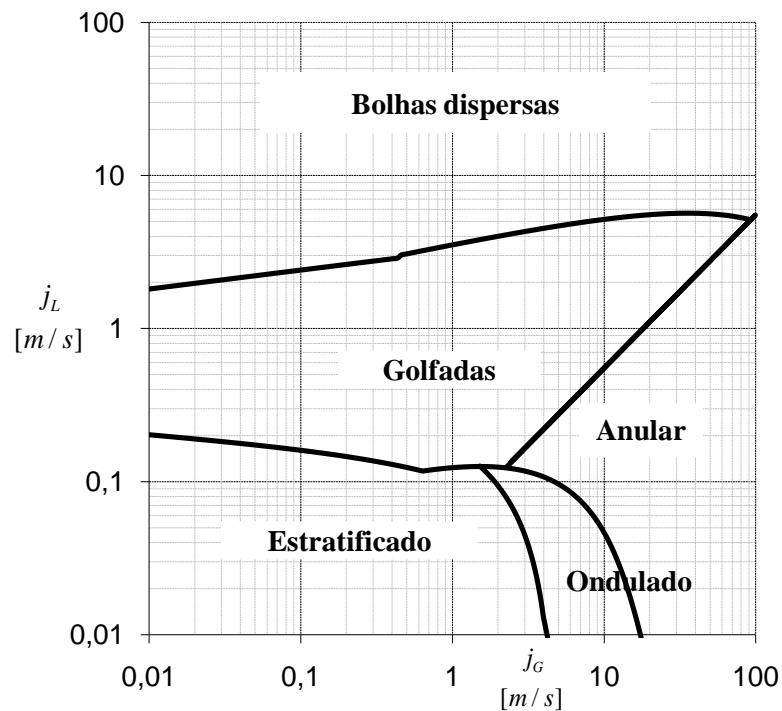


Figura 3 - Mapa de fluxo para escoamentos bifásicos horizontais em tubulação horizontal de 26 mm de diâmetro, pressão de 1 bar e temperatura de 20°C (Taitel e Dukler, 1976).

O presente trabalho se restringe a analisar um escoamento água-ar no padrão em golfadas, apesar das técnicas propostas poderem ser estendidas com algumas modificações ao estudo de outros tipos de escoamento.

2.1.2 Modelagem do escoamento bifásico em golfadas

A modelagem do escoamento em golfadas tem sido estudada há muitas décadas. Dukler e Hubbard (1975) desenvolveram um dos primeiros modelos definitivos de escoamento em golfadas. A idéia geral desenvolvida por Dukler e Hubbard foi utilizada posteriormente por Stanislav et al. (1986) e Taitel e Barnea (1990). Revisões mais detalhadas sobre o escoamento em golfadas pode ser encontradas em Taitel (2000) e Orell (2005).

Em quase todas as modelagens referentes a escoamentos bifásicos, é necessário o conhecimento de diversas variáveis, como as propriedades de cada fase, geometria do duto, pressão, entre outras. Adicionalmente, é fundamental que se conheça as vazões relativas de cada fase. O desenvolvimento a seguir será baseado no trabalho de Taitel e Barnea (1990).

A vazão volumétrica total em um escoamento bifásico é a soma da vazão de cada fase, ou seja:

$$Q = Q_L + Q_G \quad (1)$$

Na equação acima, Q é a vazão volumétrica total, e os símbolos Q_L e Q_G denotam as vazões volumétricas de líquido e de gás, respectivamente.

Um conceito muito utilizado na análise de escoamentos bifásicos é o de velocidade superficial. Define-se que a velocidade superficial de uma fase é a velocidade com a qual esta fase escoaria isoladamente (escoamento monofásico) no duto, à mesma vazão volumétrica do escoamento bifásico. Desta forma, a velocidade superficial de um fluxo na tubulação é definida pela relação entre a vazão do mesmo e a área de seção transversal do duto, descritas nas equações a seguir:

$$j_G = \frac{Q_G}{A_T} \quad (2)$$

$$j_L = \frac{Q_L}{A_T} \quad (3)$$

Onde:

- j_G é a velocidade superficial do gás;
- Q_G é a vazão volumétrica do gás.
- j_L é a velocidade superficial do líquido;
- Q_L é a vazão volumétrica do líquido.
- A_T é a área da seção transversal, ou a área ocupada por todas as fases

Outro parâmetro de grande importância nos escoamentos bifásicos é a fração de vazio, definida como o percentual de área transversal da tubulação ocupada pela fase gasosa.

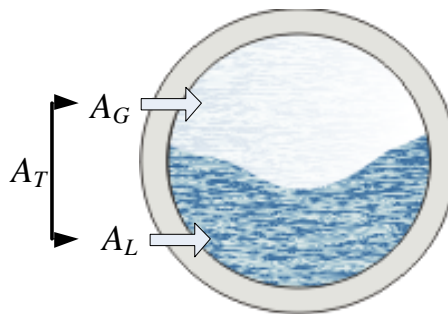


Figura 4 - Seção transversal de um duto com escoamento bifásico.

Logo, pode-se definir a fração de vazio (α) como:

$$\alpha = \frac{A_G}{A_T} \quad (4)$$

Em que:

- A_G é a área ocupada pelo gás;
- A_T é a área da seção transversal, ou a área ocupada por todas as fases.

De forma análoga a fração de vazios, o percentual de área transversal ocupada pelo líquido, denominado *holdup* (h), é dado por:

$$h = \frac{A_L}{A_T} = 1 - \alpha \quad (5)$$

Em que:

- A_L é a área ocupada pelo líquido.

2.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO PARA ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

A seguir, apresenta-se um levantamento das diferentes técnicas utilizadas ao longo das últimas décadas para a medição de escoamentos bifásicos.

Rouhani e Sohal (1983) classificaram as técnicas de medição em dois tipos: observação direta e indireta. As técnicas de observação direta incluem a visualização por raios-X, raios- γ , sensores elétricos e óticos. As técnicas de observação indireta compreendem a análise de sinais vindos de sensores de pressão, detetores de nêutrons térmicos e transdutores de ultrassom.

Harvel e Chang (1995) examinaram técnicas que se utilizam de propriedades eletrostáticas para analisar um escoamento multifásico. Os autores classificaram-nas em técnicas capacitivas, condutivas, resistivas, ultrassônicas e radioativas.

Ma *et al.* (2001) realizaram uma tomografia por impedância elétrica para medir o nível do líquido em um escoamento bifásico horizontal água-ar.

Da Silva (2008) utilizou o sensor *wire-mesh* para analisar o escoamento multifásico. Foi feita uma tabela de classificação das técnicas de medição, de acordo com o custo e a resolução espacial e temporal. Foram analisados os seguintes métodos: óticos (PIV e câmera

de alta velocidade); magnético (MRI); tomografias óticas, ultrassônicas, elétricas e também por raios-X, raios- γ , nêutrons e pósitrons; sonda condutiva intrusiva; *wire-mesh*.

Massignan (2009) apresentou também uma tabela de classificação de técnicas experimentais para escoamentos bifásicos, em que estão listadas o princípio utilizado, o parâmetro medido, as vantagens e desvantagens. Foram analisadas as técnicas de princípio elétrico, magnético e ultrassônico.

Tanahashi (2010) apresentou estudos com foco na utilização de técnicas ultrassônicas para caracterização de escoamentos multifásicos. Métodos óticos, magnéticos e elétricos também foram analisados pelo autor.

2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO ULTRASSÔNICAS

A onda ultrassônica é uma onda mecânica que se propaga em uma frequência fundamental superior a 20 kHz. Esta onda é gerada com uma perturbação em um meio material e se propaga basicamente de duas maneiras (Figura 5): longitudinalmente e transversalmente. As ondas longitudinais podem ser transmitidas em meios sólidos, líquidos ou gasosos enquanto as ondas transversais se propagam em meio sólido, e muito pouco nos meios líquidos e gasosos (Daciuk, 2008). No caso do escoamento bifásico água-ar, o modo de propagação predominante é o longitudinal.

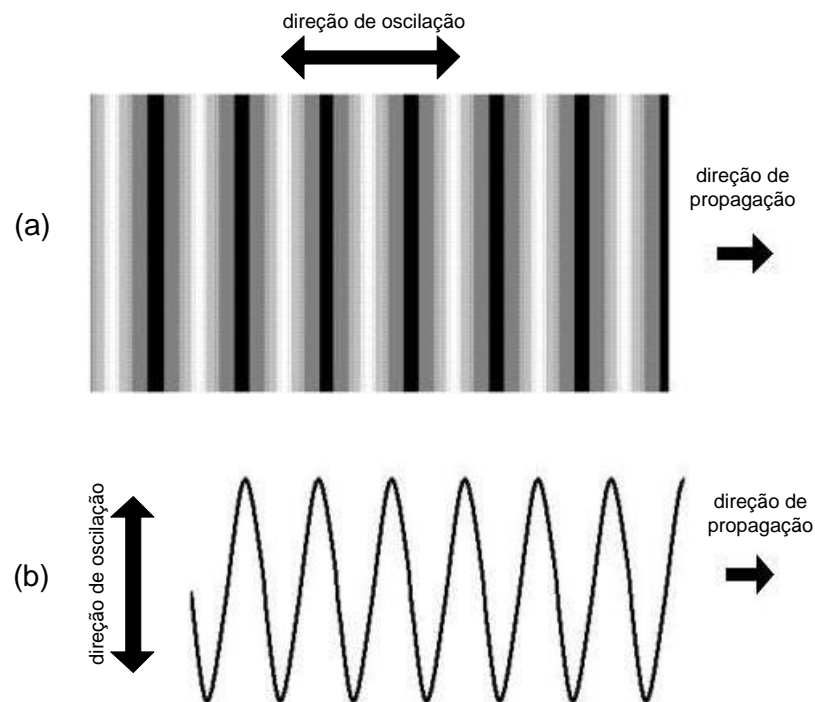


Figura 5 - Modos de propagação: (a) onda longitudinal. (b) onda transversal.

Uma das formas mais comuns de gerar a onda ultrassônica baseia-se no efeito piezoelétrico, que consiste na conversão de um pulso elétrico em vibrações mecânicas por meio de transdutores de cristal piezoelétrico. O mesmo material piezoelétrico pode agir como um receptor de ondas de ultrassom e converter a onda mecânica em um sinal elétrico. Mais informações a respeito de transdutores de ultrassom e suas características podem ser encontradas em Olympus (2010).

Assim como qualquer onda, o ultrassom, ao atravessar uma interface de transição entre dois materiais de características diferentes, tem uma parte de sua energia refletida e outra transmitida, podendo sofrer alteração de sua direção de propagação (Daciuk, 2008). A Figura 6 ilustra a reflexão e a transmissão de uma onda ultrassônica. A quantidade de som refletida ou transmitida depende das impedâncias acústicas dos meios 1 e 2, definidas pelo produto entre a velocidade do som no meio e sua massa específica.

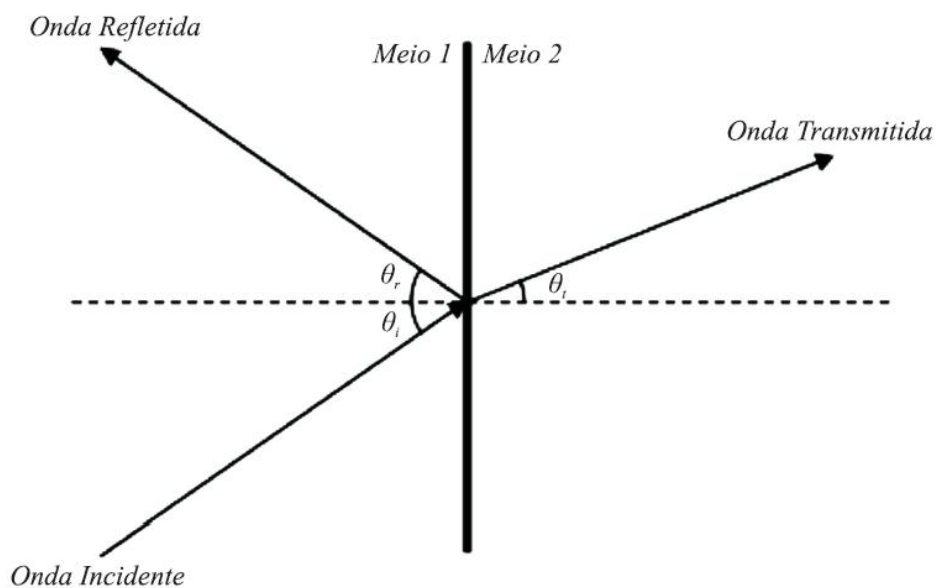


Figura 6 - Reflexão da onda em interfaces (Daciuk, 2008).

No caso de uma interface líquido-gás, a onda ultrassônica é totalmente refletida. Essa propriedade possibilita a detecção da posição da bolha de gás em um escoamento bifásico em golfadas. Esta análise é realizada com o uso da técnica ultrassônica chamada de pulso-eco. Segundo Chang et al. (1982), em análise de escoamentos, as técnicas ultrassônicas podem ser classificadas em três tipos: doppler, transmissão-recepção e pulso-eco. Também pode ser utilizada a combinação dos três tipos, resultando num método híbrido. Mais detalhes e aplicações da técnica de ultrassom a escoamentos bifásicos serão descritos a seguir.

2.3.1 Método Doppler

O método Doppler é muito utilizado para medição de vazão em escoamentos. A técnica se baseia no efeito Doppler, caracterizado pelo princípio físico no qual se verifica a alteração linear da frequência das ondas sonoras refletidas com o movimento do objeto refletor em relação a uma fonte de onda sonora. A diferença entre a frequência da onda de ultrassom transmitida e a da onda recebida pode ser diretamente relacionada à velocidade do escoamento e, por meio de um diâmetro conhecido, pode-se obter a vazão volumétrica do fluxo. A Figura 7 ilustra um típico medidor de vazão ultrassônico por efeito Doppler.

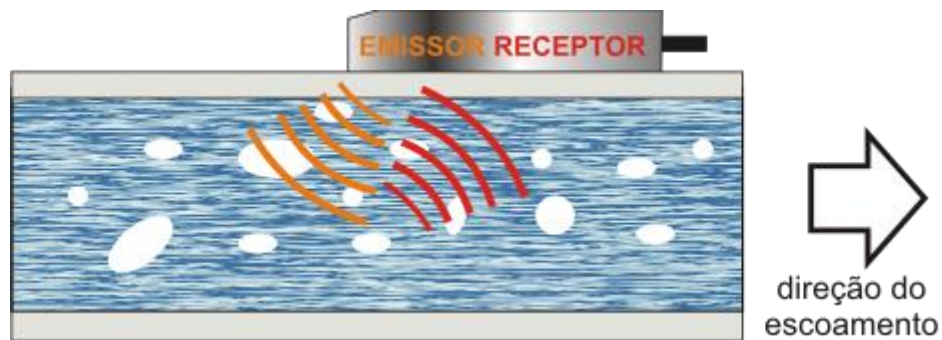


Figura 7 - Medidor de vazão ultrassônico por efeito Doppler.

Em escoamentos multifásicos, estudos mostram a medição de vazão por Doppler em escoamentos com a presença de particulados, como o sólido-líquido ou o gás-líquido borbulhante (Crowe, 2006).

Murakawa et al. (2005) propuseram um método para determinar a velocidade de cada fase em um escoamento bifásico água-ar pelo método Doppler. Conforme demonstra a Figura 8, foram utilizados dois transdutores no mesmo encapsulamento: o interno, com 3 mm de diâmetro e frequência de 8Mhz, empregado para medição da vazão do líquido; o externo, com 8 mm de diâmetro e frequência de 2Mhz, usado para medição da fase gasosa.

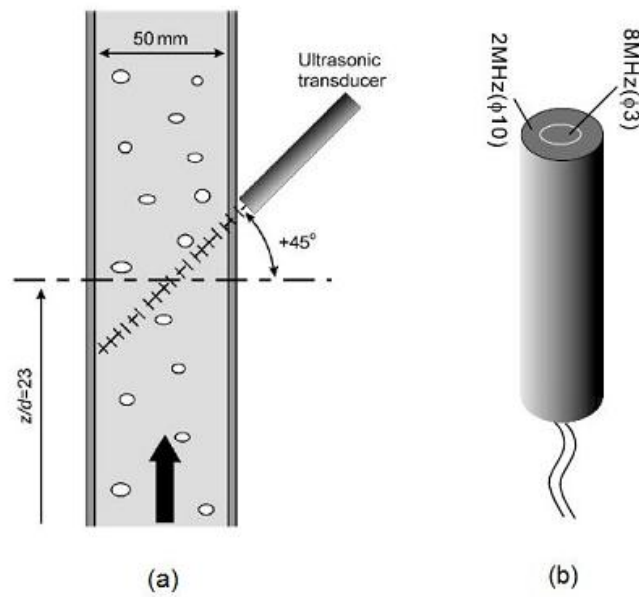


Figura 8 - Aparato utilizado por Murakawa et al. (2005).

2.3.2 Método Transmissão-Recepção

A técnica ultrassônica de transmissão-recepção compreende a propagação de ondas ultrassônicas através de um escoamento, geradas a partir de um transdutor emissor posicionado na parede do duto e adquiridas por um ou mais transdutores em oposição ao primeiro. O posicionamento dos transdutores também pode variar de acordo com a aplicação desejada. A Figura 9 mostra a montagem de uma configuração transmissão-recepção aplicada a um escoamento multifásico.

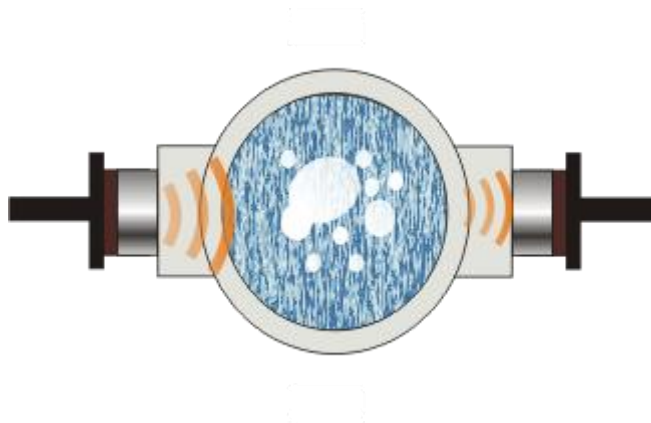


Figura 9 - Ultrassom modo transmissão recepção.

As principais informações extraídas do escoamento são obtidas por meio de correlações com a alteração do tempo de trânsito e da amplitude da onda ao atravessar o meio.

Muitos autores têm desenvolvido técnicas diversas para analisar esses parâmetros, como se pode ver a seguir:

Zheng e Zhang (2004) e Vatanakul et al. (2004) utilizaram o desvio padrão do tempo de trânsito e da amplitude do sinal de ultrassom para medição da fração de vazio em escoamentos trifásicos.

Warsito (1999) e Supardan et al. (2007) usaram a tomografia computadorizada por ultrassom (UCT) para analisar a distribuição da fase gasosa em um escoamento multifásico. A Figura 10 mostra a instrumentação ultrassônica, composta por 12 transdutores, utilizada por Supardan et al. (2007):

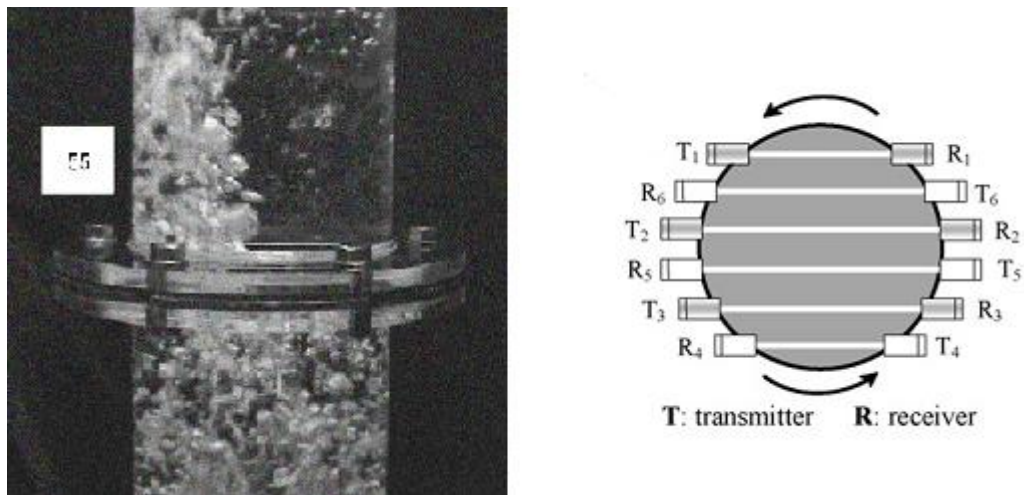


Figura 10 - Instrumentação ultrassônica utilizada por Superdan et al.(2007).

Carvalho et al. (2009) investigaram a energia do sinal recebido em transdutores receptores a 0° , 45° , 135° e 180° do transdutor emissor num escoamento bifásico vertical água-ar, como mostra a Figura 11. O objetivo do experimento foi correlacionar os sinais de ultrassom às frações de vazio variadas de 0 a 15%. No mesmo experimento, Massignan (2009) analisou os sinais médios de ultrassom no domínio da frequência, pelo método da atenuação em banda larga (Broadband Ultrasound Attenuation – BUA) para a caracterização do padrão de escoamento.

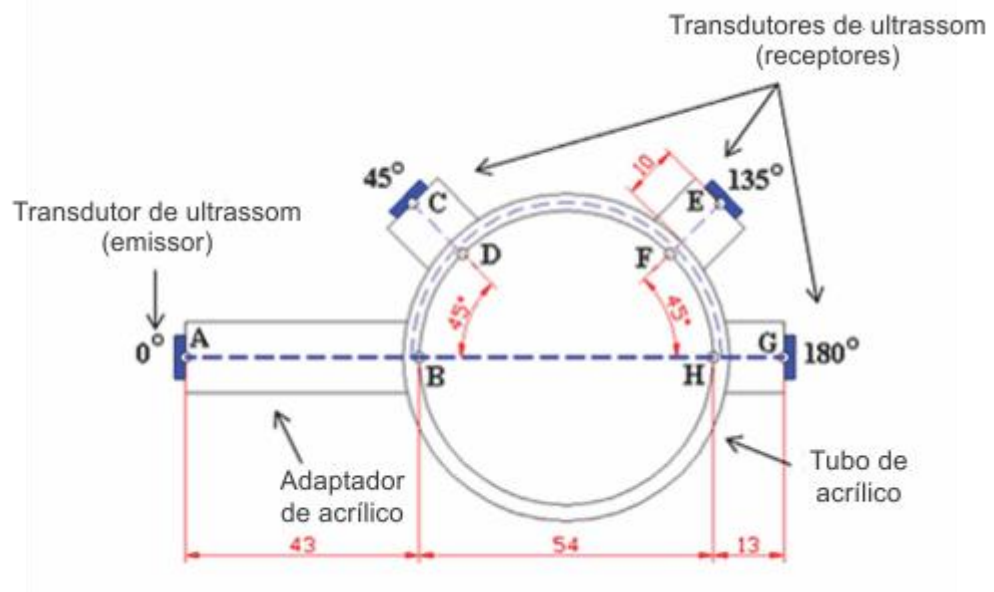


Figura 11 - Visão esquemática da instrumentação ultrassônica de Carvalho et al. (2009).

2.3.3 Método Pulso-Eco

O método pulso-eco refere-se à aquisição de um sinal de ultrassom, refletido por uma interface, com a utilização do mesmo transdutor que emite a onda. Em escoamentos multifásicos, a técnica tem sido aplicada para a determinação da posição da interface entre as diferentes fases (método utilizado neste trabalho), Figura 12(a), e para a caracterização da mistura por meio da variação da energia do eco refletida, Figura 12(b).

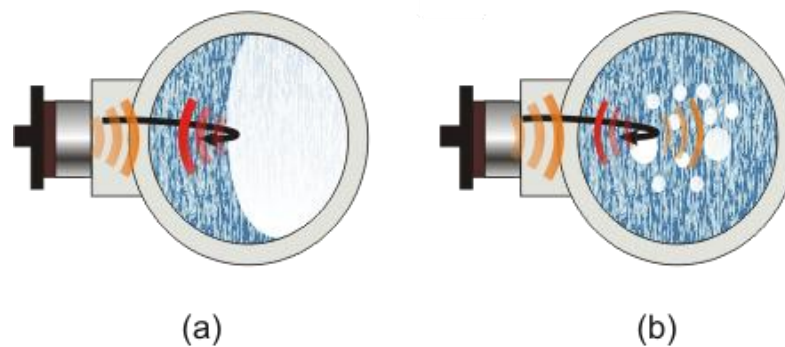


Figura 12 - Configurações de montagem de transdutores pulso-eco.

2.3.3.1 Posição da interface

A posição da interface é obtida por meio da velocidade do som na mistura e o tempo de trânsito que a onda ultrassônica leva para atingir a interface, ser refletida e retornar ao

transdutor emissor. Essa metodologia foi utilizada no presente trabalho, assim como o fizeram autores como Chang et al. (1982), Santos (2006), Faccini (2008) e Grangeiro (2010).

Chang et al. (1982) realizaram estudos para averiguar a potencialidade da técnica de ultrassom na medição da altura de líquido e na caracterização de regimes de escoamentos bifásicos horizontais. Primeiramente, os autores analisaram as alturas de líquidos em condição estáticas, através de tubos cilíndricos de diversos diâmetros e temperaturas entre 20°C e 78°C. Na segunda etapa, foram gerados escoamentos água-ar no padrão estratificado, intermitente e borbulhante. O sistema ultrassônico foi empregado com sucesso na identificação dos regimes.

Santos (2006) utilizou técnicas de ultrassom para fins de monitoramento do filme de água em escoamentos gás-líquido e líquido-líquido. Foram obtidos resultados nas medições em escoamentos gás-líquido, devido à acentuada diferença nas propriedades físico-química das fases. Em escoamentos líquido-líquido, o método não foi tão eficiente devido à baixa amplitude do sinal refletido. Para melhorar a qualidade dos resultados, seriam necessários novos recursos computacionais.

Faccini (2008) estudou o escoamento bifásico estratificado, através de técnicas ultrassônicas. A técnica de pulso-eco também foi utilizada para medição das alturas de líquido, junto com uma técnica de visualização de alta velocidade para filmagem de escoamentos.

2.3.3.2 Energia do eco

A energia do eco refletida pode ser correlacionada com o aumento de obstáculos encontrados pela onda ultrassônica no meio. Autores como Wada et al. (2006) e Carvalho et al. (2009) utilizaram esse fenômeno como parâmetro para caracterização de escoamentos.

Wada et al. (2006) apresentaram uma técnica ultrassônica para reconhecer padrões de escoamento bifásico borbulhante, intermitente e anular. Foi realizada uma combinação entre a energia do eco refletida e o tempo de trânsito, variando-se a velocidade superficial do gás, como mostra a Figura 13. As divisões “Perto”, “Centro” e “Longe” representam a energia do eco obtida por sinais encontrados a distâncias próximas, medianas e distantes do transdutor. A distribuição das energias nas diferentes faixas estabelecidas possibilitou a distinção entre os diferentes padrões de escoamento.

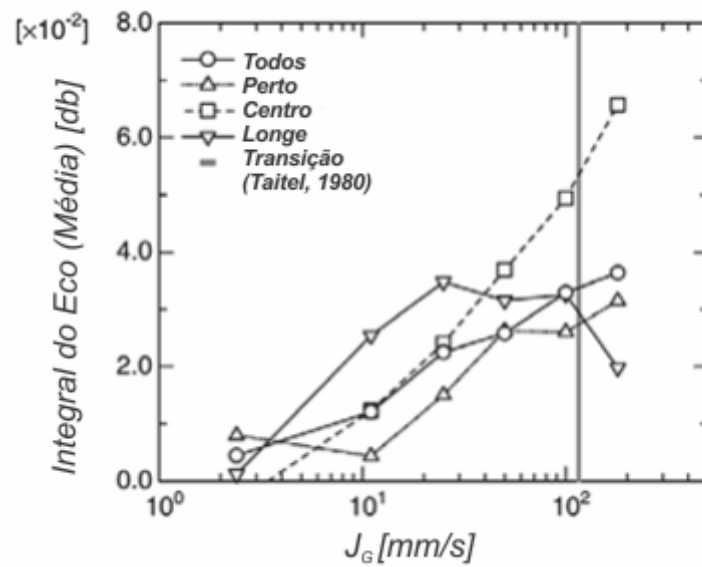


Figura 13 - Gráfico da energia do eco de Wada et al. (2006).

Carvalho et al. (2009) utilizaram a energia do eco refletida como um dos parâmetros para medição da fração de vazão de 0 a 15%. O parâmetro é útil principalmente na transição do regime de escoamento borbulhante para intermitente. Os autores observaram que as bolhas de Taylor, características do padrão em golfadas, refletem grande parte do pulso de ultrassom. A Figura 14 mostra um gráfico da energia do sinal obtido nos experimentos.

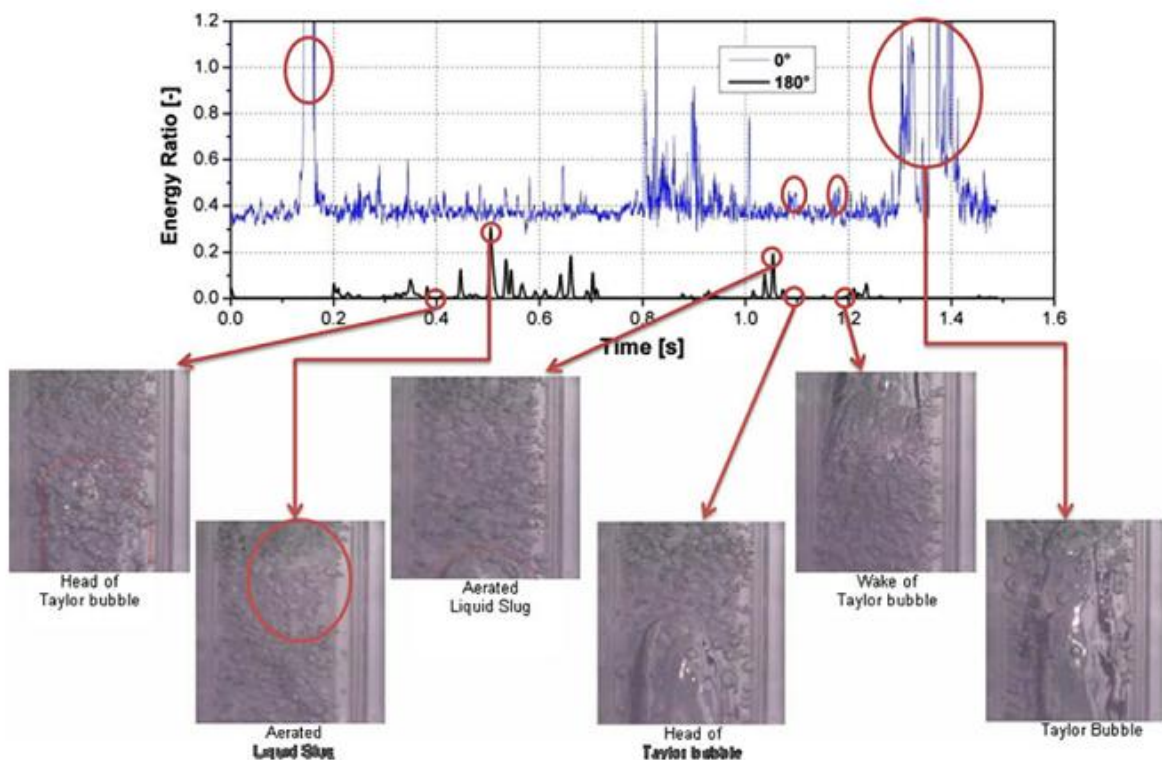


Figura 14 - Análise da energia do sinal de ultrassom (Carvalho et al., 2009).

2.4 TÉCNICA SENSOR WIRE-MESH

O sensor *wire-mesh*, ou malha de eletrodos, é um dispositivo que permite a visualização de escoamentos com alta resolução espacial e temporal. Seu princípio de funcionamento baseia-se em eletrodos invasivos para gerar as imagens. Este tipo de sensor foi introduzido há doze anos por Prasser (1998), e desde então, tem sido empregado por vários pesquisadores para investigar escoamentos multifásicos.

O dispositivo é constituído por dois planos de fios (eletrodos) estendidos ao longo do tubo, conforme mostra a Figura 15(a). Os planos de eletrodos (transmissor e receptor) se cruzam em um ângulo de 90° e estão separados por uma pequena distância, ou seja, eles não estão em contato. Em um mesmo plano, os eletrodos são igualmente espaçados ao longo da seção transversal.

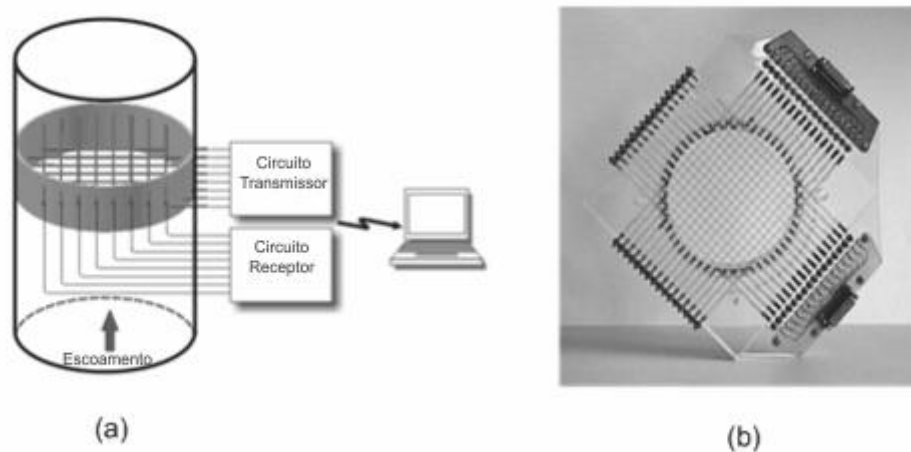


Figura 15 - (a) Esquema simplificado do sensor *wire-mesh*. (b) Fotografia de um típico sensor desenvolvido. (Da Silva, 2008).

A eletrônica responsável em operar o sensor faz uma varredura à alta velocidade dos eletrodos. Ela também determina a capacitância ou impedância de cada um dos cruzamentos de forma multiplexada em um eletrodo transmissor, e ainda mede a corrente de deslocamento que flui para os eletrodos receptores. O processo é repetido para cada um dos eletrodos transmissores, ativados sequencialmente. Ao final do processo obtêm-se os valores de capacitância para cada um dos cruzamentos, os quais correspondem à distribuição instantânea de fases na seção transversal do tubo. Além disso, a capacitância de todos os cruzamentos entre os eletrodos (uma imagem completa) é mensurada com uma taxa de repetição de até 1 kHz. 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 (Da Silva, 2008).

A Figura 16 ilustra o experimento realizado por Da Silva (2008) em que a técnica *wire-mesh* foi empregada para a visualização de escoamentos bifásicos verticais óleo-ar. A velocidade do gás foi aumentada para que fossem gerados diferentes padrões de escoamento. Na Figura 16(a) são mostradas projeções laterais, em que é possível verificar as mudanças no padrão de escoamento. Porém, as imagens laterais possuem o mesmo problema que ocorre com a visualização de tubulações transparentes: com o aumento da quantidade de gás a visualização das estruturas internas do escoamento não é mais possível e ocorre perda de informações relevantes. Esse problema é contornado na Figura 16(b), que mostra uma visão do plano central interno da tubulação, complementando a visão lateral do escoamento.

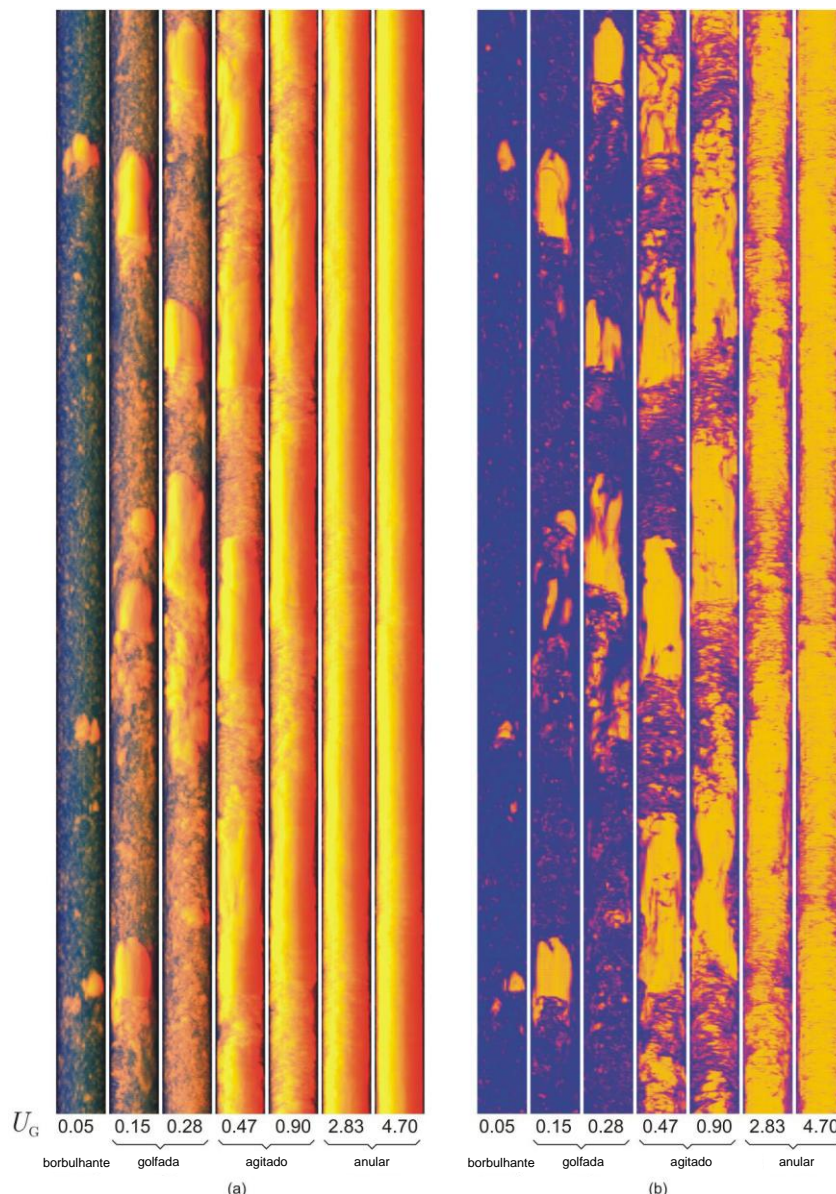


Figura 16 - Visualização dos dados obtidos pelo sensor *wire-mesh* em um escoamento vertical; (a) imagens da projeção lateral e (b) corte axial. Os padrões de escoamento também estão indicados (Da Silva, 2008).

2.5 TÉCNICA DE FILMAGEM RÁPIDA

O recente avanço na filmagem de alta velocidade tem sido amplamente utilizado para a pesquisa de escoamentos bifásicos gás-líquido. Trata-se de um método preciso e não-intrusivo que possibilita a observação de detalhes do escoamento em altíssimas taxas de aquisição, porém, limitado a tubulações transparentes. A filmagem também é muito utilizada para validar resultados de outras técnicas de medição, como nos trabalhos de Supardan et al (2007), Carvalho et al. (2008) e Grangeiro (2010).

3 APARATO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo está dividido em quatro seções. A primeira descreve a planta experimental utilizada para o desenvolvimento do escoamento em golfadas de forma controlada. A segunda mostra a instrumentação ultrassônica empregada nos testes. A terceira descreve as características do sensor *wire-mesh* utilizado. A última mostra a filmadora de alta velocidade utilizada para auxiliar o experimento.

3.1 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO EXPERIMENTAL

Para o estudo experimental do escoamento bifásico horizontal água-ar em golfadas, foi utilizada a planta localizada no Laboratório de Ciências Térmicas – LACIT – da UTFPR, apresentada na Figura 17. O circuito é composto por linhas independentes de água e ar. Os fluidos passam por um misturador, e o fluxo, agora bifásico, se desenvolve em uma tubulação horizontal de acrílico, com 9,2 m de comprimento e 26 mm de diâmetro interno. Ao final da planta, a fase gasosa é liberada para atmosfera e a fase líquida retorna a um reservatório com capacidade de 100 litros.

O ar é enviado ao circuito por um compressor elétrico e a água é bombeada do reservatório por meio de uma bomba centrífuga acionada por um inversor de frequência de maneira controlada.

Para monitorar as vazões das fases antes da mistura, foram utilizados medidores de vazão do tipo Coriolis para o líquido e do tipo placa de orifício para o ar. Transdutores de pressão estão presentes na linha de ar, antes da mistura bifásica, e ao final do circuito, com o intuito de corrigir a velocidade superficial do gás devido à queda da pressão. Para medição da temperatura, são utilizados sensores do tipo resistivos, já embarcados nos medidores de vazão e pressão.

Os valores de pressão, vazão e temperatura são enviados a um computador próximo ao circuito, por meio de uma rede *FieldBus*, que conecta os medidores a uma placa de aquisição da marca *National Instruments*. A partir dos dados adquiridos, são calculadas as velocidades superficiais de cada fase, permitindo a elaboração de testes controlados.

Ao final da tubulação de acrílico, na seção de testes, foram instalados os sensores *wire-mesh*, ultrassom e a filmadora de alta velocidade, conforme mostra a Figura 18.

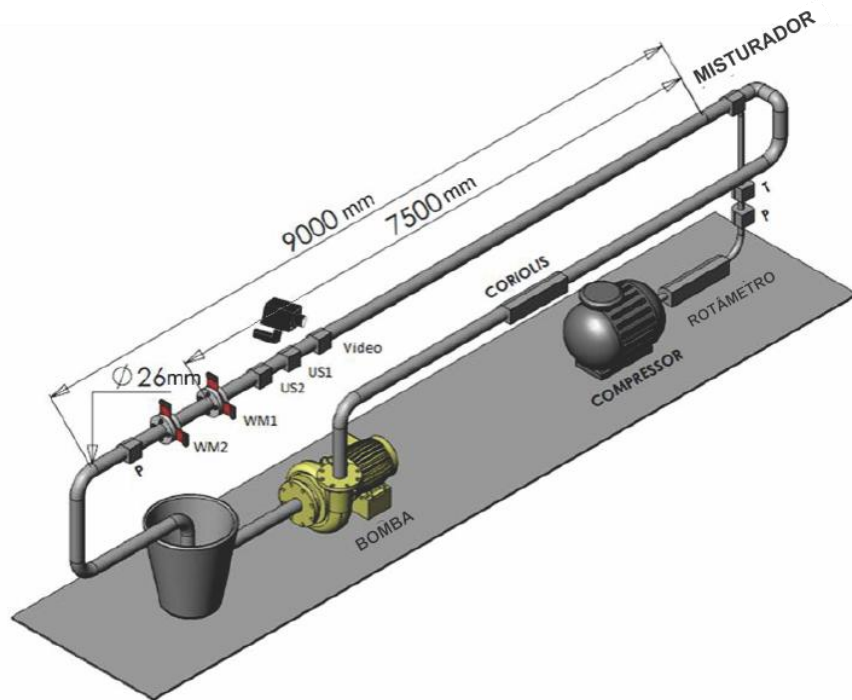


Figura 17 - Circuito experimental de escoamento bifásico água-ar.

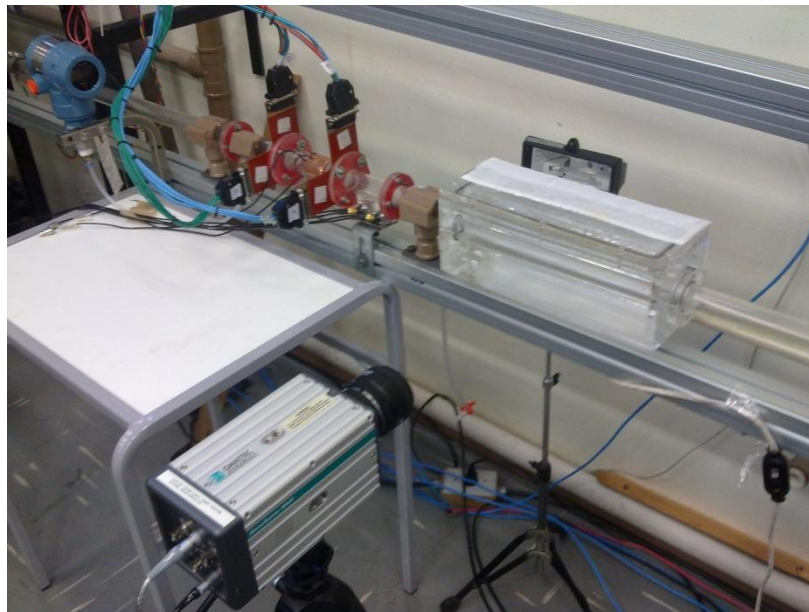


Figura 18 - Fotografia da seção de testes.

3.2 INSTRUMENTAÇÃO ULTRASSÔNICA

Nesta seção será abordada a instrumentação ultrassônica utilizada no experimento. Primeiramente, será mostrada a instalação dos transdutores e os parâmetros empregados na aquisição dos dados. Em seguida, serão detalhadas as características do sistema de aquisição e geração da onda de ultrassom.

3.2.1 Seção de teste

A Figura 19 apresenta uma vista esquemática da instrumentação ultrassônica deste trabalho. Nela há um par de transdutores, distantes de 30,8 mm centro a centro, posicionados abaixo da tubulação de maneira que o pulso de ultrassom encontre a fase líquida antes da fase gasosa no escoamento em golfadas. Dessa forma, foi possível utilizar a técnica de pulso eco para medir o comprimento do filme de líquido do fenômeno.

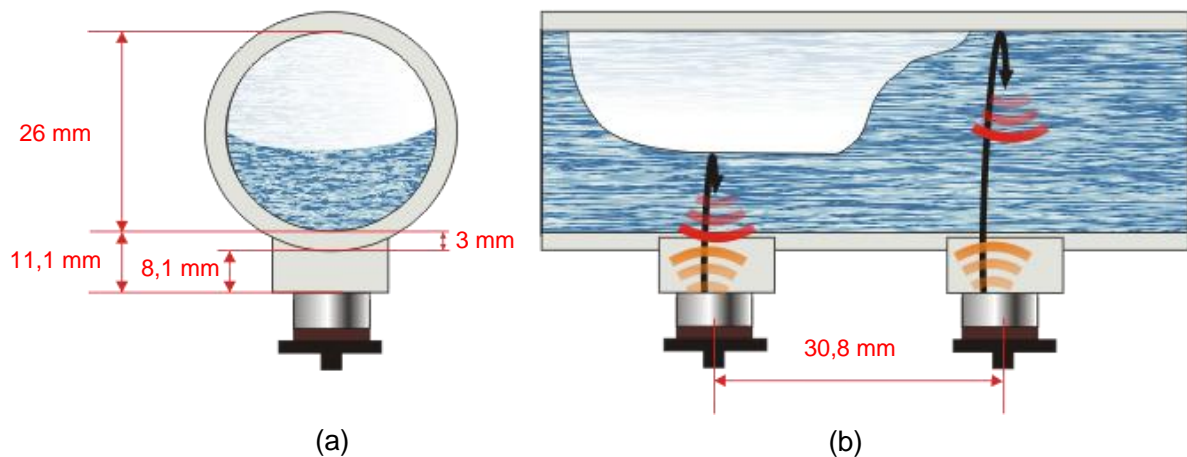


Figura 19 - (a) Seção transversal da instrumentação ultrassônica; (b) Esquemático lateral da instrumentação ultrassônica.

Entre cada sensor e a tubulação, foi colocado um adaptador acrílico de 8,1 mm de altura (vide Figura 19), usinado de forma a obter um encaixe perfeito tanto com o transdutor de ultrassom como com a parede do duto. Para melhorar o acoplamento acústico entre as partes, foi aplicada uma fina camada de vaselina nas interfaces sensor-adaptador e sensor-tubo.

O sinal de ultrassom percorre 11,1 mm de meio acrílico, dos quais 8,1 mm são do adaptador e 3 mm da espessura do tubo. Em seguida, para uma tubulação totalmente preenchida de com líquido, a onda atravessa o diâmetro interno do duto (26 mm) e retorna ao transdutor pelo caminho inverso, devido à reflexão na segunda interface líquido-acrílico. No caso do escoamento intermitente, o sinal pode ser refletido antes pela interface líquido-gás. A Figura 19(b) ilustra as reflexões citadas.

A Figura 20 mostra uma foto da instalação dos transdutores na seção de testes descrita anteriormente. Foram utilizados apoios de metal com ajuste de pressão para fixar os sensores na tubulação.



Figura 20 - Instrumentação ultrassônica na seção de testes.

Dois transdutores Panametrics™ do tipo duplo elemento – sensores que possuem um emissor e um receptor no mesmo encapsulamento – foram utilizados nos experimentos. A frequência utilizada pelos transdutores, cujas dimensões são mostradas na Figura 21, foi de 2,25 MHz e a taxa de repetição foi de 500 Hz. O tempo de aquisição de cada medida foi de 10,2 segundos.

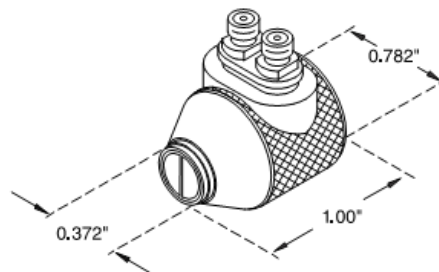


Figura 21 - Transdutor de duplo elemento Panametrics.

3.2.2 Sonda ultrassônica

Para realização dos experimentos, foi utilizada uma sonda ultrassônica desenvolvida na UTFPR, especificamente no Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado – LASCA. O sistema, do qual o autor fez parte do desenvolvimento, substituiu o uso de equipamentos importados de elevado custo e contribuiu também para o trabalho de outros pesquisadores como Daciuk (2008), Massignan (2009), Carvalho et al. (2009) e Tanahashi (2010). A sonda é composta por um *hardware* para geração e aquisição de pulsos de

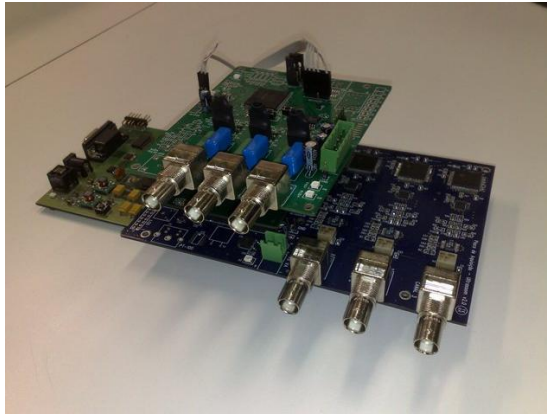
ultrassom, e um *software* para controle de parâmetros do sistema e para visualização e tratamento dos sinais adquiridos.

3.2.2.1 *Hardware*

As principais características do *hardware* são listadas a seguir. Mais detalhes podem ser encontrados em Daciuk, (2008).

- 3 canais independentes para excitação de transdutores de ultrassom com pulsos negativos de onda quadrada com largura de pulso configurável;
- Tensão de excitação configurável entre 150 V e 400 V;
- Freqüência de geração de pulsos configurável;
- 3 canais independentes para aquisição de sinais provenientes de transdutores de ultrassom com freqüência de amostragem selecionável de 20 MHz ou 40 MHz e com entrada diferencial, compostos cada canal por:
 - 1 transformador para casamento de impedância;
 - 1 amplificador de sinal de alta freqüência para sinais de ultrassom, com ganho variável e configurável por *software*;
 - 1 conversor AD com resolução de 12 bits e taxa de amostragem de até 80 MHz;
 - 1 memória tipo FIFO com capacidade para até 16384 *words* de 18 bits para guardar os sinais de ultrassom na alta taxa de amostragem necessária;
- 1 interface USB 2.0 para comunicação de alta velocidade com um computador pessoal a curta distância, permitindo a rápida transferência dos dados armazenados na memória RAM (até 64 MBytes) para o PC permitindo análises ainda não implementadas no firmware do módulo de processamento;
- Invólucro mecânico para proteção do equipamento contra particulados e projeções d'água;

A Figura 20(a) mostra uma fotografia do *hardware* desenvolvido e utilizado neste trabalho. Na Figura 20(b), é mostrado o invólucro mecânico utilizado para proteger o sistema.



(a)



(b)

Figura 22 - Sonda ultrassônica desenvolvida na UTFPR. (a) Placas de aquisição e excitação de sinais de ultrassom. (b) Invólucro mecânico utilizado para proteção do equipamento.

3.2.2.2 Software

O *software* desenvolvido tem como finalidade a configuração de parâmetros da sonda ultrassônica, e a aquisição e visualização dos sinais. O programa foi criado utilizando a linguagem *C#* na plataforma de desenvolvimento *Visual Studio* da *Microsoft* (Microsoft, 2008). As principais funcionalidades do sistema estão divididas em quatro telas principais: “Aquisição contínua”, “Aquisição em massa”, “Configurações” e “Abrir arquivo”, descritas a seguir.

3.2.2.2.1 Aquisição contínua

Nesta tela, os sinais de ultrassom, podem ser visualizados e salvos em tempo real. Neste modo, o *hardware* adquire e envia os dados para o *software* imediatamente. Desta forma, o usuário pode visualizar no computador os sinais de ultrassom em tempo real.

A Figura 23 mostra uma captura da tela de aquisição em tempo real. É possível visualizar os sinais adquiridos pelos três canais de entrada. Parâmetros como frequência de aquisição e número de amostras da onda ultrassônica são configuráveis. Os dados podem ser salvos em arquivo para uma posterior leitura. Além da visualização dos sinais, também é possível aplicar algoritmos de tratamento para extrair parâmetros ultrassônicos em tempo real, como: tempo de trânsito entre reflexões, atenuação e detecção de picos do sinal.

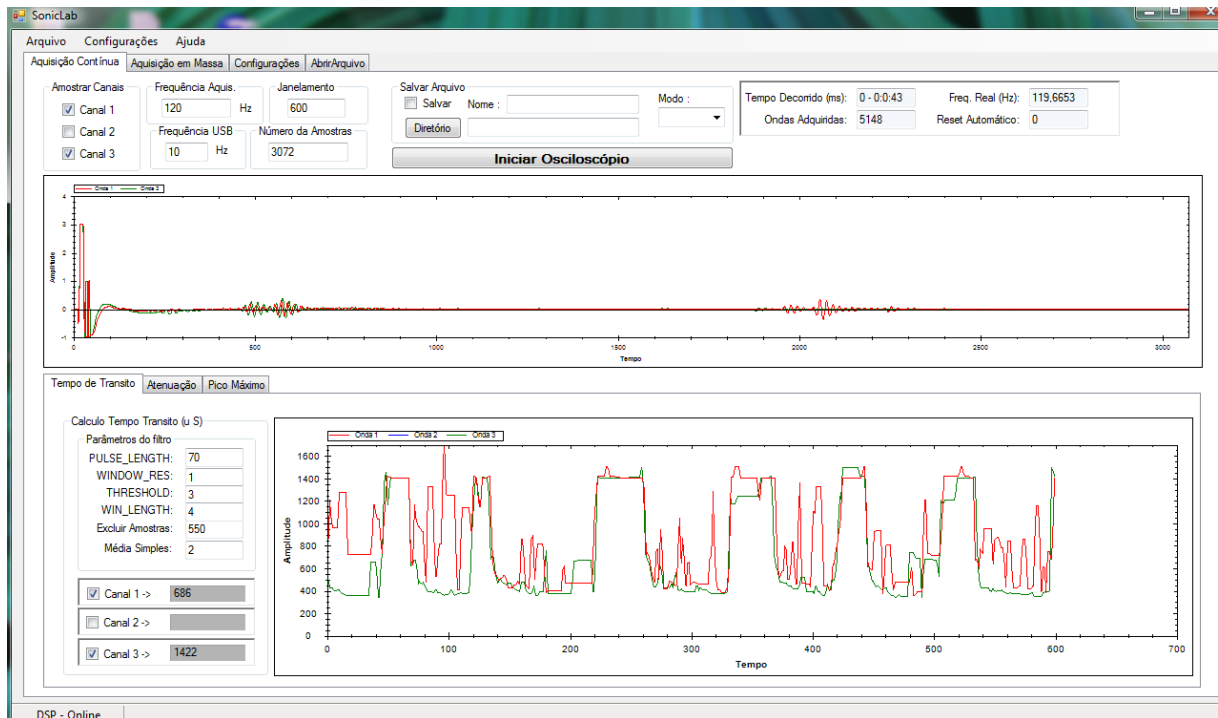


Figura 23 - Tela de aquisição em tempo real das ondas de ultrassom.

3.2.2.2.2 Aquisição em massa

A Figura 24 mostra a tela de “Aquisição em massa”. Diferente do modo de aquisição contínua, em que os dados são transmitidos em tempo real, neste modo os dados são primeiramente armazenados na memória interna do *hardware* e posteriormente transmitidos para o computador. Desta forma, a aquisição dos dados é feita em uma frequência maior, e assim, mais detalhes do fenômeno de interesse são obtidos. Também é possível selecionar quais canais são utilizados, o número de ondas, o número de amostras por onda e a frequência de aquisição.

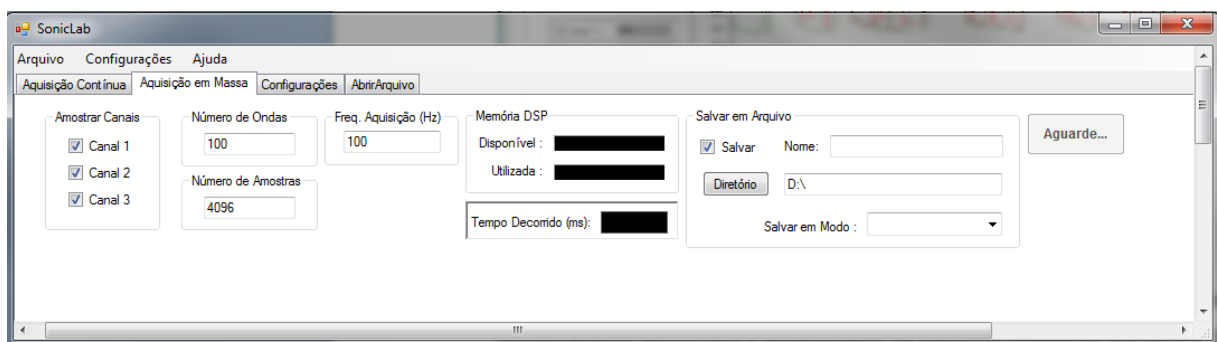


Figura 24 - Tela de "Aquisição em massa".

3.2.2.2.3 Abrir Arquivo

Esta tela possui as mesmas funcionalidades de visualização da tela de “Aquisição Contínua”, porém, os dados são adquiridos de um arquivo em vez de serem transmitidos pelo *hardware*. Desta forma, é possível analisar os dados de maneira *off-line*. A Figura 25 mostra uma captura da tela de “Abrir Arquivo”.

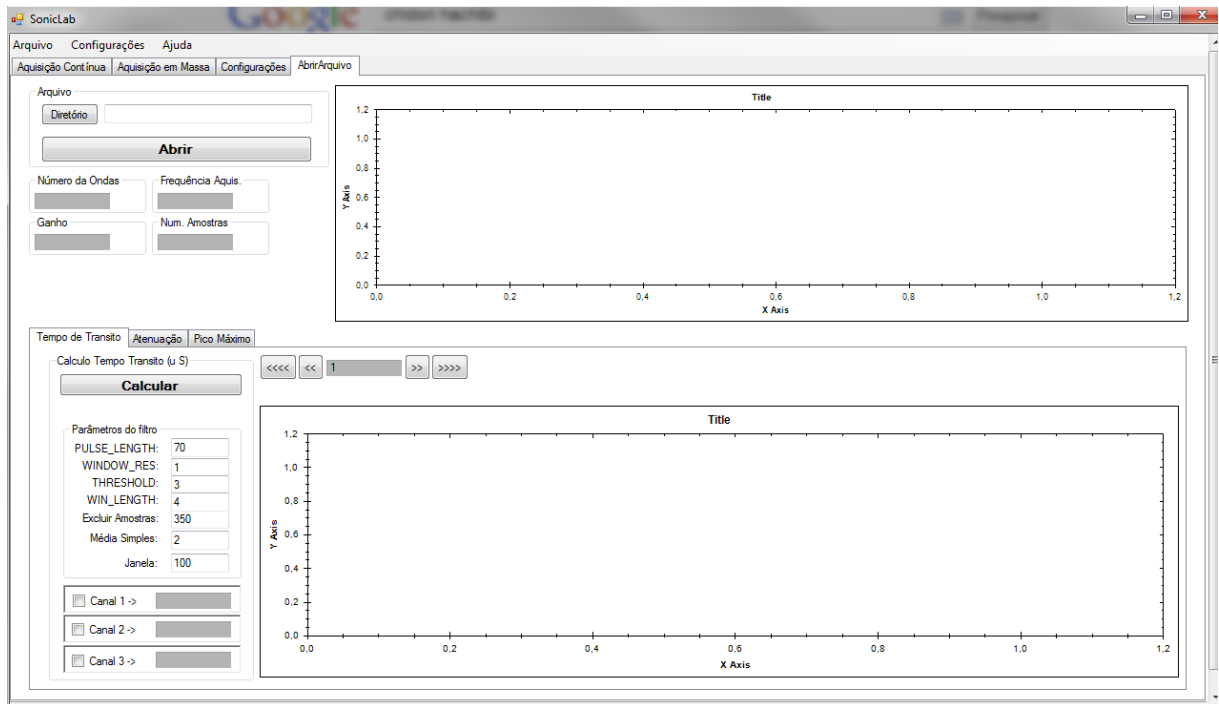


Figura 25 - Tela para abrir arquivo.

3.2.2.2.4 Configurações

A tela “Configurações” possibilita o ajuste de parâmetros do *hardware* de aquisição e geração de pulsos de ultrassom. Os seguintes parâmetros são configuráveis:

- Ganho: ganho dos amplificadores de recepção do sinal.
- Largura do pulso: permite a escolha da frequência de excitação do transdutor de ultrassom.
- Frequência de amostragem: permite a escolha da frequência de aquisição dos conversores analógico/digital do *hardware*.

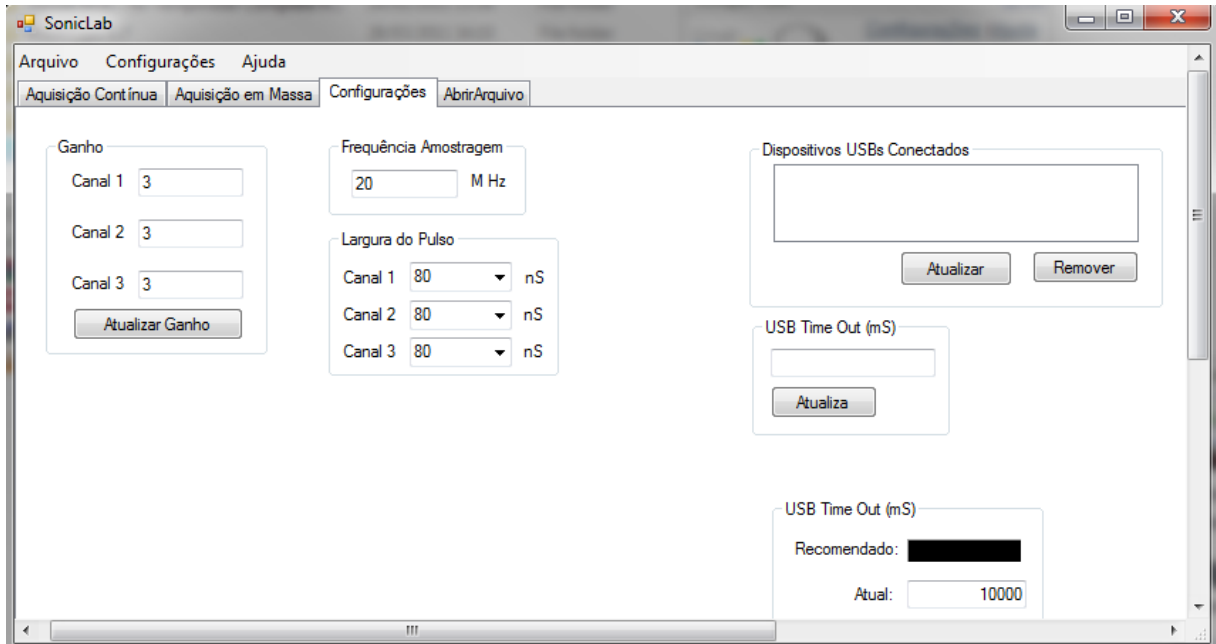


Figura 26 - Tela para configuração de parâmetros da Sonda Ultrassônica.

3.3 SENSOR WIRE-MESH

A Figura 27 mostra uma fotografia do sensor *wire-mesh* utilizado. Para este trabalho, foram utilizados dois sensores na seção de testes, como mostra a Figura 28. O aparato é composto por uma malha de 8 x 8 fios de aço inoxidável, cujas dimensões estão na ordem de 0,12mm de diâmetro e cuja distância axial entre planos é de 1,5mm. Sabendo-se que as medições são realizadas no cruzamento dos eletrodos, totalizam-se 64 pontos de medição.

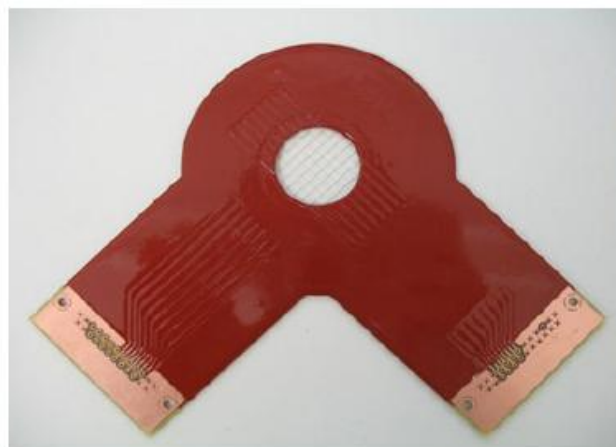


Figura 27 - Fotografia do sensor *wire-mesh* 8 x8 utilizado no estudo.

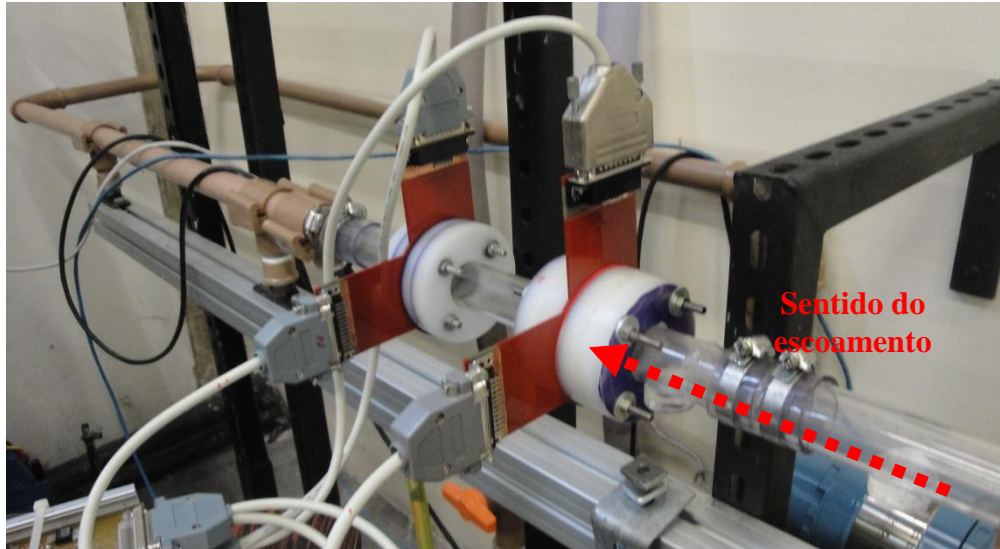


Figura 28 - Fotografia dos sensores *wire-mesh* instalados na seção de testes.

A aquisição do sinal analógico gerado pelo sensor de malha de eletrodos, e a conversão para sinal digital são realizadas por uma placa de aquisição National Instruments, modelo PCI 6229. Após converter os sinais recebidos, um programa em linguagem C++ gera, em tempo real, uma representação gráfica da seção da tubulação. A Figura 29 mostra uma das telas do *software*, captada no instante em que uma bolha de ar originada durante o escoamento bifásico ar-água em padrão de golfadas escoava através do sensor. Na imagem, os quadrados em azul representam água e preenchem a porção inferior da tubulação enquanto os tons de roxo representam a fase gasosa.

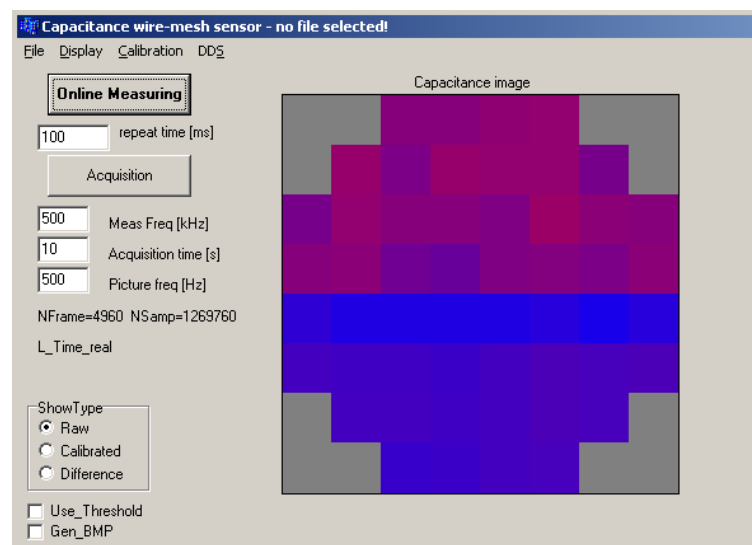


Figura 29 - Interface gráfica do programa de aquisição de dados do sensor *wire-mesh*.

Para o presente trabalho, foi utilizada uma taxa de aquisição de 500 quadros por segundo, a mesma utilizada pelo ultrassom.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO DE FILMAGEM RÁPIDA

Para visualizar e analisar os padrões de escoamento, uma filmadora de alta velocidade foi empregada. O modelo escolhido para o experimento foi a câmera *MotionPro X4*, de marca *RedLake* (Figura 30), capaz de proporcionar uma taxa de aquisição de até 1000 quadros por segundo.



Figura 30 - Câmera de alta velocidade.

Para melhorar a qualidade das imagens adquiridas, foi instalada uma lâmpada de 100W/60Hz para a iluminação da seção de testes. Adicionalmente à lâmpada, foi utilizado um difusor para distribuir a luz de maneira homogênea sobre o objeto a ser filmado.

4 AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste capítulo, serão apresentadas as análises realizadas após a aquisição dos sinais. Os sinais adquiridos pelas técnicas de ultrassom e *wire-mesh* bem como as imagens filmadas pela câmera de alta velocidade passaram por uma etapa de pós-processamento, na qual foi utilizada o programa *Matlab* da *Mathworks* (Mathworks, 2007).

4.1 ULTRASSOM

Os sinais ultrassônicos de modo pulso-eco foram adquiridos e posteriormente analisados para a extração de parâmetros de interesse. O processamento realizado é explicado a seguir.

4.1.1 Medição do filme de líquido

A Figura 31 mostra uma reflexão típica do pulso de ultrassom em um escoamento bifásico água ar em golfadas. O sinal foi obtido e normalizado utilizando-se ganho do amplificador em 17 e tensão de excitação entre 150 e 400V. Primeiramente, a diferença de tempo t entre as reflexões do sinal, causadas pelas interfaces acrílico-água e água-ar, é obtida com o método utilizado por Daciuk (2008). A técnica consiste em fazer a correlação do sinal adquirido com um pulso de ultrassom de referência, no caso da Figura 31, o pulso obtido pela interface acrílico-água. No resultado obtido pela correlação, é aplicada a transformada de Hilbert. Deve-se então encontrar os pontos em que a transformada de Hilbert cruza o zero para se determinar a posição no tempo dos ecos de ultrassom (Daciuk, 2008). A velocidade do som na água V_A (1494m/s) é determinada seguindo as equações de Lubbers e Graaff (1998), dada a temperatura do líquido em torno de 25°C. Como a onda ultrassônica viaja pela fase líquida duas vezes (caminho de ida e volta), a altura do filme de líquido H_L entre a bolha de gás e a parede do tubo é dada pela Equação (6):

$$H_L = V_A \frac{t}{2} \quad (6)$$

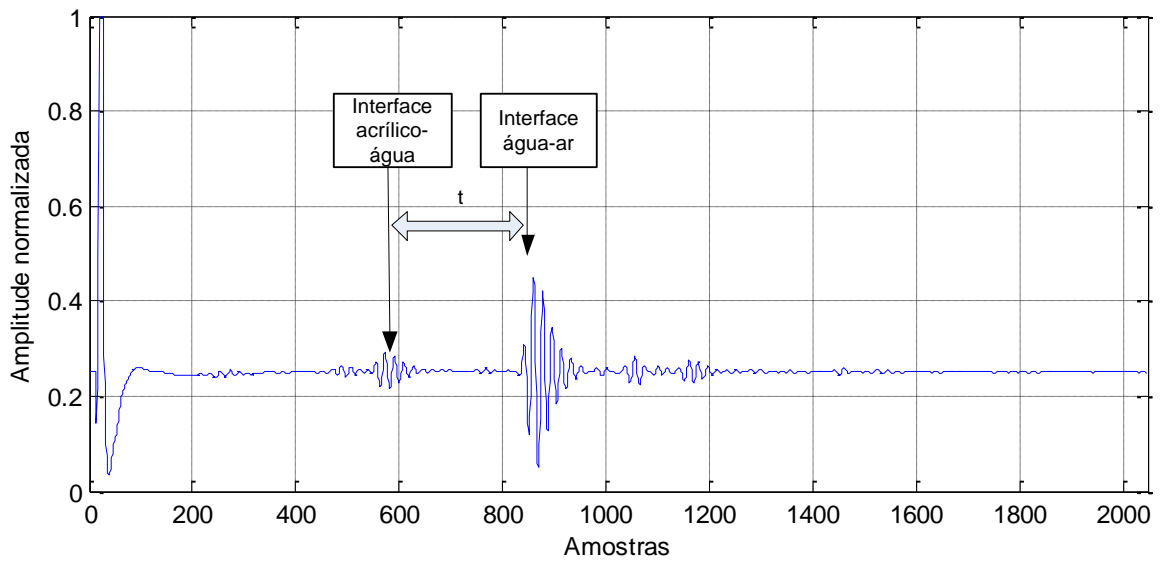


Figura 31 - Reflexões do pulso de ultrassom no escoamento.

O cálculo da altura do filme de líquido de uma aquisição contínua de ondas ultrassônicas possibilita a visualização da bolha alongada. Localidades em que o tempo de trânsito é menor representam a bolha de gás, e localidades onde o tempo de trânsito é maior representam o pistão de água. A

Figura 32 mostra o conjunto de medidas de H_L ao longo do tempo. O sinal obtido foi suavizado utilizando um filtro de mediana unidimensional encontrado no *software* Matlab (MathWorks, 2007).

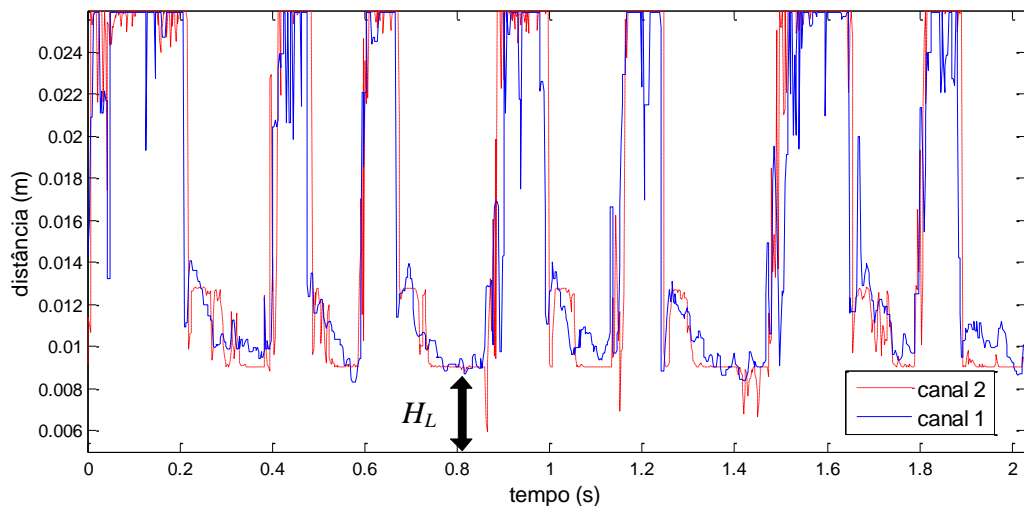


Figura 32 - Conjunto de medidas de H_L .

4.1.2 Medição da fração de vazio

A fração de vazio é a parte da seção do tubo ocupada pela fase gasosa do escoamento. Considerando a altura do filme de líquido como a fase líquida que ocupa a tubulação, a fase gasosa é a diferença entre o diâmetro da tubulação ϕ_t (total) e a altura do líquido H_L . A equação abaixo expressa a fração de vazio, devidamente convertida para um valor percentual:

$$\alpha = \frac{(\phi_t - H_L)100}{\phi_t} \quad (7)$$

4.2 WIRE-MESH

A aquisição contínua de imagens resulta em uma matriz tridimensional, em que duas dimensões se referem aos pontos na malha do sensor e a terceira dimensão ao tempo. Os dados da matriz podem ser tratados posteriormente, por meio de geradores de imagem baseados em cortes nos planos selecionados. Desta forma, é possível a visualização de todo o escoamento que transpassou o sensor em determinado plano e intervalo de tempo de aquisições, como no exemplo da Figura 33.

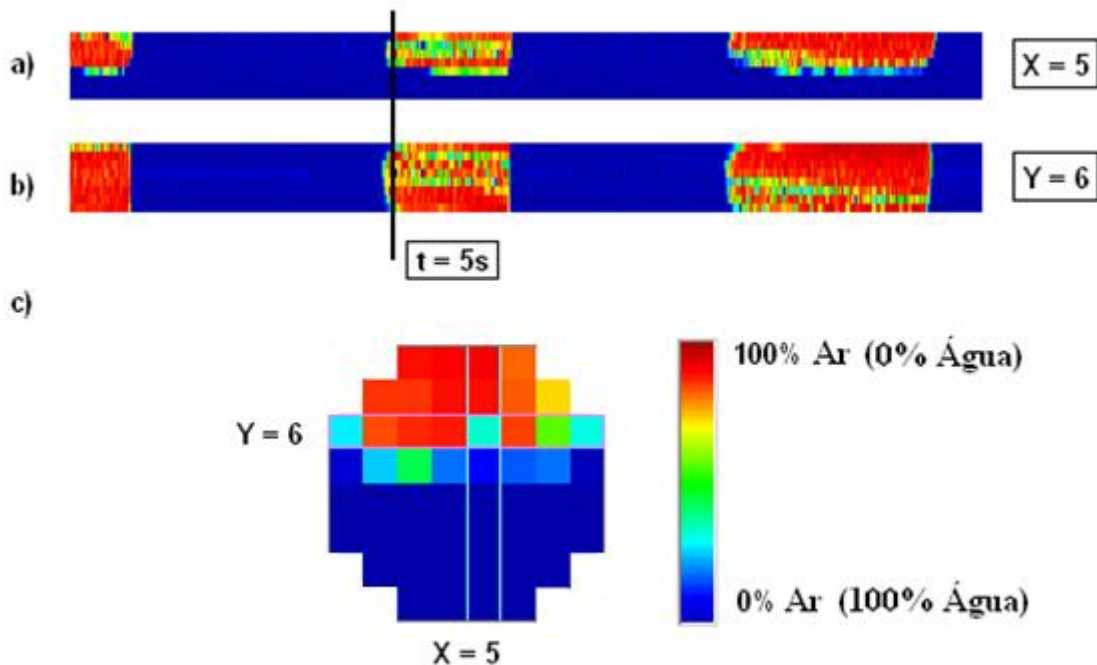


Figura 33 - Aquisição de imagem do escoamento. a) Corte no plano vertical, na quinta coluna de eletrodos. b) Corte no plano horizontal, na sexta linha de eletrodos c) Corte na seção transversal no instante de tempo 5 segundos.

Os valores de tensão medidos através do sensor *wire-mesh* são armazenados de maneira matricial $V(i,j,k)$ na memória do computador, onde i e j representam os índices

espaciais e k o índice temporal. Estes valores de tensão correspondem à permissividade elétrica ϵ de cada cruzamento, que por sua vez são proporcionais a fração de fase (para uma discussão completa ver Da Silva et al. (2010)). A obtenção da fração a vazio é obtida após a calibração da Equação (8), onde duas condições de referência são medidas: tubo cheio (representado por valores de tensão V_H) e tubo vazio (representado por V_L). Desta forma, a fração de vazio α é obtida através de:

$$\alpha(i, j, k) = \frac{V_H(i, j) - V(i, j, k)}{V_H(i, j) - V_L(i, j)} \quad (8)$$

A matriz pode ser analisada de várias formas permitindo avaliar e validar os parâmetros característicos do escoamento em golfadas, como a forma da bolha alongada e a fração de vazio.

4.3 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DA BOLHA

Para calcular a velocidade da bolha, ambos *wire-mesh* e ultrassom são instalados em pares. Dessa forma, o mesmo sinal é adquirido duas vezes, porém, com uma diferença temporal. A Figura 34 mostra a defasagem no tempo entre dois sinais adquiridos por ultrassom.

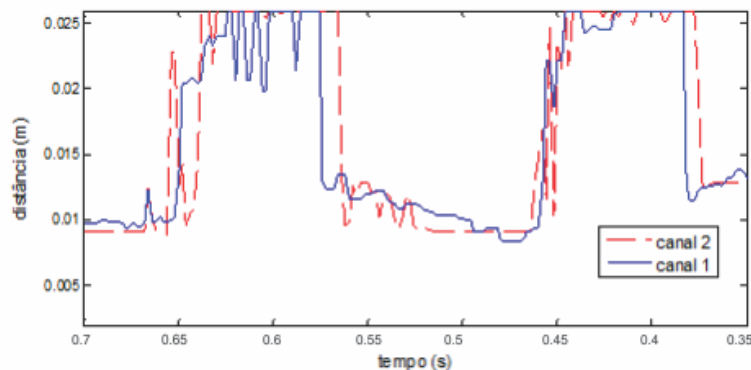


Figura 34 - Diferença temporal entre os sinais medidos por ultrassom.

Para obter a diferença temporal entre os sinais adquiridos foi utilizado o método da correlação cruzada (Pan; Chiang, 2007; Peterson, 1997). A Figura 35 demonstra o uso da técnica para determinar o atraso entre dois sinais adquiridos no mesmo instante de tempo,

porém, em posições diferentes. A correlação cruzada dos sinais é calculada por meio da Equação (9):

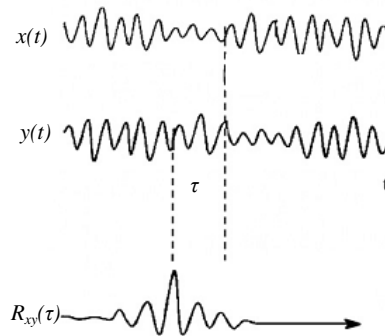


Figura 35 - Corelação cruzada entre dois sinais consecutivos.

$$R(\tau) = \int s_1(t)s_2(t + \tau) \quad (9)$$

Na qual $s_1(t)$ é o sinal adquirido pelo primeiro sensor, $s_2(t)$ é o sinal adquirido pelo segundo sensor e R é o resultado obtido pela correlação cruzada. A diferença de tempo entre os sinais (τ) é determinada pela posição do máximo de R como ilustrado na Figura 35. Como a distância entre os sensores D_S é conhecida, a velocidade instantânea de cada bolha U_B pode ser calculada por meio da equação (10):

$$U_B = \frac{D_S}{\tau} \quad (10)$$

4.4 SÉRIE TEMPORAL DE IMAGENS DA CÂMERA

As filmagens adquiridas pela filmadora de alta velocidade são salvas no computador como um conjunto de imagens. A Figura 36 mostra as imagens de uma bolha alongada adquiridas pela filmadora a uma taxa de 100 quadros por segundo. É possível acompanhar detalhes da evolução da bolha, porém, somente no espaço delimitado pela câmera. Essa limitação dificulta a comparação das imagens com as séries temporais obtidas por ultrassom e *wire-mesh*. Portanto, foi utilizado um algoritmo para combinar as imagens e assim obter uma série temporal semelhante à obtida pelas outras duas técnicas.

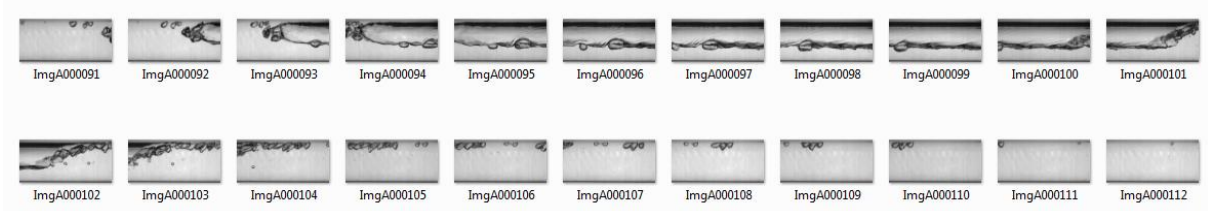


Figura 36 - Imagens de uma bolha alongada adquiridas pela câmera de alta velocidade.

A Figura 37 ilustra a lógica utilizada na metodologia para combinar imagens. Primeiramente, deve-se escolher a imagem inicial, que representa o instante de tempo t_0 . Em seguida, é necessária a obtenção da velocidade da bolha U_G (explicada na seção anterior) e a distância horizontal da área visível pela câmera D_C . Desta forma, obtêm-se o tempo t_c em que uma determinada parte da bolha atravessa a área de filmagem, conforme a equação (11). Assim, a série temporal é obtida pela junção dos quadros a cada período de tempo t_c .

$$t_c = \frac{D_C}{U_B} \quad (11)$$

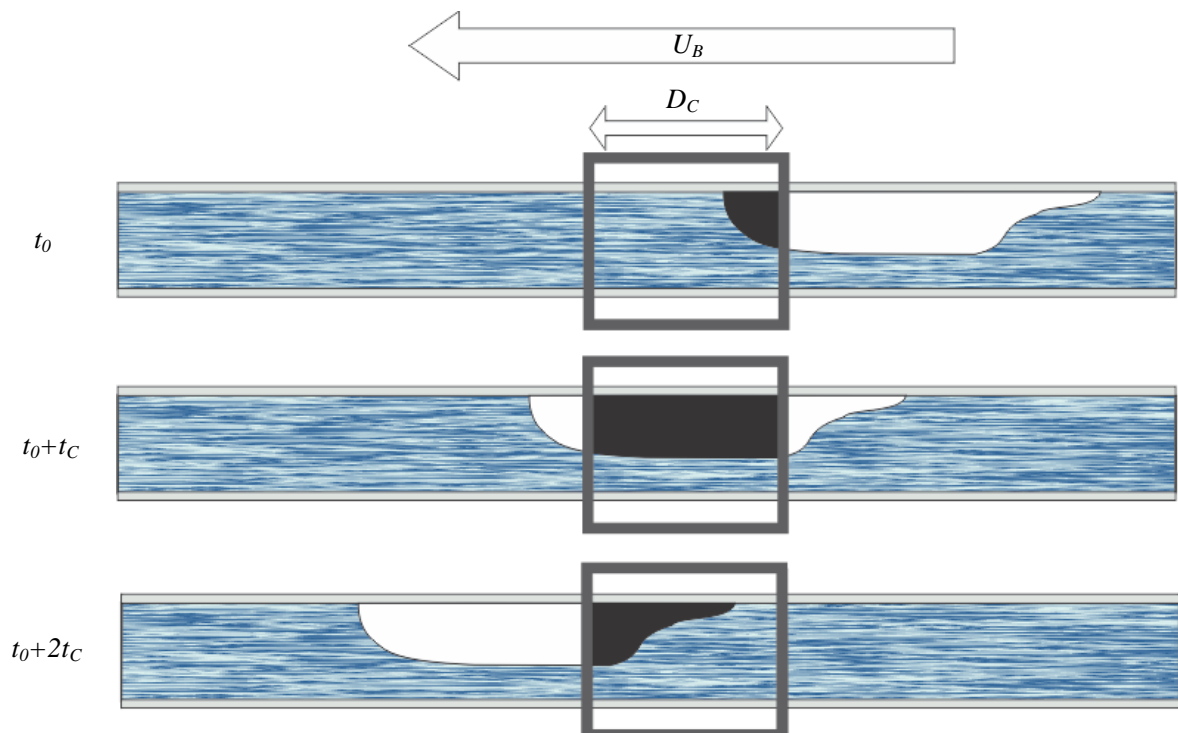


Figura 37 - Método para geração de série temporal de imagens do escoamento.

A Figura 38 mostra a série temporal obtida com a aplicação da metodologia apresentada no conjunto de imagens da Figura 36.

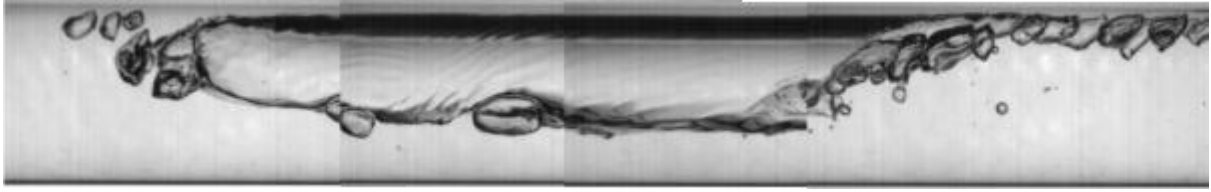


Figura 38 - Série temporal obtida com a junção de imagens.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Cada padrão de escoamento é caracterizado por uma quantidade de líquido ou gás que se distribui de diferentes maneiras espacial e temporalmente. O escoamento em golfadas em particular, tem como característica a alternância de bolhas de gás e pistões de líquido, conforme pode ser observado na série temporal de fração de vazio mostrado na Figura 39.

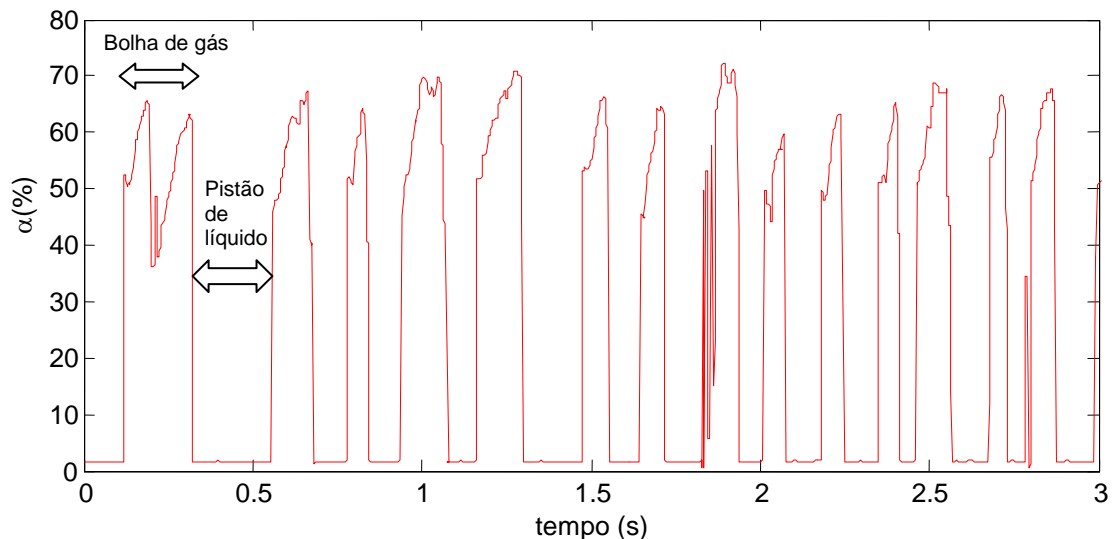


Figura 39 - Série temporal de fração de vazio.

Duas funções utilizadas na área de escoamentos para análise das séries temporais são: a função densidade de probabilidade (*PDF - Probability Density Function*) e a função densidade espectral de potência (*PSD - Power Spectral Density*) (Reis, Dos; Goldstein Jr., 2010). A primeira é levantada a partir de histogramas que representam a probabilidade de um valor ocorrer em um determinado intervalo de valores. O segundo tipo de análise, a *PSD*, descreve como a energia de uma série temporal se distribui com a frequência (Stoica, 1997). A Figura 40 exemplifica uma série temporal de um sinal e os gráficos da *PDF* e da *PSD* geradas.

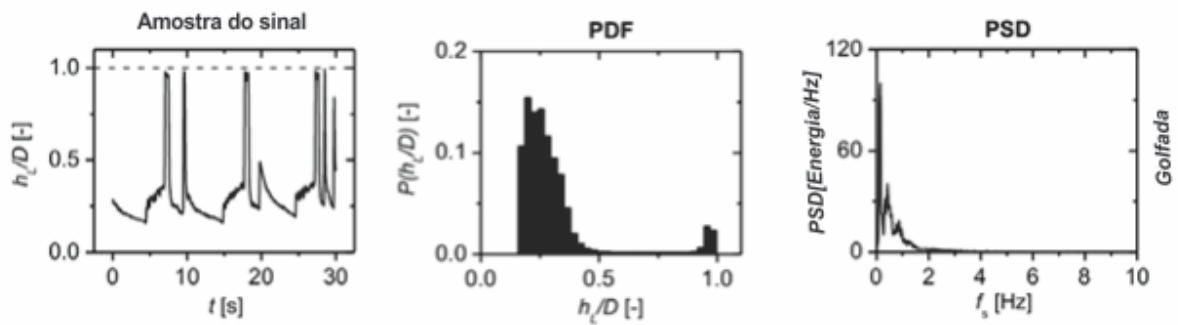


Figura 40 - Série temporal de um sensor capacitivo e os gráficos de *PDF* e *PSD* para um escoamento bifásico horizontal (dos Reis; Goldstein Jr., 2010).

4.6 CORRELAÇÕES EMPÍRICAS EXISTENTES NA LITERATURA

As frações de vazio e a velocidade da bolha alongada, obtidas pelas técnicas de medição utilizadas, foram comparadas com correlações empíricas encontrados na literatura. Desta forma, é possível verificar se os resultados obtidos nos experimentos são coerentes com trabalhos realizados por outros autores.

As correlações empíricas resultam em modelos matemáticos sujeitos a algumas restrições como as faixas de vazão de líquido e gás abrangidas no experimento. Portanto, foram escolhidos modelos cujas condições do experimento eram similares àquelas deste trabalho.

Para fração de vazio, optou-se por utilizar os modelos de Gregory e Scott (1969) e Mattar e Gregory (1974), descritos nas equações da Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos para o cálculo da fração de vazio.

Modelo	Equação
Gregory e Scott (1969)	$\bar{\alpha} = \frac{j_G}{1,19 j}$
Mattar e Gregory (1974)	$\bar{\alpha} = \frac{j_G}{1,3 j + 0,7}$

No caso da velocidade da bolha, foi utilizado o modelo obtido por Bendiksen (1984), em que a velocidade da bolha alongada em um escoamento horizontal em golfadas foi modelada pela Equação (13).

$$U_T = (C_o J + C_\infty \sqrt{gD}) \quad (12)$$

onde, g é gravidade, D é o diâmetro interno do tubo, J é a velocidade da mistura $J=J_G+J_L$, C_0 e C_∞ são coeficientes obtidos empiricamente segundo a Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes obtidos para o cálculo da velocidade da bolha.

	C_0	C_∞
$Re_j \geq 1000$	$Fr_j \geq 3.5$	$\frac{0.345}{\left(1 + \frac{3805}{Eo^{3.06}}\right)^{0.58} \text{sen}(\theta)}$
	1.2	
$Re_j < 1000$	$Fr_j < 3.5$	$\left(0.542 - \frac{1.76}{Eo^{0.56}}\right) \cos(\theta) + \frac{0.345}{\left(1 + \frac{3805}{Eo^{3.06}}\right)^{0.58} \text{sen}(\theta)}$
	1.0	
	2.0	$\left(0.542 - \frac{1.76}{Eo^{0.56}}\right) \cos(\theta) + \frac{0.345}{\left(1 + \frac{3805}{Eo^{3.06}}\right)^{0.58} \text{sen}(\theta)}$

o ângulo de inclinação θ é de 0 graus pois se trata de um escoamento horizontal, o número de Reynolds do pistão de líquido Re_j foi definido como

$$Re_j = \frac{\rho_L J D}{\mu_L} \quad (13)$$

o número de Freud Fr_j foi definido como

$$Fr_j = \frac{J}{\sqrt{gD}} \quad (14)$$

a constante Eo foi definida como

$$Eo = \frac{D^2 g (\rho_L - \rho_G)}{0.07} \quad (15)$$

Mais detalhes da formulação podem ser encontrados em Bendiksen (1984).

5 RESULTADOS

Nesse capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise das medições realizadas. Primeiramente, é mostrada a grade de testes utilizada no experimento. Em seguida, são realizadas análises da visualização do escoamento pelas técnicas de ultrassom, *wire-mesh* e câmera de alta velocidade. Posteriormente, a fração de vazio obtida pela sonda ultrassônica e pelo sensor *wire-mesh* é estudada em detalhes com o auxílio da câmera de alta velocidade e modelos mecânicos da literatura. Por fim, é realizada uma análise da velocidade da bolha medida.

5.1 GRADE DE TESTES

O uso de mapas de fluxo possibilita prever os padrões de escoamento de acordo com a combinação de parâmetros utilizados, como foi abordado na Seção 2.1.1. Os testes realizados no padrão em golfadas foram planejados de acordo com o mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976), mostrado na Figura 41, em que os autores utilizaram um duto horizontal de 26 mm de diâmetro interno a pressão de um 1 bar e na temperatura de 20°C. A combinação das velocidades superficiais do líquido e do gás utilizadas pode ser observada na Tabela 3 e também na Figura 41. O padrão intermitente foi gerado em todas as situações, exceto pelas combinações ($J_G = 1,5; J_L = 0,3$) e ($J_G = 2; J_L = 0,3$), que resultaram no padrão do tipo bolhas dispersas, e, portanto, foram excluídas do teste.

Tabela 3 - Parâmetros combinados durante os testes experimentais.

j_L [m/s]	-	0,50	0,70	1,00	1,30	1,50	2,00
j_G [m/s]	0,30	0,50	0,70	1,00	1,30	1,50	2,00

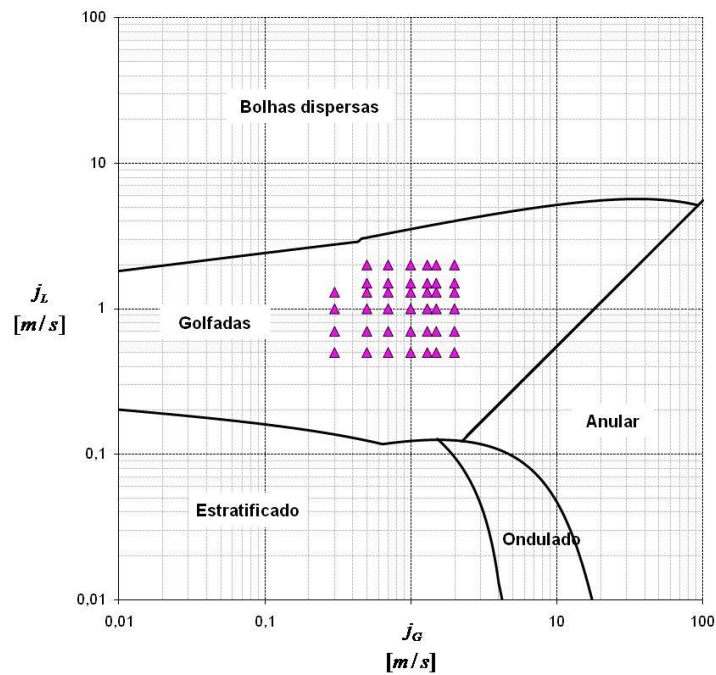
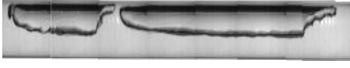
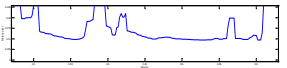
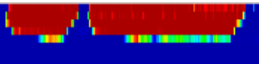
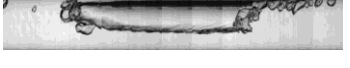
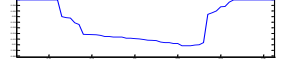

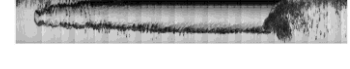
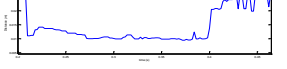
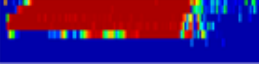

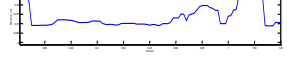
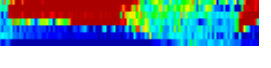


Figura 41 - Mapa de fluxo para um escoamento bifásico água-ar (Fonte: Adaptado de Taitel *et al.*, 1976).

5.2 VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

Nesta seção é possível verificar as características do padrão em golfadas, descritas na Seção 2.1, por meio de séries temporais obtidas pelas técnicas de filmagens de alta velocidade, ultrassom e *wire-mesh*. A Tabela 4 mostra alguns dos resultados obtidos pelas três técnicas.

Tabela 4 - Visualização do padrão em golfadas por imagens e pelas técnicas de ultrassom e *wire-mesh*.

Condição		Câmera	Ultrassom	Sensor Wire-mesh
A	$J_L=0,5$ m/s $J_G=0,5$ m/s			
B	$J_L=1,3$ m/s $J_G=0,3$ m/s			
C	$J_L=1,3$ m/s $J_G=1,3$ m/s			
D	$J_L=2,0$ m/s $J_G=2,0$ m/s			

Pode-se verificar pelas imagens que, para baixas velocidades da mistura (J), as bolhas de Taylor possuem contornos bem definidos e não apresentam pequenas bolhas distribuídas na região da calda (linha A). Com o aumento de J , principalmente pela parcela da velocidade superficial do gás (J_G), ocorre o aumento da região da calda e um grande desprendimento de bolhas na região do pistão e, em menor escala, ao longo da bolha de Taylor.

A visualização do escoamento por técnica ultrassônica em modo pulso-eco é possível com o uso de séries temporais da fração de líquido. A análise do sinal mostrou-se bastante satisfatória, principalmente para a detecção da bolha de Taylor. Porém, na presença de pequenas bolhas, os sinais são distorcidos e a visualização é prejudicada. Isto se deve ao fato da onda ser atenuada pelas bolhas e, portanto, não ser refletida totalmente para o transdutor emissor. Outra limitação observada são as áreas não atingidas pela onda de ultrassom, como é o caso das regiões acima do nariz das bolhas nas condições C e D. Para solucionar essa limitação da técnica, poder-se-ia utilizar uma maior quantidade de transdutores, e assim, realizar uma tomografia mais detalhada do escoamento.

O sensor *wire-mesh* apresentou resultados compatíveis com as imagens adquiridas. Nota-se nas imagens da tabela que o contraste obtido entre as fases nas imagens tomográficas é bastante claro. Detalhes de toda a seção transversal são captados, até mesmo a presença de pequenas bolhas, responsáveis pelo aeramento dos pistões. Essa característica é de grande importância, pois o *wire-mesh* será utilizado como referência para analisar resultados da técnica ultrassônica.

5.3 ANÁLISE DA FRAÇÃO DE VAZIO

Os principais resultados obtidos nesta dissertação estão baseadas nas séries temporais de fração de vazio. As seguintes análises, realizadas com o uso do *software Matlab Mathworks* (2007), foram feitas conforme consta na Seção 4 :

- Fração de vazio média do escoamento;
- Caracterização do escoamento em golfadas pelos métodos estatísticos baseados em função densidade de probabilidade e densidade espectral de potência;
- Velocidade da bolha pelo método da correlação cruzada.

Os resultados obtidos pela técnica ultrassônica foram comparadas a modelos mecânicos da literatura e outras técnicas experimentais como o *wire-mesh* e a filmagens de alta velocidade.

5.3.1 Séries temporais de fração de vazio

As séries temporais de fração de vazio, calculadas com o uso das técnicas de ultrassom e *wire-mesh* pelas Equações (7) e (8), respectivamente, foram levantadas para todas as condições experimentais. Para possibilitar a análise dos mesmos trechos, os sinais foram sincronizados, como mostra a Figura 42.

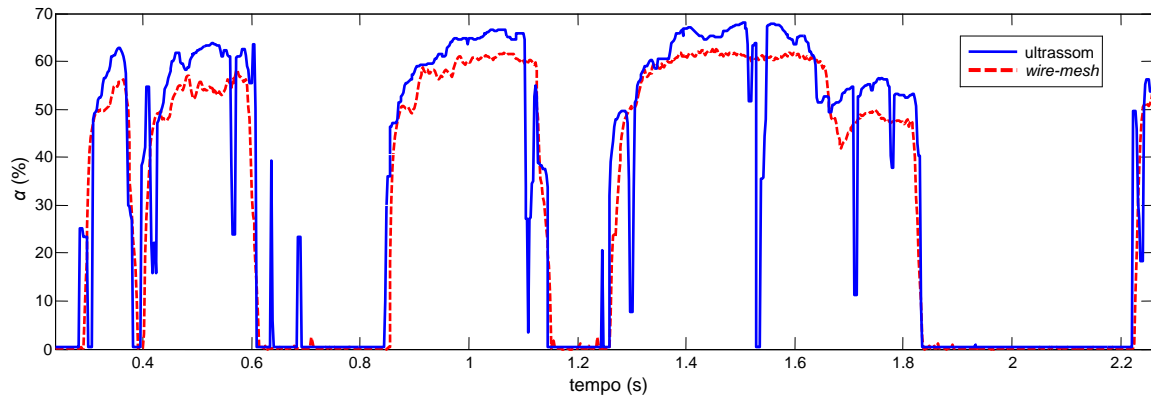


Figura 42 - Série temporal de fração de vazio gerada por técnicas de ultrassom e *wire-mesh*.

A partir das curvas obtidas, uma análise simplificada pode ser feita pelo uso da fração de vazio média do período de aquisição. A Equação (16) mostra o cálculo da fração de vazio média $\bar{\alpha}$ para n amostras temporais do sinal. Neste trabalho foram utilizadas 5120 amostras.

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n} \quad (16)$$

Os resultados obtidos por ambas as técnicas mostraram grande similaridade e um alto coeficiente de correlação para a regressão linear. Além disso, as frações de vazio médias foram comparadas com modelos elaborados por Gregory e Scott (1969) e Mattar e Gregory (1974). As comparações citadas podem ser observadas na Figura 43, em que se destaca a compatibilidade dos resultados experimentais com os dados da literatura.

O modelo de Gregory e Scott (1969) foi o que mais se aproximou dos resultados obtidos pela técnica de ultrassom, tendo-se obtido valores similares para baixos e médios valores de J_G/J . Para proporções maiores de J_G em relação à velocidade da mistura, o ultrassom perde a tendência de aumento da fração de vazio e deixa de acompanhar o modelo.

Os valores de fração de vazio calculados pela equação de Mattar e Gregory (1974) apresentaram um comportamento semelhante aos valores obtidos experimentalmente. Alguns

pontos não lineares da curva de ultrassom foram acompanhados, o que não ocorreu no modelo analisado anteriormente. Porém, os valores de fração de vazio ficaram bem abaixo dos resultados obtidos tanto por técnica ultrassônica quanto para o sensor *wire-mesh*.

Tabela 5 - Modelos para o cálculo da fração de vazio.

Modelo	Equação
Gregory e Scott (1969)	$\bar{\alpha} = \frac{j_G}{1,19j}$
Mattar e Gregory (1974)	$\bar{\alpha} = \frac{j_G}{1,3j+0,7}$

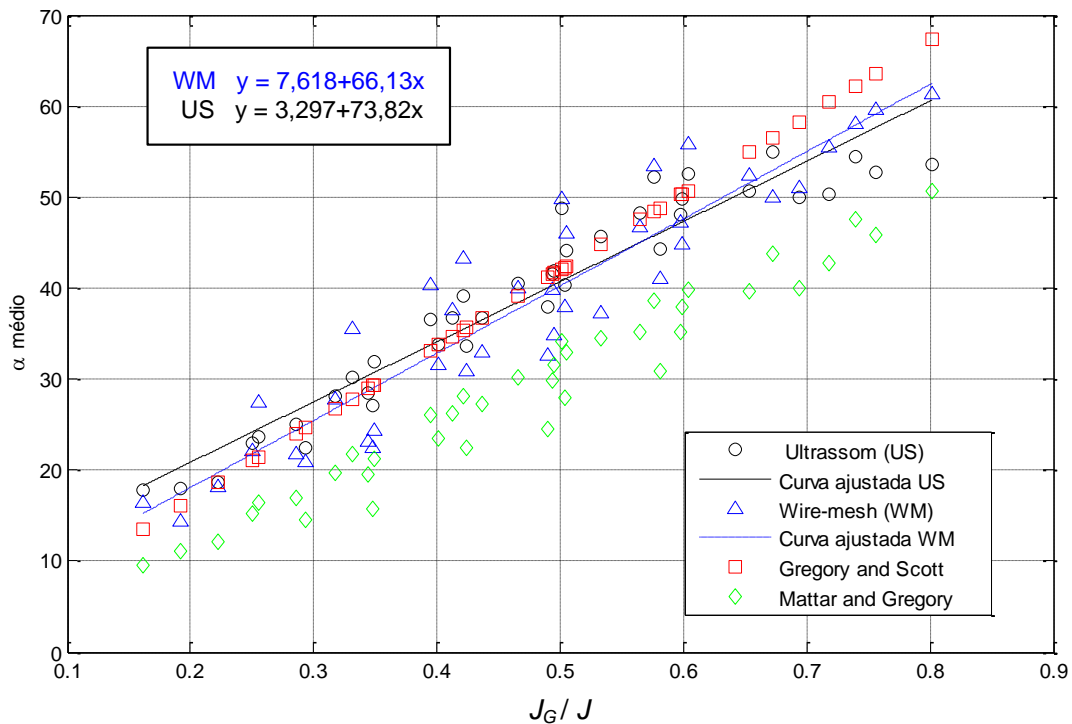


Figura 43 - Variação da fração de vazio média com os parâmetros do escoamento.

O gráfico também possibilita uma comparação ponto a ponto das frações de vazio médias, entre as técnicas de ultrassom e *wire-mesh*. Considerando os dados deste último como mais próximos da realidade (vide seção 5.2), é possível observar a tendência do ultrassom em superestimar a fração de vazio em escoamentos para valores de baixa predominância de J_G . Com o aumento gradual de J_G na mistura, ocorre uma inversão, na qual os valores de fração de vazio passam a ser subestimados. Um estudo mais detalhado das duas situações, com o

auxílio de filmagens de alta velocidade e tomografias feitas pelo sensor *wire-mesh*, será mostrado a seguir.

A Figura 44 ilustra um escoamento com valores de $J_L=0,5$ e $J_G=0,5$, em que o ultrassom apresenta uma fração de vazio ligeiramente maior que o *wire-mesh*.

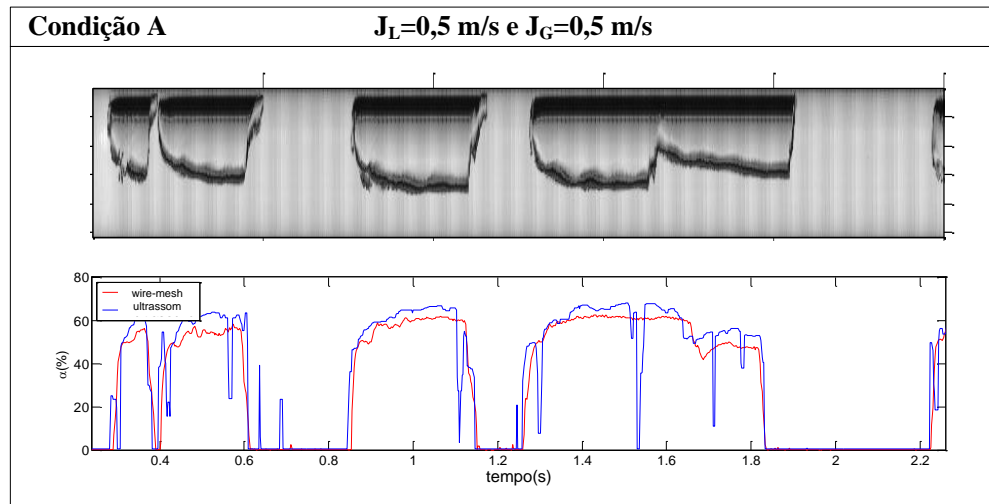


Figura 44 - Série temporal de fração de vazio, para $J_L=0,5$ e $J_G=0,5$, por técnicas de ultrassom, imagem e *wire-mesh*.

Pelas imagens adquiridas pela câmera, é observado um escoamento com bolhas alongadas e de contornos bem definidos, aparentemente sem dificuldades para o uso da técnica de ultrassom. Porém, a tomografia realizada pelo sensor *wire-mesh* mostra que as bolhas possuem uma curvatura em sua área inferior (Figura 45(b)), o que prejudica o cálculo da fração de vazio pelo ultrassom uma vez que é levado em conta apenas o plano da seção da central (Figura 45(a)). Para melhorar a precisão do sistema ultrassônico, seria necessário um maior número de transdutores para analisar toda a seção ou um algoritmo para compensar o erro de curvatura da bolha.

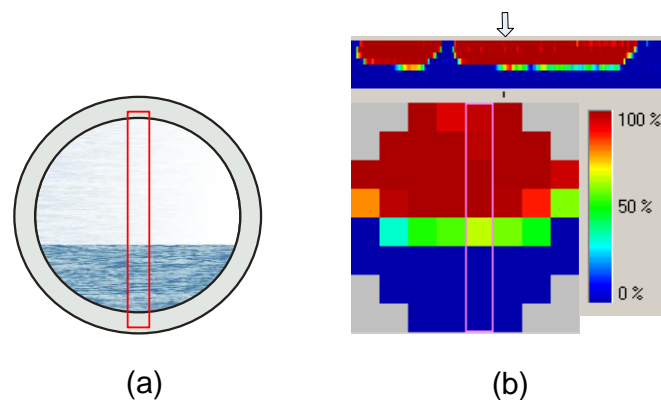


Figura 45 - (a) Seção considerada pelo ultrassom (b) Análise detalhada da seção feita pelo *wire-mesh*.

Outros aspectos do sinal de ultrassom podem ser observados no comparativo entre as séries temporais de fração de vazio para um escoamento em que $J_L=2,0$ e $J_G=2,0$ (Figura 46).

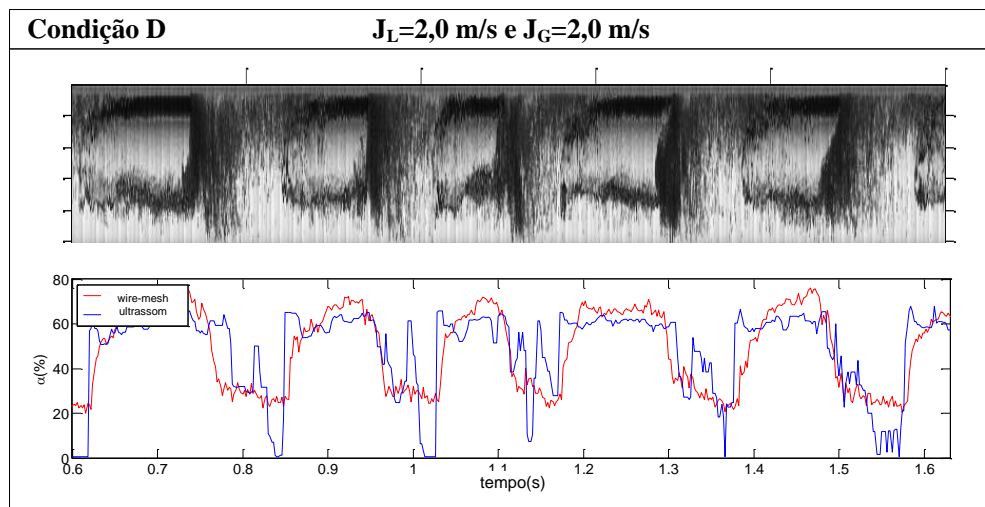


Figura 46 - Série temporal de fração de vazio, para $J_L=2,0$ e $J_G=2,0$, por técnicas de ultrassom, imagem e *wire-mesh*.

A Figura 47 proporciona uma comparação detalhada entre o sinal de ultrassom adquirido e a tomografia realizada pelo *wire-mesh*. Foi percebido que em determinadas áreas o ultrassom subestima ou superestima a fração de vazio.

- Fração de vazio subestimada: Altas velocidades da mistura causam o desprendimento de uma grande quantidade de pequenas bolhas, que por sua vez, passam a contribuir significativamente para o aumento da fração de vazio. Devido a essas condições, pode ser observado que no final da cauda (Figura 47(d)) e no meio da bolha de Taylor (Figura 47(b)), o ultrassom passa a subestimar a fração de vazio, justamente por não contabilizar as bolhas dispersas.
- Fração de vazio superestimada: A concentração de gás é superestimada em dois locais: no nariz da bolha (Figura 47(a)), pois ultrassom considera que a bolha se estende até a tubulação, onde na verdade existe uma parcela de líquido; em determinados locais da cauda (Figura 47(c)), onde a concentração de pequenas bolhas é grande o suficiente para que a onda de ultrassom seja refletida e o local seja considerado uma bolha que se estende até a tubulação.

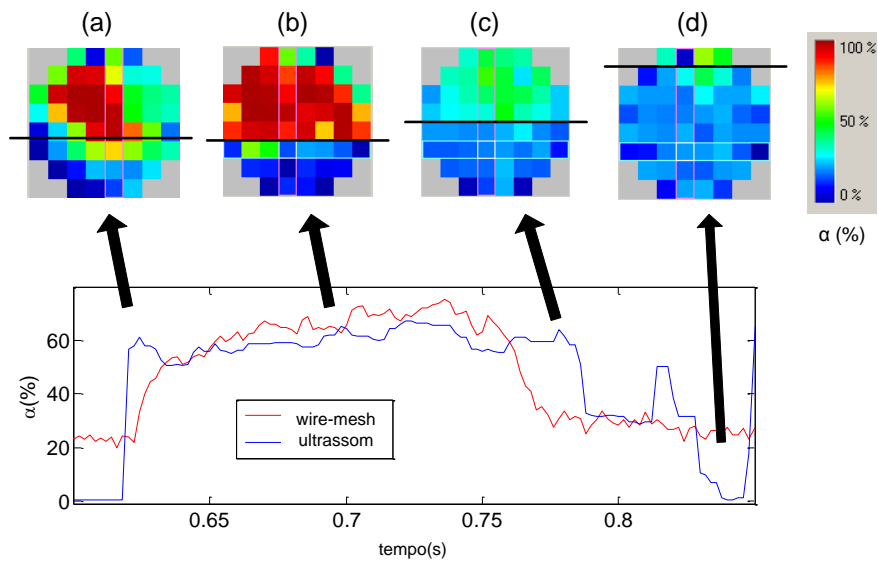


Figura 47 - Detalhes da série temporal de fração de vazio. (a) Nariz da bolha; (b) Meio da bolha; (c) Cauda da bolha; (d) Final da cauda da bolha.

Por fim, uma comparação mais precisa entre os resultados obtidos pelos dois sensores é mostrada na Figura 48. A linha central em vermelho representa os pontos em que a fração de vazio média do ultrassom é igual à calculada pelo *wire-mesh*. As linhas adjacentes representam limites em que as diferenças são de 10% e 20%. Nota-se que existe um grande número de pontos entre 0% e 10% de diferença, alguns pontos entre 10% e 20%, e um número menor de pontos com diferenças acima de 20%. O valor médio da diferença foi calculado em 8,9%, o que de uma maneira geral é um bom resultado, visto que ainda existe um grande potencial de melhoria na técnica.

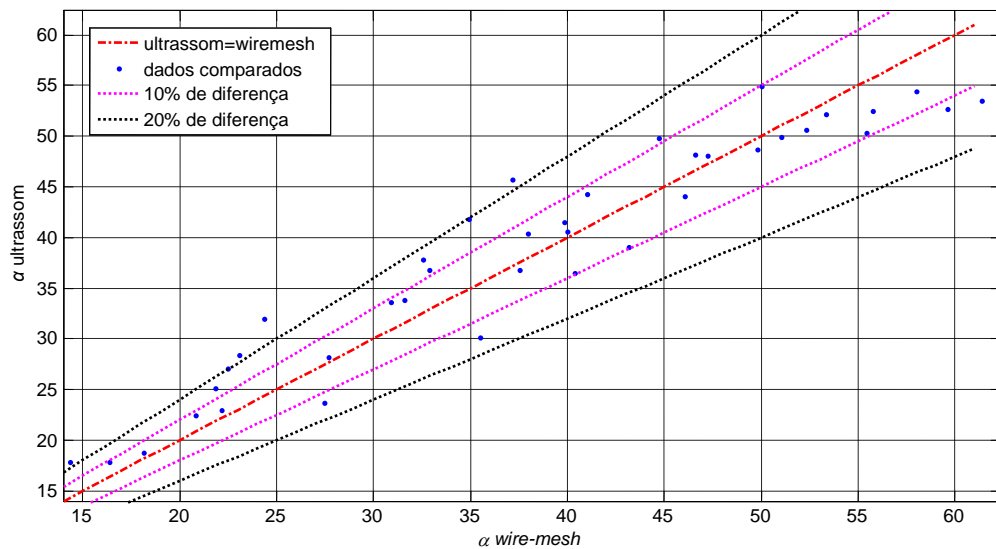


Figura 48 - Comparação dos resultados obtidos pelas técnicas de ultrassom e *wire-mesh*.

5.3.2 Funções densidade de probabilidade (*PDF*)

A função densidade de probabilidade de séries temporais de fração de vazio tem sido amplamente utilizada para a caracterização do escoamento bifásico. A técnica permite a análise e a visualização gráfica das flutuações da fração de vazio, que se diferem dependendo das características do escoamento. O presente trabalho detalha *PDFs* obtidas em variações do padrão golfadas.

A Figura 49 e a Figura 50 mostram resultados obtidos para escoamentos com diversos valores de velocidade superficial do líquido e do gás. Pode-se observar que as *PDFs* do padrão golfadas têm como característica principal picos de frequência próximos a $\alpha=0\%$ e $\alpha=50\%$, isto, devido à alternância entre as bolhas de gás e o pistão de líquido. Além disso, os resultados são distintos para cada ponto do mapa de fluxo de Taitel (1976) das figuras, permitindo estimar uma mudança no padrão de escoamento como mostram as análises a seguir.

Na Figura 49, a velocidade superficial do gás é mantida constante e a velocidade do líquido é gradativamente aumentada para simular uma tendência do padrão em golfadas se tornar anular. A mudança no comportamento do escoamento é observada na *PDF*, em que os valores de frequência de $\alpha=0\%$ diminuem e o valor de pico próximo a $\alpha=50\%$ aumenta e se desloca para valores de α maiores. Esse comportamento pode ser atribuído ao aeramento do pistão de líquido, que diminui a fração de líquido e aumenta a fração de vazio. Também é observado o surgimento de um pequeno pico adjacente ao maior, a partir de $J_G=1$.

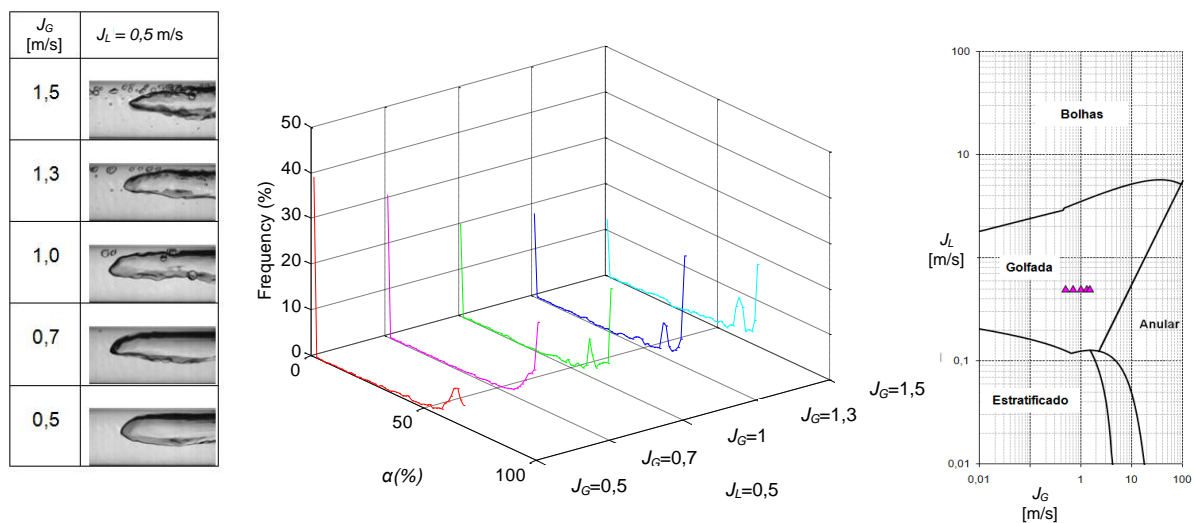


Figura 49 - Função densidade de probabilidade (*PDF*) da fração de vazio, para J_L constante J_G variável no padrão golfadas.

O experimento inverso, mostrado na Figura 50, em que a velocidade superficial do líquido aumenta e a velocidade do gás se mantém constante, gera uma tendência do escoamento em golfadas se tornar bolhas dispersas. Nas *PDFs* obtidas nota-se um leve aumento no valor de frequência em que $\alpha \cong 0\%$, ou seja, diferentemente do experimento anterior, a fração de vazão diminui e a fração de líquido aumenta. Nota-se também que os picos em que a fração de vazão é alta são distribuídos em mais faixas adjacentes. Essa característica é explicada pela variação do tamanho das bolhas, tanto em altura quanto em comprimento.

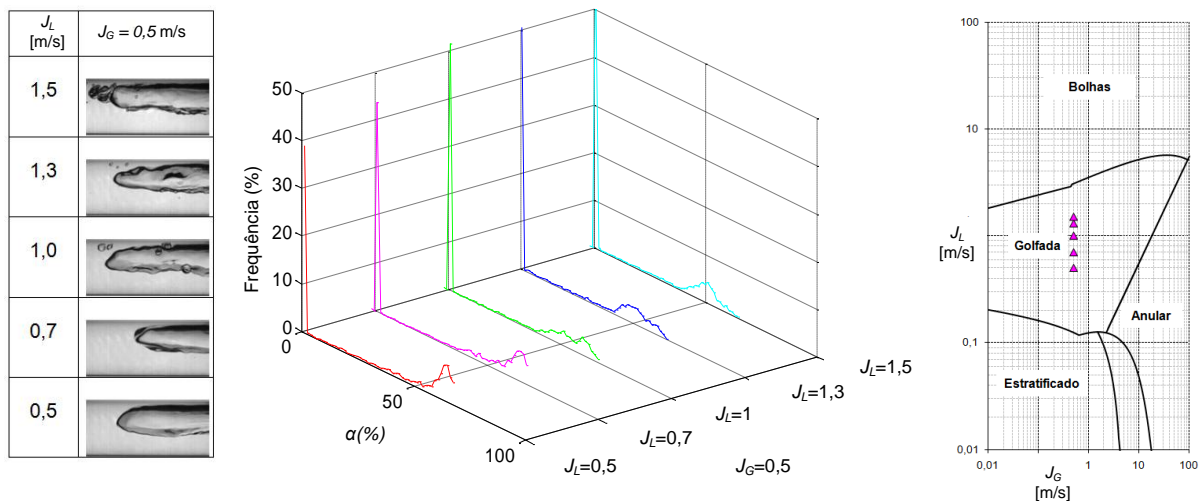


Figura 50 - Função densidade de probabilidade (*PDF*) da fração de vazão, para J_G constante e J_L variável, no padrão golfadas.

5.3.3 Função densidade espectral de potência (*PSD*)

A função densidade espectral de potência, explicada no Capítulo 3, é utilizada para análise de sinais no domínio da frequência. O principal parâmetro obtido pela técnica é a frequência característica do sinal, obtida pelo valor máximo da *PSD*. O conceito é particularmente interessante para investigar a frequência de passagem das bolhas alongadas do padrão golfadas.

A Figura 51 mostra a densidade espectral de potência de um escoamento bifásico em que se mantém a vazão do gás constante e varia-se a vazão do líquido. Nota-se que a frequência correspondente ao valor máximo da *PSD* cresce com o aumento da vazão do líquido, o que indica um aumento na frequência de passagem da célula unitária. O resultado

obtido é coerente com as séries temporais de fração de vazio mostradas na Figura 52, em que se observa um aumento na quantidade de bolhas alongadas por unidade de tempo.

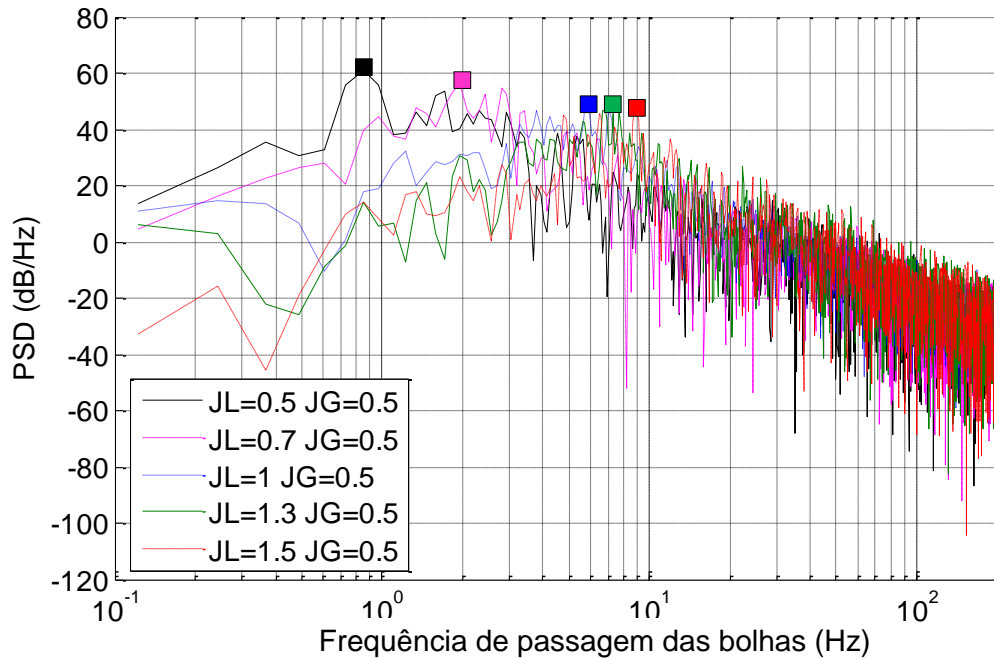


Figura 51 - PSD da fração de vazio de um escoamento bifásico de vazão constante do gás com o aumento progressivo da vazão do líquido.

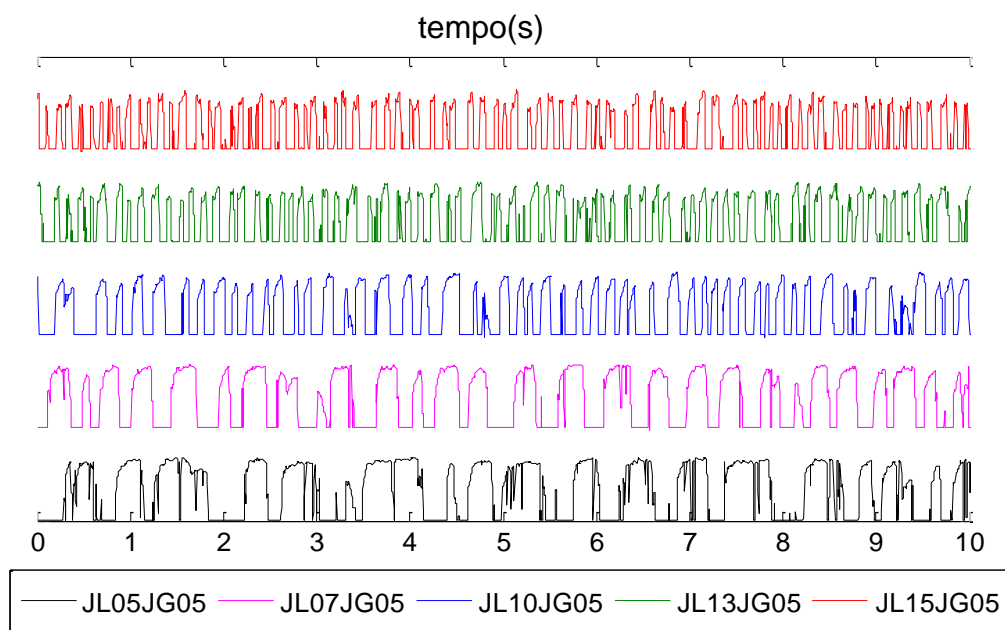


Figura 52 - Séries temporais da fração de vazio de um escoamento bifásico em que a vazão do gás é mantida constante e a vazão do líquido é aumentada progressivamente.

Um segundo experimento, em que se manteve constante a vazão do líquido e aumentou-se a vazão do gás, foi investigado com a função densidade espectral de potência, conforme mostra a Figura 53. Observa-se que o formato da PSD é similar ao analisado no

primeiro experimento: uma curva ascendente de potência que atinge um pico posteriormente diminui conforme o aumento da frequência. Também foi verificado que os picos da *PSD* estão próximos entre si, e são bem menores do que os valores observados no primeiro experimento. A proximidade dos valores sugere escoamentos semelhantes, fato esse notado nas séries temporais mostradas na Figura 54. Nesse caso, seria necessário um tempo mais significativo do que os 10 segundos de aquisição para uma distinção melhor dos escoamentos.

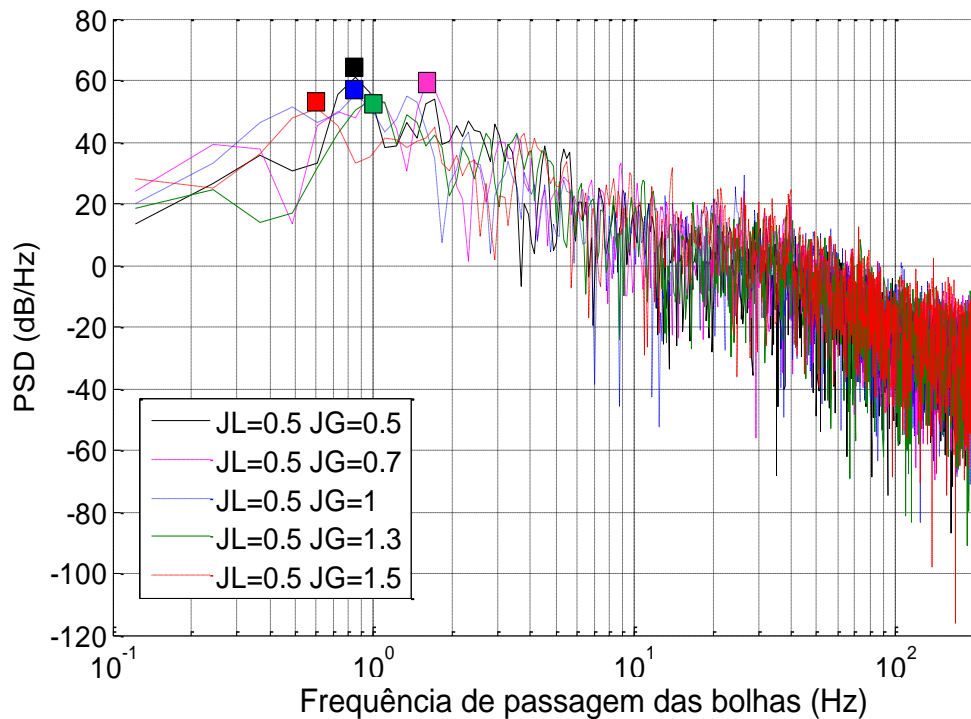


Figura 53 - PSD da fração de vazio de um escoamento bifásico de vazão constante do líquido com aumento progressivo da vazão do gás.

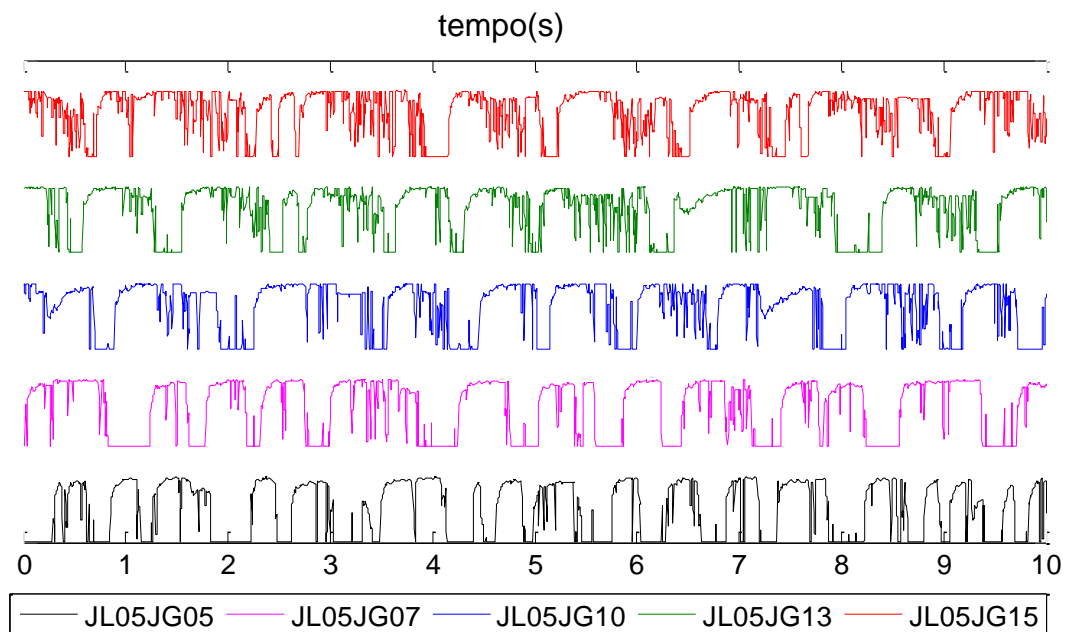


Figura 54 - Séries temporais da fração de vazio de um escoamento bifásico em que a vazão do líquido é mantida constante a vazão do gás é aumentada progressivamente.

5.4 VELOCIDADE DA BOLHA

A velocidade da bolha foi calculada pela correlação cruzada de duas séries temporais de fração de vazio, conforme mostrado na Seção 4.3. Inicialmente, é realizada uma análise da influência das velocidades superficiais do líquido e do gás isoladamente, da mesma forma que nas seções prévias. Em seguida, resultados obtidos para todas as condições experimentais são comparados com valores encontrados na literatura. Por fim, é feita uma comparação das velocidades obtidas pelas técnicas *wire-mesh* e ultrassom.

A Figura 55 mostra o comportamento da velocidade da bolha com o aumento da velocidade superficial do líquido em uma condição de velocidade superficial do gás constante. Percebe-se um aumento da velocidade da bolha com o crescimento de J_G bem como um aumento na dispersão dos dados. Isso pode ser explicado pelo aumento de bolhas dispersas no escoamento, o que dificulta o cálculo da velocidade, à medida que as velocidades superficiais do líquido e do gás aumentam. Esse comportamento também é observado no gráfico da Figura 56, em que J_G é mantido constante e J_L aumentado gradativamente. Para ambos os casos foi feito um ajuste por uma função linear “ $y=a+bx$ ”, em que a inclinação da reta ficou próxima de 48 graus.

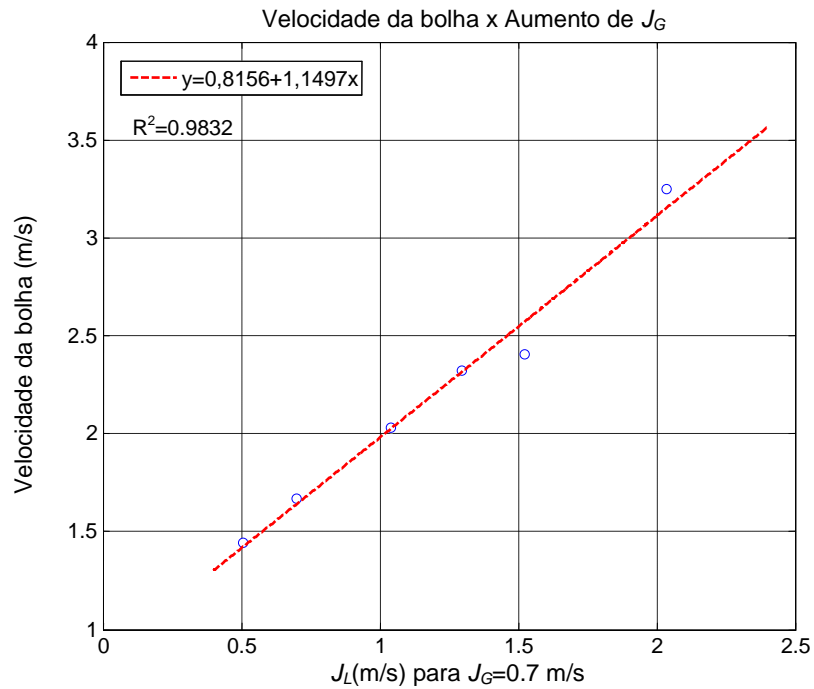


Figura 55 - Gráfico da velocidade da bolha conforme aumenta a velocidade superficial do líquido.

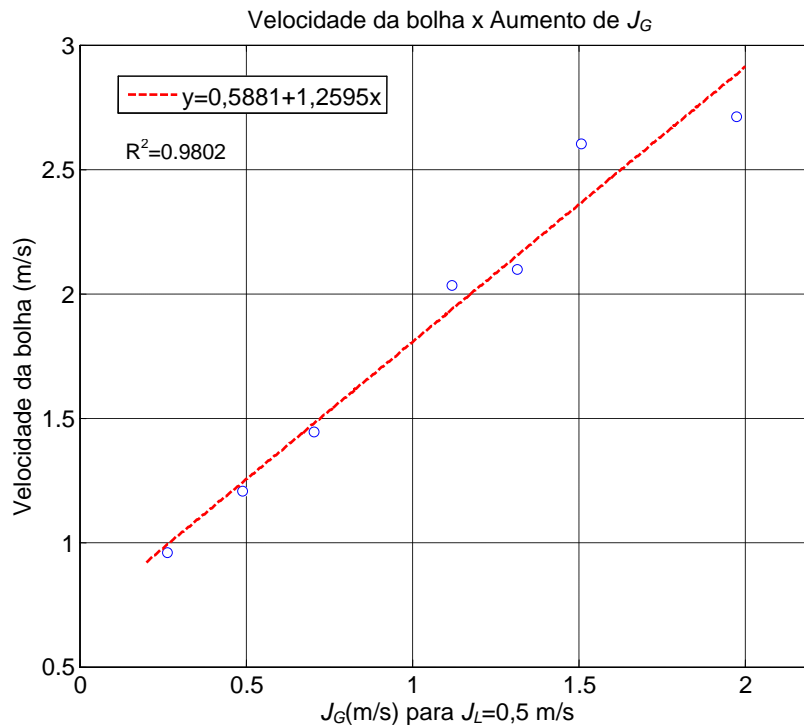


Figura 56 - Gráfico da velocidade da bolha conforme aumenta a velocidade superficial do gás.

Os resultados de velocidade da bolha, obtidos em todos os experimentos, foram comparados ao modelo mecânico de Bendiksen, apresentado na Seção 4.6, conforme mostra a Figura 57. O estudo considera os valores encontrados na literatura como padrão. A reta pontilhada representa os valores em que a velocidade prevista pelo modelo e a velocidade

experimental são iguais, ou seja, uma diferença de 0%. As retas contínuas representam valores com diferenças de 10%. Observa-se uma grande quantidade de pontos com diferenças de até 10% e uma minoria com diferenças maiores que esse limite. A diferença média absoluta calculada foi de 0,18261 m/s e o desvio padrão de 0,18431 m/s.

Uma análise estatística percentual é mostrada na Figura 58. A diferença das medidas teóricas e experimentais é mostrada em função dos valores de J_L e J_G na Figura 58(a). Percebe-se que para baixas velocidades da mistura a diferença é próxima de zero, principalmente para valores menores de J_G . À medida que a velocidade da mistura aumenta, a diferença cresce para um patamar médio de 5%. Alguns picos entre 10% e 21% foram encontrados na região de transição entre o padrão golfadas e o padrão anular, o que indica dificuldades na técnica nessas condições. A variação de resultados pode ser visualizada melhor na Figura 58(b). O gráfico ilustra uma superfície em que as diferenças estão representadas por tonalidades de cores diferentes. A predominância de tonalidades de cor de até 6% ilustra a diferença média obtido de 5,88%, mostrando que os resultados experimentais têm grande correlação com os valores obtidos pelo modelo teórico.

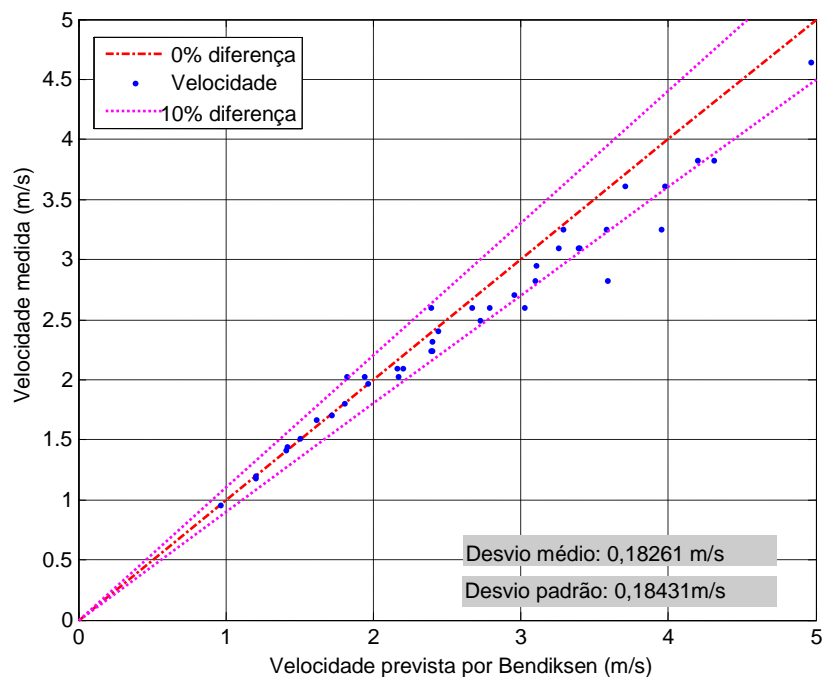


Figura 57 - Gráfico da velocidade prevista por Bendiksen em relação à velocidade experimental obtida.

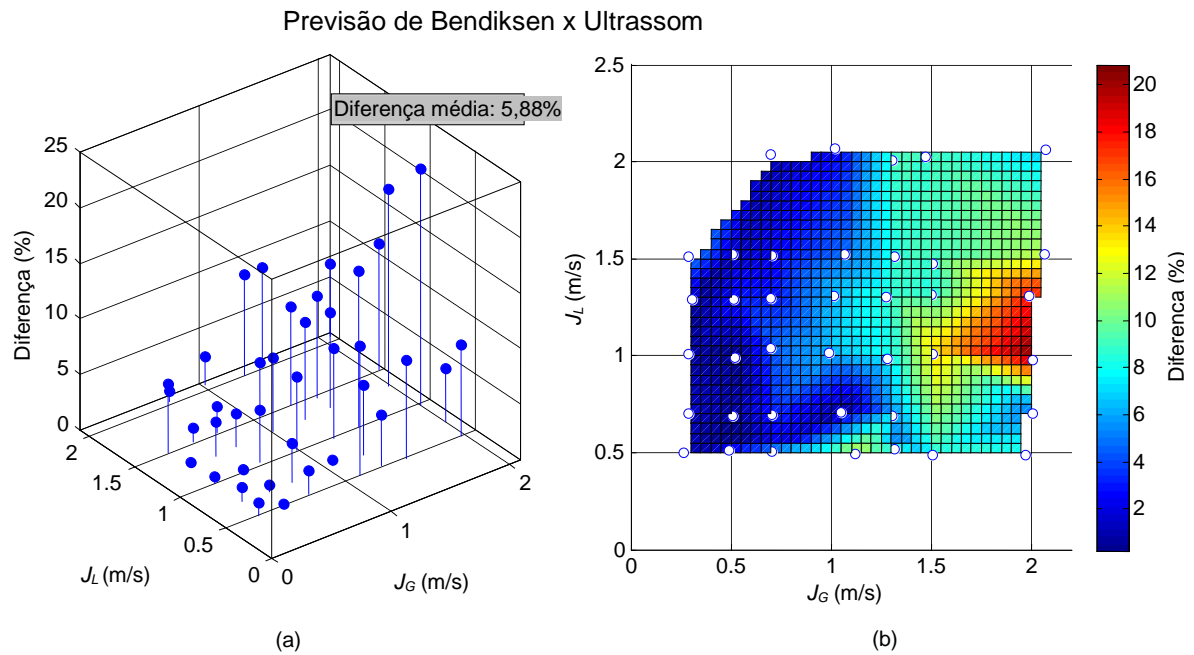


Figura 58 - Diferença nas velocidades da bolha obtidas pela técnica de ultrassom e pelo modelo teórico. a) Diferença percentual em relação à J_L e J_G . (b) Superfície de diferenças.

A velocidade da bolha obtida por ultrassom foi comparada também com a velocidade obtida pelo sensor *wire-mesh*. O método da correlação cruzada da série temporal de fração de vazio foi utilizado por ambas as técnicas. Os resultados, mostrados na Figura 59 e na Figura 60, foram gerados da mesma forma que na análise anterior. De maneira geral, os resultados obtidos ficam dentro da faixa de até 10% de diferença. Observa-se uma diferença média de 0,209 m/s, ou, 7,46% nos dados, com valores que podem variar de 0% até 30%, também na faixa de transição entre os padrões de escoamento golfadas e anular. As diferenças encontradas entre as técnicas foram consideradas significativas; portanto foi realizada uma análise mais detalhada das diferenças obtidas.

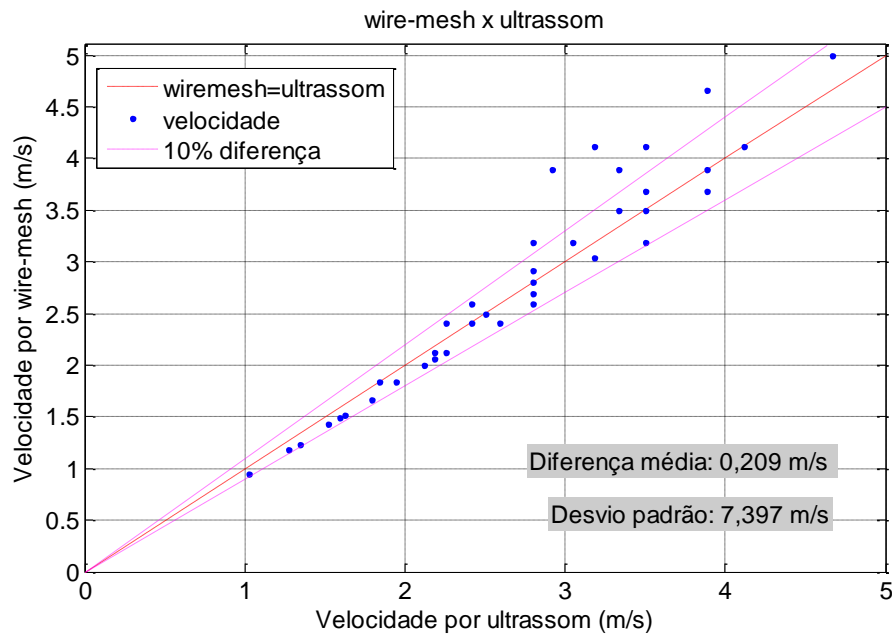


Figura 59- Gráfico da velocidade obtida pela técnica ultrassônica em relação a velocidade obtida pelo sensor *wire-mesh*.

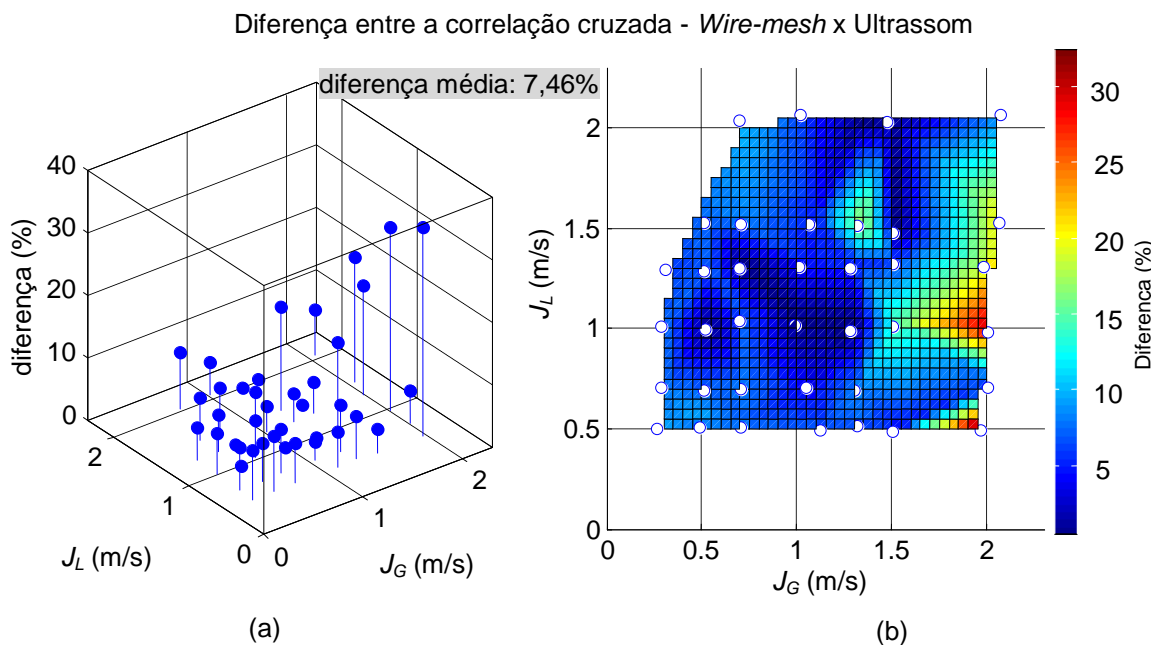


Figura 60 - Diferença na velocidade da bolha obtida pelas técnicas de ultrassom e *wire-mesh*. a) Diferença percentual em relação à J_L e J_G . (b) Superfície de diferenças.

O escoamento escolhido para análise foi o de parâmetros $J_L = 1,0$ e $J_G = 2,0$ devido à diferença de quase 30% apresentada. A Figura 61 mostra as séries temporais de fração de vazio obtidas pelos sensores *wire-mesh* e ultrassom, utilizadas para o cálculo das velocidades. Nota-se uma similaridade muito grande entre as curvas, o que indica não haver problemas na aquisição dos sinais. Portanto, partiu-se para um estudo da correlação cruzada utilizada para obter a velocidade.

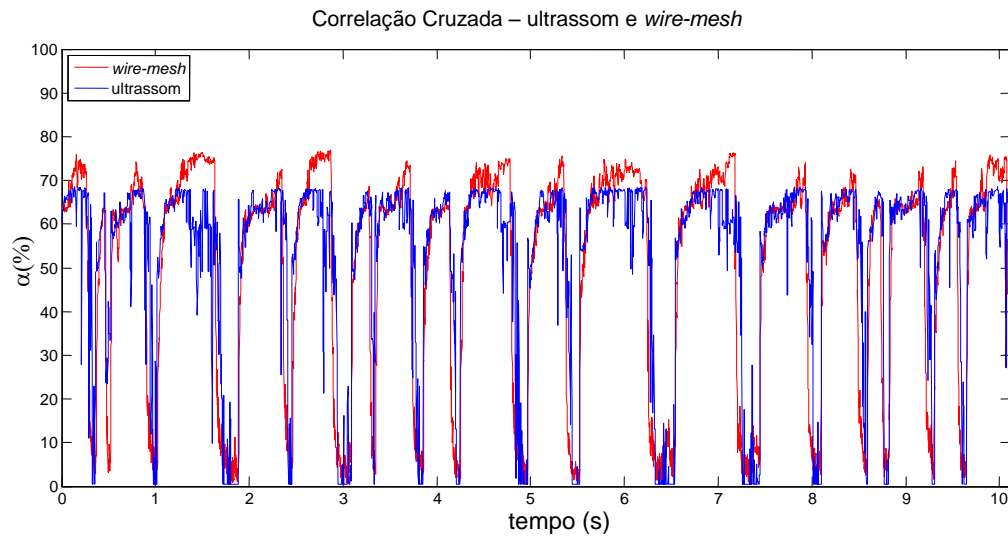


Figura 61 - Séries temporais de fração de vazio geradas pelas técnicas *wire-mesh* e ultrassom para um escoamento de $J_L=1,0$ e $J_G=2,0$.

A Figura 62 mostra os gráficos do processo de obtenção da velocidade da bolha pela técnica *wire-mesh*, em que se utiliza o máximo da correlação cruzada. A diferença de tempo, obtida pelo máximo da correlação (Figura 62d), é utilizada para sincronizar os sinais dos canais 1 e 2 (Figura 62abc). As curvas sincronizadas representam o mesmo experimento, porém, em diferentes escalas temporais para detalhar os sinais.

A partir dos gráficos apresentados, observam-se algumas falhas na técnica para o cálculo da velocidade. A Figura 62(c) mostra um atraso entre as bolhas de 0,005 segundos, o que compromete os resultados. A mesma falha ocorre na análise do sinal de ultrassom (Figura 63), no instante de tempo equivalente. Na Figura 63(c), observa-se que a bolha está adiantada de 0,007 s. A soma dos erros encontrados (0,011 segundos) justifica a diferença de quase 30% entre as velocidades calculadas.

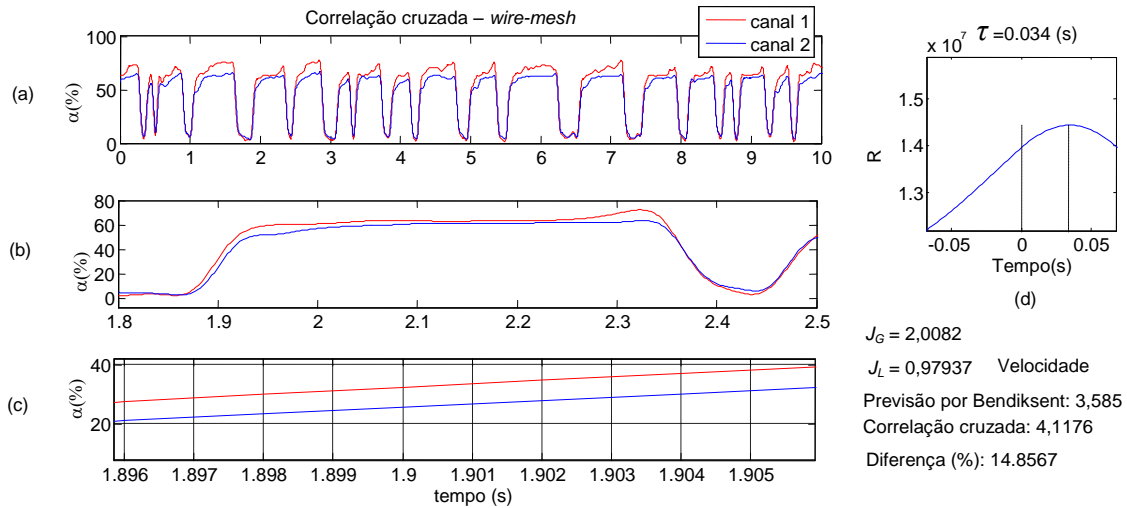


Figura 62 - Análise da correlação cruzada da série temporal de fração de vazio do sensor *wire-mesh*. (abc) Gráficos em diversos níveis de zoom. (b) Diferença de tempo calculada pelo máximo da correlação cruzada.

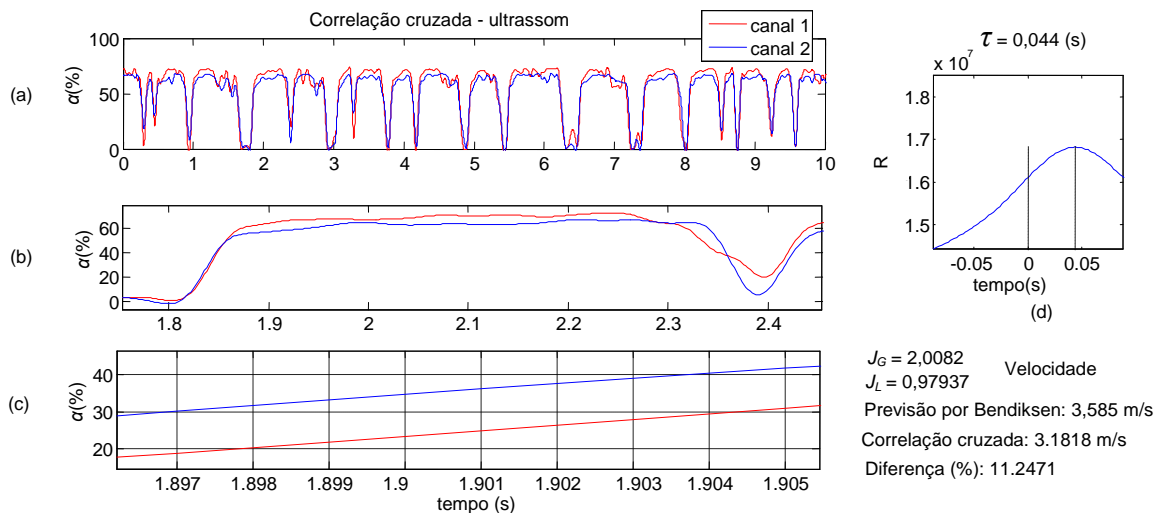


Figura 63 - Análise da correlação cruzada da série temporal de fração de vazio do sensor ultrassônico. (abc) Gráficos em diversos níveis de zoom. (b) Diferença de tempo calculada pelo máximo da correlação cruzada.

A correlação cruzada de toda a série temporal prejudica a sincronia do nariz de algumas bolhas em favor do resultado como um todo; dessa forma, espera-se que a técnica forneça a velocidade média das bolhas. Porém, no experimento estudado, a falha foi observada na maioria das bolhas, o que comprometeu também o resultado médio.

Uma das possíveis explicações para este problema está no princípio da correlação cruzada. A técnica procura encontrar a melhor sincronia entre duas curvas distintas, com base em somas e multiplicações das amplitudes. Assim, as maiores amplitudes possuem maior peso no cálculo. As séries temporais adquiridas pelo sensor *wire-mesh*, analisadas anteriormente, têm como característica picos de fração de vazio no final da bolha alongada (Figura 62(a)), o que poderia comprometer o cálculo da velocidade pelo nariz.

Outra explicação seria a variação do comprimento da cauda, observada visualmente nos experimentos realizados e nos sinais adquiridos. A Figura 62(b) e a Figura 63(b) ilustram diferentes caudas para a mesma bolha. Essa diferença entre as caudas também pode gerar erros na sincronia do nariz da bolha.

A solução ideal para os problemas encontrados seria o tratamento individual de cada bolha, cuja velocidade seria calculada somente pela identificação do nariz. Alguns trabalhos nesse sentido já foram iniciados, porém, devido a dificuldades encontradas na identificação da bolha em alguns casos, não foram incluídos nesta dissertação.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de modelos encontrados na literatura possibilita a comparação dos testes realizados na planta experimental. Desta forma, os resultados obtidos nos experimentos realizados se tornam mais confiáveis.

As técnicas estatísticas de densidade espectral de potência e densidade de probabilidade se mostraram promissoras para caracterização do padrão de escoamento.

As técnicas de ultrassom, *wire-mesh* e filmagem de alta velocidade permitem uma análise detalhada do escoamento. Além disso, o uso combinado das técnicas possibilita comparações e validações entre os resultados obtidos. Essa metodologia proporcionou o reconhecimento de pontos falhos na visualização do escoamento utilizando a técnica ultrassônica, e também no cálculo da velocidade da bolha pela correlação cruzada das séries temporais de fração de vazio. Sugestões de pesquisa para melhoria dos problemas encontrados estão na seção de trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho verificou a aplicação das técnicas de ultrassom, *wire-mesh* e filmagem rápida para análise de escoamentos bifásicos no padrão em golfadas. O uso do ultrassom possui características desejáveis à indústria como a sua possibilidade de uso em tempo real e não-intrusivo para monitoração de processos. O sensor *wire-mesh* possibilita uma análise detalhada do escoamento, por realizar uma tomografia intrusiva em todas as dimensões. A filmagem de alta velocidade possibilita uma comparação visual dos experimentos. Além das técnicas experimentais, foram utilizados modelos mecânicos encontrados na literatura para comparação de resultados.

A planta experimental montada no LACIT foi utilizada para geração de escoamentos bifásicos. Sensores e atuadores, controlando variáveis como pressão e vazão, permitiram alterar parâmetros do escoamento de forma controlada. Mapas de fluxo foram utilizados para elaborar a grade de testes dos experimentos no padrão em golfadas.

Para a geração e aquisição de sinais de ultrassom, foi utilizada uma sonda desenvolvida na UTFPR. Este sistema, especificado para a obtenção e o tratamento de sinais, forneceu informações para a realização das análises desejadas. Dentre as técnicas ultrassônicas utilizadas para analisar escoamentos, optou-se por trabalhar com o modo pulso-eco, com o objetivo de medir o filme de líquido e desta forma obter uma série temporal das bolhas alongadas e assim inferir a fração de vazio.

Um sensor *wire-mesh* de 8x8 fios foi empregado para realizar a tomografia do escoamento. Os dados adquiridos também possibilitaram a obtenção de uma série temporal de bolhas alongadas e a medição da fração de vazio das séries temporais.

As imagens adquiridas pela câmera de alta velocidade foram processadas a fim de se obter uma série temporal de bolhas alongadas, da mesma forma que as técnicas de ultrassom e *wire-mesh*.

Ambos *wire-mesh* e ultrassom foram instalados em pares, para possibilitar o cálculo da velocidade da bolha pelo método da correlação cruzada.

A técnica ultrassônica de pulso-eco mostrou-se satisfatória para visualização do padrão em golfadas, tendo-se obtido resultados similares as imagens adquiridas pela câmera de alta velocidade e a tomografia lateral feita pelo sensor *wire-mesh*. No entanto, por meio da comparação entre as técnicas, foram observadas limitações para detecção de pequenas bolhas

dispersas, áreas após a reflexão do sinal na interface líquido-gás e áreas fora do plano central em que foi posicionado o transdutor de ultrassom. Essas limitações poderiam ser solucionadas com o uso de mais sensores, para melhorar a resolução espacial, e a aplicação do modo transmissão-recepção para detectar pequenas bolhas dispersas.

A fração de vazio média obtida por ultrassom foi comparada ao valor obtido pela técnica sensor *wire-mesh*. A diferença média observada foi de 8,9%, com uma variação de aproximadamente 0% até pouco mais que 20%. O resultado foi considerado bom, visto o grande potencial de melhoria na técnica.

Outra análise da fração de vazio foi à comparação dos resultados obtidos com valores calculados por modelos mecânicos encontrados na literatura. Os resultados, apesar das diferenças encontradas, se mostraram compatíveis.

O escoamento em golfadas foi caracterizado por meio de análises estatísticas das séries temporais de fração de vazio, como a função densidade de probabilidade e a densidade espectral de potência. No caso da *PDF*, foram observadas mudanças na distribuição da fração de vazio, conforme a variação da velocidade superficial do líquido ou do gás, suficientes para elaborar padrões e detectar a evolução do escoamento. A mesma idéia pode ser aplicada aos resultados obtidos pela *PSD*, no caso, a variação da frequência de passagem das células unitárias.

Foi realizado um estudo da velocidade da bolha alongada obtida por método ultrassônico e pelo sensor *wire-mesh*, calculada pelo método da correlação cruzada de sinais de fração de vazio. A velocidade da bolha em função da variação de J_G e J_L foi comparada a um modelo mecânico da literatura. Os resultados mostraram diferenças médias de 5,88%, com grande concordância em baixas velocidades da mistura e desvios de até 21% para altas velocidades da mistura.

A mesma análise foi aplicada a um segundo estudo, em que se comparou a velocidade obtida por ultrassom à velocidade obtida pelo sensor *wire-mesh*, também pela correlação cruzada dos sinais de fração de vazio. A diferença média obtida foi de 7,46%, porém, com picos da ordem de até 30%. As situações em que foram observadas as maiores diferenças foram analisadas, e verificaram-se algumas limitações na técnica de correlação cruzada devido a variações na série temporal de fração de vazio. Uma solução para o problema encontrado seria o cálculo individual da velocidade de cada bolha considerando somente o nariz da bolha.

Por fim, os resultados obtidos mostram que o uso combinado dos sensores possibilita o melhor entendimento tanto do escoamento bifásico em si, quanto das próprias técnicas

empregadas. Acredita-se que a melhoria das técnicas desenvolvidas e uma possível solução para o monitoramento de escoamentos bifásicos esta no uso conjunto de sensores.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos nesta dissertação, sugerem-se como possíveis trabalhos futuros:

- a) Obter a velocidade da bolha de forma individual, somente a partir do nariz da bolha;
- b) Para o cálculo da fração de vazio por ultrassom, levar em consideração a área transversal ocupada pelo gás ao invés de utilizar apenas a faixa central do tubo.
- c) Utilizar outras técnicas de ultrassom como o modo de transmissão-recepção e o efeito Doppler para detecção de bolhas dispersas e detectar os pontos cegos da técnica de pulso-eco;
- d) Aumentar o tempo de aquisição de sinais;
- e) Aplicar o cálculo da velocidade no sistema de aquisição e processamento da UTFPR para verificação da velocidade das bolhas em tempo real;
- f) Testar as análises realizadas em um escoamento em golfadas vertical;
- g) Testar as análises em misturas óleo/água/ar;
- h) Combinação de resultados de outras técnicas como o sensor capacitivo ou resistivo.

REFERÊNCIAS

- AZZOPARDI, B. J. **Gás-Liquid Flows**. New York: Beggel House Inc, 2006.
- BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. **Multiphase Flow**, v. 10, n. 4, p. 467-483, 1984.
- CARVALHO, R. D. M.; VENTURINI, O. J.; TANAHASHI, E. I.; NEVES JR., F.; FRANÇA, F. A. Application of the ultrasonic technique and high-speed filming for the study of the structure of air–water bubbly flows. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 33, n. 7, p. 1065-1086, 2009.
- CHANG, J. S.; ICHIKAWA, Y.; IRONS, G. A. Flow regime characterization and liquid film thickness measurement in horizontal gas-liquid two-phase flow by an ultrasonic method. **AIAA/ASME Joint Plasma Thermophysics HTC**, v. 2, p. 12-17, 1982.
- CROWE, C. T. **Multiphase flow handbook** (C. T. Crowe, Ed.) **International Journal of Multiphase Flow**. 1st ed., v. 9, Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- 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.
- DA SILVA, MARCO JOSÉ. Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging. 2008. 170f. **Tese de Doutorado**, Technische Universitat Dresden, 2008.
- DACIUK, R. J. Estudo de parâmetros ultra-sônicos para caracterização de líquidos. **Dissertação de Mestrado**. 2008. 90f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008.
- DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. A model for gas–liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 14, p. 337-347, 1975.
- FACCINI, J. L. H. Estudo de Escoamentos Bifásicos Usando Técnicas Ultra-Sônicas. **Tese de Doutorado**. 2008. 177f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- GRANGEIRO, F. Caracterização do escoamento intermitente horizontal água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida. **Dissertação de Mestrado**. 2010. 105f. Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- GREGORY, G. A.; SCOTT, D. S. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow. **AIChE Journal**, v. 15, n. 6, p. 933-935, 1969.
- GUIMARÃES, I. S. Relação bifásica gás/líquido e seus efeitos nos medidores de vazão tipo turbina. **Anuário da Produção de Iniciação Científica Discente**, v. XII, n. 13, p. 299-311, 2009.

- HARVEL, G. D.; CHANG, J. S. Eletrostatic Multiphase Flow Measurement Techniques. In: J. S. Chang; J. K. Arnold; J. M. Crowley (Eds.); **Handbook Of Electrostatic Processes**. Marcel Dekker, 1995.
- LUBBERS, J.; GRAAFF, R. A simple and accurate formula for the sound velocity in water. **Ultrasound in Medicine and Biology**, v. 24, n. 7, p. 1065-1068, 1998.
- MA, Y. Application of electrical resistance tomography system to monitor gas/liquid two-phase flow in a horizontal pipe. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 12, n. 4, p. 259-265, 2001.
- MASSIGNAN, J. P. D. Métodos de Análise de Sinais de Ultrassom para Caracterização de Escoamentos bifásicos. **Dissertação de Mestrado**. 2009. 93f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2009.
- Matlab R2007b, version 7.5.342. Mathworks, 2007.
- MATTAR, L.; GREGORY, G. 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. doi: 10.2118/74-01-07, 1974.
- Microsoft Visual Studio Team System, version 9.0.21022. Microsoft Corporation, 2008.
- MURAKAWA, H.; KIKURA, H.; ARITOMI, M. Application of ultrasonic doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 29, n. 7, p. 843-850, 2005.
- OLYMPUS, Panametrics Ultrasound Transducers. Disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/en/panametrics-ndt-ultrasonic/>>. Acessado em: 14 de abril de 2010.
- ORELL, A. Experimental validation of a simple model for gas-liquid slug flow in horizontal pipes. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 5, p. 1371-1381, 2005.
- PAN, T.-T.; CHIANG, H. K. Ultrasound low-velocity flow estimations using cross-correlation and decorrelation: a thread phantom study. **Medical engineering & physics**, v. 29, n. 5, p. 602-14, 2007.
- PETERSON, M. A method for increased accuracy of the measurement of relative phase velocity. **Ultrasonics**, v. 35, n. 1, p. 17-29, 1997.
- PRASSER, H. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 9, n. 2, p. 111-119, 1998.
- REIS, E. DOS; GOLDSTEIN JR., L. Characterization of slug flows in horizontal piping by signal analysis from a capacitive probe. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 21, n. 3, p. 347-355, 2010.
- RODRIGUES, H. Simulação do escoamento bifásico líquido-gás intermitente em golfadas utilizando o modelo de seguimento dinâmico de pistões. **Dissertação de Mestrado**. 2009. 180f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2009.

- ROUHANI, S. Z.; SOHAL, M. S. Two-phase flow patterns: A review of research results. **Progress in Nuclear Energy**, v. 11, n. 3, p. 219-259, 1983.
- SANTOS, G. R. Desenvolvimento de Técnicas de Ultra-som para Medida de Espessura de Filme de Líquido em Escoamentos Gás-Líquido e Líquido-Líquido. **Dissertação de Mestrado**. 2006. 204f. Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- SILVA, C. B. D. C. E.; FILHO, M. J. B.; PINHEIRO, J. A. Medição de vazão e propriedades em escoamento multifásico: solução econômica para diferentes atividades industriais. **Boletim técnico da Petrobras**, v. 43, n. 1, p. 45-61, 2000.
- STANISLAV, J. F.; KOKAL, S.; NICHOLSON, M. K. Intermittent gas-liquid flow in upward inclined pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 12, n. 3, p. 325-335, 1986.
- STOICA, P. **Introduction to Spectral Analysis Education**. p.15. Prentice-Hall, 1997.
- SUPARDAN, M.; 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, n. 2-3, p. 125-133, 2007.
- TAITEL, Y. Slug flow modeling for downward inclined pipe flow: theoretical considerations. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 26, n. 5, p. 833-844, 2000.
- TAITEL, Y; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, v. 22, n. 1, p. 47-55. American Institute of Chemical Engineers, 1976.
- TAITEL, YEHUDA; BARNEA, D. Two-Phase Slug Flow. In: J. P. Hartnett; J. Thomas F. Irvine (Eds.); **Advances in Heat Transfer**. v. 20, p.83-132, 1990.
- TANAHASHI, E. I. Desenvolvimento da Técnica de Ultrassom para Medição da Fração de Vazio e Detecção do Padrão de Escoamentos Água-Ar. **Dissertação de Mestrado**. 2010. 70f. Universidade Federal de Itajubá, 2010.
- VATANAKUL, M.; ZHENG, YING; COUTURIER, M. Application of Ultrasonic Technique in Multiphase Flows. **Ultrasonics**, p. 5681-5691, 2004.
- WADA, S.; KIKURA, H.; ARITOMI, M. Pattern recognition and signal processing of ultrasonic echo signal on two-phase flow. **Flow Measurement and In**, v. strumentat, p. 207-224, 2006.
- WARBITO, M. Cross-sectional distributions of gas and solid holdups in slurry bubble column investigated by ultrasonic computed tomography. **Chemical Engineering Science**, v. 54, n. 21, p. 4711-4728, 1999.
- ZHENG, Y; ZHANG, Q. Simultaneous measurement of gas and solid holdups in multiphase systems using ultrasonic technique. **Chemical Engineering Science**, v. 59, n. 17, p. 3505-3514, 2004.

ANEXO A

Seguem abaixo os trabalhos publicados relacionados com essa dissertação.

A.1 TRABALHOS RELACIONADOS COM A DISSERTAÇÃO

OFUCHI, C.Y., ARRUDA, L.V.R., NEVES. F.N., MORALES, R.E.M. Caracterização de escoamentos bifásicos horizontais em golfadas utilizando ultrassom. 2º Encontre Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos. São Carlos, 2010.

OFUCHI, C.Y., DA SILVA, M.J., NEVES. F.N., ARRUDA, L.V.R., AMARAL, C. E.F., MORALES, R.E.M. Aplicação das técnicas wire-mesh e ultrassom na medição de escoamento bifásico em golfadas. Rio Oil & Gás Expo and Conference 2010. Rio de Janeiro, 2010.

OFUCHI, C.Y., SIECZOWSKI, W.C., NEVES. F.N., ARRUDA, L.V.R., MORALES, R.E.M., AMARAL, C. E.F., DA SILVA, M.J. Wire-mesh and ultrasound techniques applied for the characterization of gás-líquid slug flow. 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Uberlândia, 2010.

OFUCHI, C.Y., R.E.M. Morales, L.V.R. Arruda, F. Neves Jr, L. Dorini, C.E.F. do Amaral, M.J. da Silva. Wire-mesh Sensor, Ultrasound and High-Speed Videometry Applied for the Characterization of Horizontal Gas-Liquid Slug Flow. The 7th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, Tianjin China, 2011.