UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA E

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

COMISSÃO DE PROGRAMA MULTIDISCIPLINAR DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Caracterização do escoamento intermitente horizontal água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida

Autor: Fernando Antonio Grangeiro Filho

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart

Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Dias M. de Carvalho

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Fernando Antonio Grangeiro Filho aprovada pela comissão julgadora em 24 / 05 / 2010

Orientador

05/10

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA E

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

COMISSÃO DE PROGRAMA MULTIDISCIPLINAR DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Caracterização do escoamento intermitente horizontal água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida

Autor: Fernando Antonio Grangeiro Filho
Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart
Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo
Área de Concentração: Explotação / Produção de óleo e gás

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à Comissão de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2010
SP – Brasil.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA

BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Grangeiro Filho, Fernando Antonio

G765c Caracterização do escoamento intermitente horizontal água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida / Fernando Antonio Grangeiro Filho. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientadores: Antonio Carlos Bannwart, Ricardo Dias Martins de Carvalho.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Escoamento bifásico. 2. Ultrassom. 3. Filmagem. 4. Bolhas. I. Bannwart, Antonio Carlos. II. Carvalho, Ricardo Dias Martins de. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências. IV. Título.

Título em Inglês: Characterization of the horizontal intermittent air-water flow using ultrasound technique aided by high-speed filming

Palavras-chave em Inglês: Two phase flow, Ultrasound, Shooting, Bubbles

Área de concentração: Explotação

Titulação: Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

Banca examinadora: Osvair Vidal Trevisan, Valdir Estevam

Data da defesa: 24/05/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA E

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

COMISSÃO DE PROGRAMA MULTIDISCIPLINAR DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Caracterização do escoamento intermitente horizontal água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida

Autor: Fernando Antonio Grangeiro Filho
Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart
Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart, Presidente
DEP/FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Osvair Vidal Trevisan
DEP/FEM/UNICAMP

Dr. Valdir Estevam
Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobras

Campinas, 24 de maio de 2010

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus pais, Fernando e Rita, à minha noiva, Rayana, e ao meu irmão, Eduardo, que sempre estiveram presentes.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha gratidão:

Primeiramente a Deus, por estar sempre presente na minha vida, iluminando meu caminho e me confortando nos momentos difíceis.

Aos meus pais pelo incentivo em todos os momentos da minha vida e à minha família pelo apoio. À minha noiva por compreender minha ausência.

Ao meu orientador, Antonio Carlos Bannwart, e ao meu co-orientador, Ricardo Dias Martins de Carvalho, pelo acompanhamento e discussões durante o trabalho.

Ao professor Fernando de Almeida França com quem iniciei os trabalhos no curso de pós-graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo na Unicamp.

Ao Enio Tanahashi, pelo auxílio e disposição durante a aquisição e tratamento dos dados.

Ao Fernando Perin, pelo auxílio na programação dos algoritmos usado para analisar os dados.

Ao Eduardo Gaspari com quem muito discuti sobre o experimento e resultados.

Ao Ivan Noville, com quem compartilhei o aparato experimental.

À pesquisadora Vanessa Cristina Bizotto, pelo auxílio no tratamento das imagens e ao aluno Ricardo Calliari pela ajuda prestada na elaboração do programa de aquisição de dados.

Aos técnicos do Labpetro, Henrique, Leandro e Mateus, coordenados por Natache Sassim e ao Alcimar do Laboratório do Departamento de Energia, que desempenharam um excelente trabalho na montagem do aparato experimental.

Às amizades que conquistei e tornaram essa fase mais descontraída: Avansi, Bertolini, Beto, Camarão, Carlos, Carol, César, Cynthia, David, Denis, Eduardo, Enio, Galeno, Gaspari, Gaúcho, Heraldo, Ivan, Márcio, Marcus, Mauro, Odair, Ortelan, Parker, Paulinho, Perin, Philipe, Pocotó, Valdivia e Wânia.

Aos colaboradores do DEP, agradeço pelo apoio: Alice, Délcio, Fátima, Giselle, Michelle e Sônia.

Agradeço à CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de estudos e à PETROBRAS pelo apoio financeiro para a construção do circuito de testes e compra de equipamentos.

"Ou você se compromete com objetivo da vitória, ou não."
(Ayrton Senna)

Resumo

GRANGEIRO FILHO, Fernando Antonio, *Caracterização do escoamento intermitente horizontal água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010. 105 p. Dissertação de Mestrado.

O transporte de misturas complexas, como o escoamento gás-líquido, depende de vários parâmetros, incluindo o padrão de escoamento. O escoamento bifásico é bastante comum na indústria petrolífera. Em operações *off-shore*, líquido e gás escoam por longos trechos verticais, horizontais e inclinados através de linhas de escoamento e *risers* antes de serem separados na superfície. No presente trabalho, um aparato experimental, com uma tubulação de 54 mm de diâmetro, foi montado para simular o escoamento horizontal intermitente, água-ar. As características do escoamento foram investigadas usando duas estações de sensores ultrassônicos, separados por uma distância conhecida ao longo da tubulação, e filmagens realizadas com uma câmera ultrarrápida (1000 quadros por segundo). Cada estação ultrassônica consistia de um transdutor pulso-eco (posicionado a 0^o) e três sensores receptores posicionados em diferentes ângulos ao longo da circunferência da tubulação (45^o, 135^o, 180^o). Os parâmetros obtidos foram: velocidade da bolha alongada, comprimentos da bolha alongada, do pistão de líquido e da célula unitária, e frequência de passagem da célula unitária. Um algoritmo foi elaborado a fim de identificar qual estrutura (bolha alongada ou pistão de líquido) escoava na frente do sensor. Através desse programa foi possível calcular a espessura do filme de líquido assim como as vazões volumétricas das fases. A técnica de ultrassom se mostrou eficiente e apresentou um custo relativamente baixo para investigar as características do escoamento pistonado. A presença de muitas bolhas na cauda da bolha alongada pode causar erros nas medições que pôde ser observado através da filmagem, porém, dados provenientes de outros sensores em conjunto com os dados do sensor posicionado na parte inferior da tubulação podem auxiliar a detectar a transição da cauda da bolha para o começo do pistão de líquido.

Palavras Chave

Escoamento bifásico, Ultrassom, Filmagem, Bolhas.

Abstract

GRANGEIRO FILHO, Fernando Antonio, *Characterization of the horizontal intermittent air-water flow using ultrasound technique aided by high-speed filming*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010. 105 p. Dissertação de Mestrado.

Transport processes in complex mixtures such as gas-liquid flows depend on various parameters, including the flow pattern. Two-phase flow is very common in petroleum industry. During off-shore production, liquid and gas phases travel long distances through flow-lines and risers before being separated. In the present work, experimental data are presented on the axial flow topology of horizontal, air-water slug flows in a 54-mm inner diameter acrylic pipe. The flow structure was investigated using two stations of an ultrasonic apparatus positioned at a known distance from each other along the flow direction and high-speed motion pictures (1000 fps) of the flow. Each ultrasonic station consisted of one emitter transducer (positioned at 0^o) and three receivers at different angles (45º, 135º and 180º) along the pipe circumference. The parameters obtained were: elongated bubble velocity; elongated bubble, liquid slug and unit cell lengths, and unit cell frequency and flow rates of liquid and gas phases. An algorithm was made to identify which structure (elongated bubble or liquid slug) was passing in front of the transducer. This program made it possible to calculate the volumetric flow rates. Results shown by both techniques agreed against each other, however, more tests at other flow rates should be held to which for correlations could be made. The ultrasound technique showed to be an efficient tool at relatively low cost to investigate the hydrodynamic parameters of the slug flow. The presence of a lot of bubbles in the tail of the elongated bubble can cause errors in measurements, which was detected by the high speed filming technique, however, data from other transducers can be analyzed together with the data from the transducer installed at the bottom part of the pipe can help to detect the transition from elongated bubble to liquid slug.

Key Words

Two phase flow, Ultrasound, Shooting, Bubbles.

Sumário

1. Introdução 1

1.1 Medições em escoamento multifásico 2

1.2 Objetivos 4

2 Revisão Bibliográfica 6

2.1 Escoamento multifásico 6

2.1.1 O escoamento intermitente 8

2.2 Métodos existentes para caracterizar o escoamento multifásico 12

2.3 O ultrassom como instrumento de medição 16

2.4 Síntese da revisão bibliográfica 20

3 Fundamentação teórica 22

3.1 Acústica 22

3.2 A natureza do ultrassom 23

3.3 Conversão de modo 24

3.4 Impedância acústica 25

3.5 Transdutor 27

3.5.1 Campo acústico 27

3.5.2 Diâmetro do feixe ultrassônico (BD) 29

3.5.3 Zona focal (F_z) 29

3.5.4 Características dos transdutores 29

3.5.5 Tipos de transdutores 29

3.6 Ensaios com ultrassom 31
3.6.1 Técnicas de ensaio 32
3.7 O ultrassom como instrumentação dedicada 33
3.7.1 A aplicação do ultrassom no escoamento gás-líquido 34
3.8 A técnica de filmagem ultrarrápida 35
4 Procedimento experimental 36
4.1 Descrição do aparato experimental 36
4.1.1 Sistema de injeção de líquido 37
4.1.2 Sistema de injeção de ar comprimido 40
4.1.3 Sistema de aquisição de dados 42
4.1.4 Sistema de visualização e de ultrassom 43
4.2 Procedimento experimental 48
4.3 Tratamento dos dados de ultrassom 51
4.3.1 Velocidade da bolha alongada (v_t) 51
4.3.2 Comprimento da bolha alongada (l_f) 52
4.3.3 Comprimento do pistão de líquido (l_s) 53
4.3.4 Frequência de passagem da célula unitária (υ_u) 53
4.3.5 Detecção de estruturas a partir do sensor de 180^o 54
4.3.6 Detecção de estruturas a partir do sensor de 0^o 55
4.3.7 Área transversal ocupada pelo gás (A_G) 61
4.3.8 Volume das fases (V) 64
4.3.9 Vazão das fases (Q) 65
4.4 Tratamento das imagens 66
4.4.1 Velocidade da bolha alongada (v_t) 66

4.4.2 Comprimento da bolha alongada (l_f) 68
4.4.3 Velocidade do pistão de líquido (v_S) 68
4.4.4 Comprimento do pistão de líquido (l_s) 68
4.4.5 Frequência de passagem da célula unitária (υ_u) 69
4.5 Critério de *Student* 69
5 Resultados e discussão 70
5.1 Escolha do tipo de iluminação 70
5.2 Teste monofásico 71
5.3 Análise da energia dos transdutores 71
5.4 Escolha do sensor para detecção de fases 73
5.5 Velocidade do pistão de líquido (v_s) 74
5.6 Espessura do filme de líquido (δ_{ff}) 74
5.7 Frequência de célula unitária (υ_u) 76
5.8 Condição operacional 1 77
5.9 Condição operacional 2 81
5.10 Condição operacional 3 84
5.11 Vazões de líquido e gás 89
6 Conclusões e Sugestões 92
7 Referências bibliográficas 95
ANEXO A – VELOCIDADE DA ONDA SONORA EM DIVERSOS MATERIAIS 99
8 ANEXO B – VALORES DA VARIÁVEL $t_{V,P}$ PARA SEREM USADOS NO CRITÉRIO DE *STUDENT* 100
APÊNDICE A – ALGORITMO PARA CALCULAR O TEMPO DE TRÂNSITO DA ONDA 101

APÊNDICE B - ALGORITMO PARA DETECÇÃO DAS FASES E CÁLCULO DAS VAZÕES. 102

Índice de Ilustrações

Figura 1.1. Fluxo bifásico no interior de uma tubulação. 2

Figura 2.1. Padrões de escoamento em tubulação horizontal. 7

Figura 2.2. Mapa de padrões de escoamento de Taitel e Barnea (1990). 8

Figura 2.3. Variáveis hidrodinâmicas envolvidas no escoamento intermitente..... 11

Figura 3.1. Espectro de frequências do som. 23

Figura 3.2. Conversão de modo. 25

Figura 3.3. Transmissão e reflexão na fronteira..... 26

Figura 3.4. (a) Representação esquemática de campo próximo e campo distante **(b)** Perfil de intensidade do ultrassom. 28

Figura 3.5. Parâmetros do feixe ultrassônico 28

Figura 3.6. Tipos de transdutores. 30

Figura 3.7. Definições de uma medição não invasiva e não intrusiva. 34

Figura 4.1. Desenho esquemático do aparato experimental..... 37

Figura 4.2. Sistema de injeção de líquido. 38

Figura 4.3. Foto dos tanques, bomba e motor do sistema de injeção de líquido. 38

Figura 4.4. Esquema do medidor de vazão de ar. 40

Figura 4.5. Estação de medição de ar..... 41

Figura 4.6. Tubo por onde a injeção de ar é realizada no circuito. 42

Figura 4.7. Módulo Compact DAQ, responsável pela aquisição de dados..... 42

Figura 4.8. Interface do programa *Labview Express*. 43

Figura 4.9. Sistema de visualização. 44

Figura 4.10. Disco de PVC. 45

Figura 4.11. Peças utilizadas para fixar os transdutores. 45

Figura 4.12. Transdutor montado no suporte. 46

Figura 4.13. Posicionamento das estações de transdutores. 46

Figura 4.14. Posicionamento dos transdutores. 47

Figura 4.15. Interface para aquisição dos sinais de ultrassom. 47

Figura 4.16. Condições operacionais testadas. 48

Figura 4.17. Método utilizado para aquisição dos sinais. 50

Figura 4.18. Instantes em que uma bolha alongada passa pela primeira e pela segunda estação. 52

Figura 4.19. Tempos utilizados para calcular o comprimento da bolha alongada. 53

Figura 4.20. Tempos utilizados para calcular a frequência de passagem de bolhas. 54

Figura 4.21. Fluxograma para tratamento do sinal de 180^{o}. 55

Figura 4.22. Sinal original. 56

Figura 4.23. Primeiro passo do processo de filtragem. 56

Figura 4.24. Segundo passo do processo de filtragem. 57

Figura 4.25. Terceiro passo do processo de filtragem. 58

Figura 4.26. Último passo do processo de filtragem. 58

Figura 4.27. Sincronismo entre as técnicas. 59

Figura 4.28. Fluxograma para tratamento do sinal de trânsito. 60

Figura 4.29. Cálculo da área transversal do gás com δ_{ff} < r. 61

Figura 4.30. Cálculo da área transversal do gás com δff > r. 63

Figura 4.31. Modelo usado para calcular os volumes das fases. 65

Figura 4.32. (a) Após a bolha aparecer na imagem (b) Antes que a bolha deixe a imagem. 67

Figura 5.1. Imagem realizada com a lâmpada fria (a) e com o *flash* (b) como iluminação. 70

Figura 5.2. Sinal do sensor de 180º no escoamento monofásico. 71

Figura 5.3. Detecção de fases através do (a) sensor a 0º e (b) sensor a 180º. 73

Figura 5.4. Bolhas escoando no pistão de líquido que dificultam a chegada da onda no sensor de 180º. 74

Figura 5.5. Frequência de célula unitária. 76

Figura 5.6. Velocidade translacional (v_t) para a amostra #1. 77

Figura 5.7. Comprimentos de bolha alongada (l_f) e pistão de líquido (l_s) para a amostra #1. 78

Figura 5.8. Comprimento do pistão de líquido (l_s) medido através da estação #1 e das imagens adquiridas (amostra #4). 79

Figura 5.9. Comprimento da célula unitária (l_u) da amostra #1. 80

Figura 5.10. Filtro realizado na amostra 2. 80

Figura 5.11. Velocidade da bolha alongada (v_t) obtida através da filmagem. 81

Figura 5.12. Comprimento da bolha alongada (l_f) nas duas estações para a amostra 2. 82

Figura 5.13. Comprimento da célula unitária (l_u) da amostra 2. 83

Figura 5.14. Filtro realizado na amostra #3. 84

Figura 5.15. Velocidade translacional da bolha alongada v_t. 85

Figura 5.16. Comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido medidos pela estação #2. 85

Figura 5.17. Tempo de trânsito do ultrassom na estação #2. 86

Figura 5.18. Comprimento da bolha alongada (l_f). 86

Figura 5.19. Bolha alongada com a cauda bastante aerada. 87

Figura 5.20. Comprimento do pistão de líquido (l_s). 87

Figura 5.21. Comprimento da célula unitária (l_u). 88

Figura 5.22. Filtro aplicado à amostra #1 da condição 3. 89

Figura 5.23. Q_l medida no instrumento e calculada pelo modelo. 90

Figura 5.24. Q_g medida no instrumento e calculada pelo modelo..... 90

Figura 5.25. Energia dos sensores posicionados a 45º, 135º e 180º para a condição operacional 1. 91

Índice de Tabelas

Tabela 2-1. Resumo das técnicas apresentadas. 15

Tabela 2-2. Aplicação da técnica de ultrassom. 16

Tabela 3-1. Características dos transdutores. 31

Tabela 4-1. Características do circuito. 37

Tabela 4-2. Características da bomba, do motor e do inversor de frequência. 39

Tabela 4-3. Características da resistência. 39

Tabela 4-4. Características do medidor de vazão de líquido (Coriolis). 39

Tabela 4-5. Características do compressor de ar. 40

Tabela 4-6. Características do computador de vazão de ar. 41

Tabela 4-7. Parâmetros das condições operacionais. 49

Tabela 5-1. Análise qualitativa da energia dos transdutores. 72

Tabela 5-2. Espessura do filme de líquido (δ_{ff}) nas três condições operacionais. 75

Tabela 5-3. Velocidade média para todas as amostras. 77

Tabela 5-4. Comprimentos de bolha alongada (l_f) e pistão de líquido (l_s) obtidos por ambas as técnicas 78

Tabela 5-5. Comprimento da célula unitária (l_u). 79

Tabela 5-6. Média das velocidades da frente da bolha (v_t) para todas as condições. 81

Tabela 5-7. Comprimentos da bolha (l_f) e do pistão (l_s) obtidos por ambos os métodos. 82

Tabela 5-8. Valores médio de l_u. 83

Nomenclatura

Letras Latinas

A - Área [m^2]

c – Velocidade do som no material em teste [m/s]

D – Diâmetro [m]

f – Frequência de vibração do transdutor [Hz]

F – Distância focal [mm]

j – Velocidade superficial [m/s]

l – Comprimento [m]

N – Campo próximo [mm]

P – Pressão relativa [barg]

Pa – Permeabilidade [-]

Q – Vazão volumétrica [m^3/s]

R – Fator de reflexão [-]

T – Temperatura [^oC]

t – Tempo [s]

v – Velocidade [m/s]

V – Volume [m^3]

z – Impedância acústica [$kg/m^2/s$]

Z_B – Início da zona focal [mm]

Z_E – Fim da zona focal [mm]

Subscritos

c – cauda da bolha alongada

e – externo

f – bolha alongada

g – gás

i – interno

l – líquido

s – pistão de líquido

u – célula unitária

A - arco

I - interna da tubulação

Δ - triângulo

Letras Gregas

δ_{ff} – Espessura do filme de líquido [cm]

θ – ângulo [º]

ρ – massa específica [kg/m^3]

σ – desvio padrão [%]

υ – Frequência [1/s]

Siglas

ANP – Agência Nacional de Petróleo

LABPETRO – Laboratório Experimental de Petróleo

Capítulo 1

Introdução

O escoamento multifásico ocorre quando duas ou mais fases (líquido, sólido e/ou gás) escoam simultaneamente numa determinada geometria. O fato de o escoamento ser constituído por mais de uma fase torna-o bem mais complexo, pois a quantidade de equações matemáticas para expressar o fenômeno físico é bem maior.

O escoamento bifásico gás-líquido é comum em diversos setores industriais, dentre eles a indústria petrolífera, onde pode estar presente desde a coluna do poço em produção até a unidade separadora. A necessidade de se compreender como esse escoamento ocorre, vem fazendo evoluir o número de pesquisas desde os anos 50 (Shohan, 2006).

Em reservatórios naturais, geralmente o gás está associado ao óleo e ambos são produzidos simultaneamente. Antes de atingir a superfície, as fases escoam por longos trechos verticais, horizontais ou inclinados, e têm seus comportamentos alterados. A maneira como as fases estão distribuídas na seção transversal e ao longo da tubulação é chamada de padrão de escoamento, que por sua vez, influi no dimensionamento de linhas e equipamentos. A Figura 1.1 ilustra um padrão de escoamento bifásico que pode ocorrer no interior de uma tubulação.

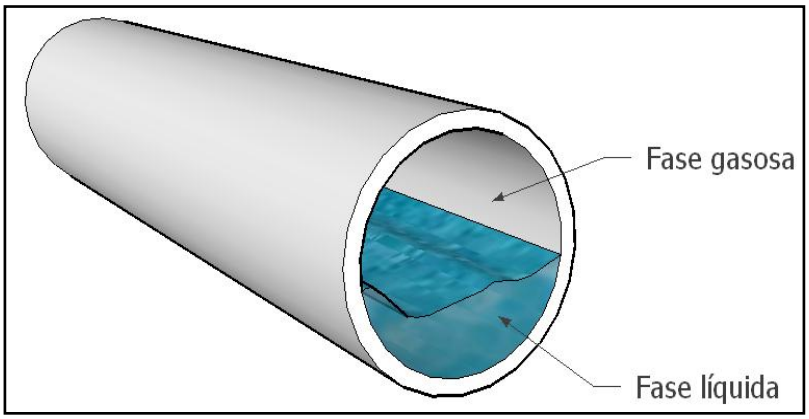


Figura 1.1. Fluxo bifásico no interior de uma tubulação.

1.1 Medições em escoamento multifásico

Fluidos produzidos em poços de petróleo dificilmente são puros. Geralmente, o fluido chega à superfície como uma mistura multifásica. É uma mistura de óleo e gás, porém, em várias situações ocorre a presença de água e sólidos, areia, hidratos e asfaltenos na mistura.

Tradicionalmente a vazão dos fluidos de um poço tem sido obtida separando-se as fases e medindo-se cada uma por meio de técnicas monofásicas convencionais. Utilizando esse método, caso haja um *manifold* responsável por escoar a produção de vários poços do leito submarino até a superfície e por algum motivo um dos poços deixe de produzir ou tenha sua vazão diminuída consideravelmente, como a produção só é medida depois do *manifold*, não é possível saber qual o poço que apresentou essa queda na produção.

Ao utilizar medidores multifásicos em cada poço é possível acompanhar a produção e caso haja uma queda de produção, será fácil identificar qual poço apresentou essa queda. Ainda, quando não é possível determinar a vazão de produção por poço através da linha de teste, a ANP poderá aprovar medição multifásica.

Devido a grande variação nas condições de um campo petrolífero, medidores multifásicos precisam estar aptos a operar em diversas condições (Falcone *et al.*, 2002):

• Vazões de óleo de 1000 a 35000 barris por dia com gás entre 100 e 12000 ft^3 por barril;

• A quantidade de água pode variar de 0 a 95%;

• Pressões variando com máximos em torno de 10.000 psia;

• Temperaturas de 65 a 150 ºC;

• Diâmetro da tubulação da cabeça do poço até o *manifold* pode variar de 2 a 8 polegadas;

• Linhas de produção com diâmetro de 8 a 36 polegadas;

• As condições do fluido (viscosidade, temperatura, etc.) podem variar durante a vida útil de um campo.

Na indústria petrolífera, é reconhecido que medidores multifásicos podem gerar vários benefícios em termos de organização da planta de produção, alocação da produção, teste de poço, monitoramento da produção, medições submarinas, gerenciamento de reservatório e custos. (Falcone *et al.*, 2002).

Os padrões de escoamento possuem um impacto significativo na resposta do instrumento pelas seguintes razões:

(a) Para determinados tipos de instrumentação, a estrutura do escoamento tem uma influência direta na precisão das medidas. Por exemplo, ao utilizar à técnica de ultrassom em um escoamento bifásico água-ar, a passagem de uma bolha de ar atenua consideravelmente o sinal da onda.

(b) O regime permanente não é atingido instantaneamente pelo escoamento.

(c) Para que um escoamento seja desenvolvido, às vezes são necessários centenas de diâmetros. O padrão anular pode ser citado como exemplo, onde são necessários longos comprimentos de tubulações para que haja um equilíbrio entre gotículas de ar que estão entrando em suspensão e gotículas que estão sendo depositadas no líquido.

A maneira de como o desenvolvimento do escoamento ocorre e as mudanças de padrões em uma tubulação, fazem com que a medição em sistemas multifásicos se torne complicada. Por isso, a escolha do tipo de instrumento a ser utilizada é essencial para a precisão das medições.

Atualmente existem várias técnicas para medições em escoamento multifásico; porém, algumas técnicas possuem aplicações muito específicas, como é o caso da velocimetria à laser, que mostra deficiência em medir a velocidade em meios onde existe uma grande quantidade de partículas em suspensão (Powell, 2008). Outras técnicas que podem ser citadas são: ressonância

magnética por imagem, velocimetria ultrassônica, tomografia por impedância elétrica e radiografia por raios-X e nêutrons.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo investigar as características do escoamento intermitente horizontal água-ar por meio das técnicas de ultrassom e filmagem ultrarrápida, utilizando para este fim um aparato experimental construído no LABPETRO da Universidade Estadual de Campinas.

As características medidas por ambas as técnicas a fim de calibrar a técnica de ultrassom são: velocidade de propagação da bolha alongada, comprimento da bolha alongada, do pistão de líquido e da célula unitária, e frequência de passagem da célula unitária, de modo que a filmagem possa calibrar a técnica de ultrassom. Os resultados produzidos por ambas as técnicas são correlacionados entre si a fim de identificar as vantagens e desvantagens de cada uma.

Um algoritmo foi desenvolvido para identificar qual estrutura está escoando em frente ao sensor, pistão de líquido ou bolha alongada a partir dos dados de ultrassom. Através desse programa foi possível estimar as vazões de líquido e gás, e mostrar que a técnica pode ser aplicada em campo fornecendo dados sobre as estruturas do escoamento em tempo real ou quase real, mas para isso, o algoritmo precisa ser melhorado e equipamentos com processamento mais rápidos e com maior capacidade de armazenamento serão necessários.

Os capítulos seguintes estão organizados da seguinte forma:

- Capítulo 2: revisão bibliográfica de trabalhos que mostraram a modelagem do escoamento intermitente, assim como trabalhos que utilizaram técnicas de medição multifásica para medir parâmetros do escoamento multifásico;
- Capítulo 3: fundamentação teórica de conceitos em relação à técnica de ultrassom, que irão auxiliar na compreensão de como a técnica foi utilizada;
- Capítulo 4: nessa etapa o aparato experimental é descrito, assim como, a metodologia utilizada nos testes;
- Capítulo 5: apresentação dos resultados e discussão dos mesmos; uma estimativa da vazão feita com o ultrassom é mostrada, assim como os parâmetros

hidrodinâmicos que foram calculados por ambos os métodos; uma comparação entre as técnicas é apresentada;

- Capítulo 6: conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo está dividido em três seções. Na primeira, o escoamento multifásico é abordado, sendo o padrão intermitente, foco do presente trabalho, mais detalhado. Na segunda, são revisadas as técnicas existentes para caracterizar o escoamento multifásico. A terceira apresenta publicações que utilizaram o ultrassom como instrumento de medição e comentários pertinentes ao tema desta dissertação.

Na primeira seção, os conceitos que envolvem o escoamento intermitente e modelagens do mesmo são expostos. A revisão bibliográfica da segunda seção é importante para mostrar quais as técnicas existentes e até compará-las. A última parte mostra os diversos aspectos das medições realizadas com ultrassom. Ao final será apresentada uma síntese da revisão bibliográfica mostrando como esses trabalhos auxiliaram no desenvolvimento do presente estudo.

2.1 Escoamento multifásico

No trecho percorrido pelo escoamento bifásico durante a produção de óleo e gás, é comum que o padrão de escoamento se altere diversas vezes, sendo influenciado por diversos fatores (Shohan, 2006):

- Parâmetros operacionais: vazões de líquido e gás;
- Variáveis geométricas: diâmetro e rugosidade da tubulação e ângulo de inclinação;
- Propriedades das fases: massa específica, viscosidade, tensão superficial, etc.

Para trechos horizontais, existem quatro padrões de escoamento (Figura 2.1):

• Estratificado – Padrão que ocorre em baixas vazões de líquido e gás, onde as fases são separadas por gravidade. O líquido ocupa a parte inferior do tubo e o gás a parte superior. Esse padrão é subdividido em dois padrões: o liso, onde a interface água-ar é lisa, e o ondulado, onde em vazões de gás mais altas, ondulações se formam na interface.

• Intermitente – É caracterizado pela passagem de bolhas alongadas com filme de líquido seguidas de pistões de líquido que ocupam toda a área transversal da tubulação. Em vazões de gás mais baixas, o escoamento é denominado de bolha alongada, onde não existem bolhas no pistão de líquido. Já para altas vazões é possível observar uma esteira de bolhas na frente do pistão de líquido, formando o escoamento intermitente em forma de golfadas.

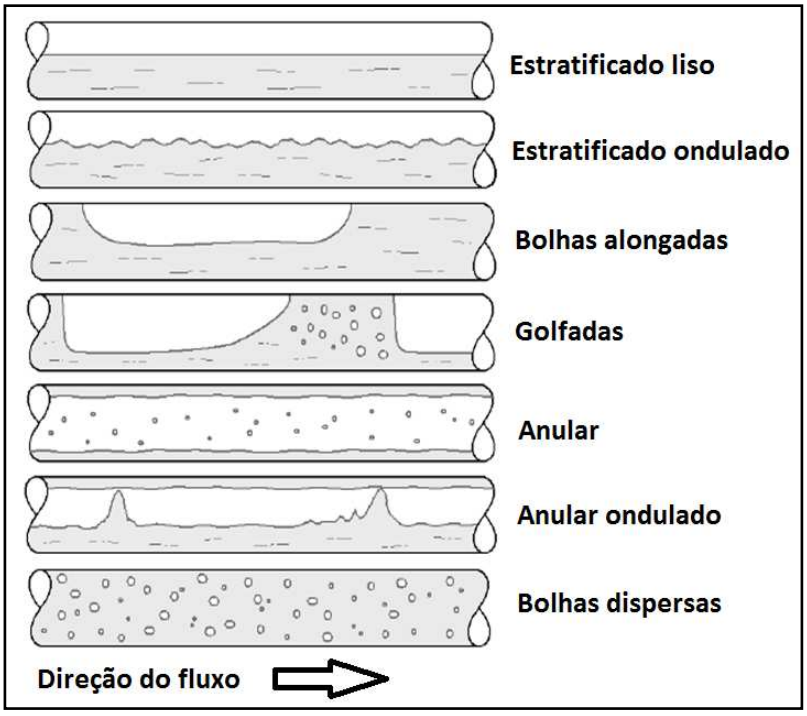


Figura 2.1. Padrões de escoamento em tubulação horizontal.

Fonte: Adaptada de Shohan, 2006.

• Anular – Padrão que ocorre para elevadas vazões de líquido e gás. O gás escoa no centro da tubulação, podendo conter gotículas de líquido, e o líquido escoa próximo à parede da tubulação. Há uma grande tensão de cisalhamento na interface devido ao gradiente de

velocidade muito alto. O líquido é mais espesso na parte inferior da tubulação em vazões de gás mais baixas.

• Bolhas dispersas – Para elevadas vazões de líquido, o padrão de bolhas dispersas é formado. Consiste em bolhas dispersas em uma fase contínua de líquido. Quanto mais alta a vazão de líquido, mais uniformemente as bolhas estarão distribuídas ao longo da tubulação.

Os padrões de escoamento geralmente são mostrados em gráficos, chamados de mapas de padrão de escoamento, nos quais esses padrões estão divididos de acordo com as vazões ou velocidades superficiais em que ocorrem e diâmetro da tubulação por onde escoam. Às vezes, para as mesmas condições operacionais como vazão e diâmetro da tubulação, mapas de diferentes autores podem mostrar diferenças na região de transição de um padrão para outro, já que é difícil detectar com precisão essa região. A Figura 2.2 mostra o mapa de padrões de escoamento desenvolvido por Taitel e Barnea (1990) para o escoamento horizontal em termos de velocidades superficiais.

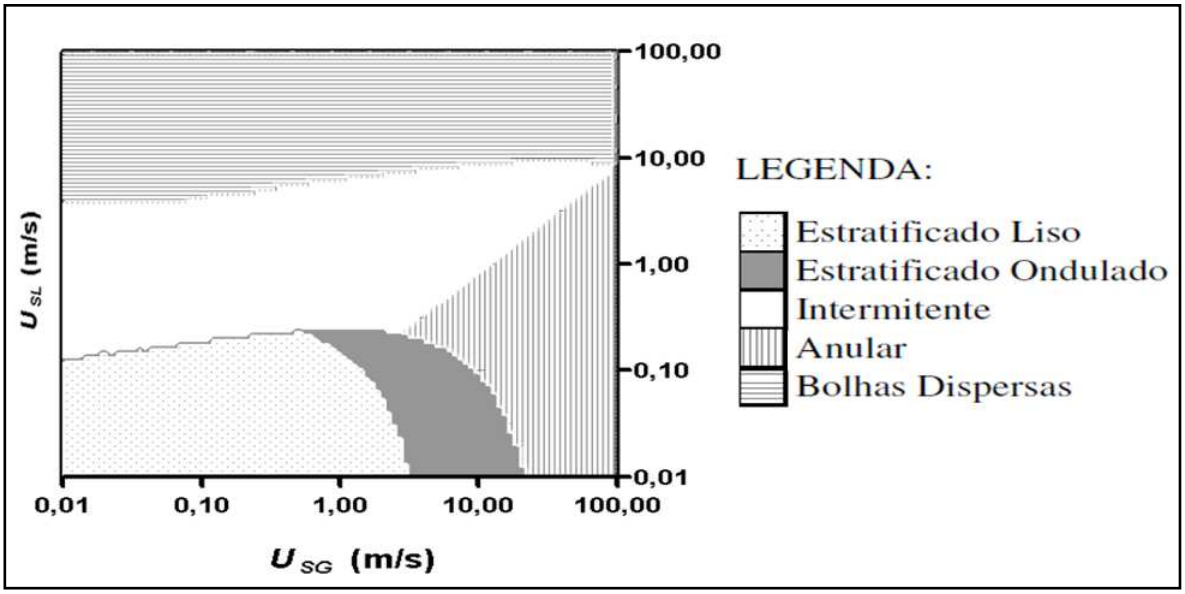


Figura 2.2. Mapa de padrões de escoamento de Taitel e Barnea (1990).

2.1.1 O escoamento intermitente

O escoamento intermitente pode ocorrer em tubulações verticais, horizontais e inclinadas, abrangendo uma grande faixa de vazões de líquido e gás.

Em tubulações verticais, a maior parte do gás está concentrada em estruturas que lembram o formato de uma bala ou torpedo, também denominada de bolha de *Taylor*, e são separadas por pistões de líquido que contém uma pequena quantidade de gás. Em tubulações verticais, é possível considerar que o escoamento é simétrico em relação ao eixo da tubulação. Em tubulações horizontais, as estruturas de gás estão distribuídas na parte superior da tubulação devido ao efeito da gravidade, com um filme de líquido escoando na parte inferior, separadas também por pistões de líquido.

A hidrodinâmica desse escoamento é bastante complexa devido ao seu comportamento instável, intermitente. Portanto, cálculos de transferência de calor e massa, assim como o cálculo das variáveis envolvidas no escoamento (velocidades, comprimentos, etc.) são bastante complicados.

Esse tipo de escoamento é comumente associado a problemas operacionais, como aumento da taxa de corrosão e problemas estruturais em inclinações e curvas (Shohan, 2006). Em campos de gás, por exemplo, à medida que o reservatório é exaurido, a pressão diminui e podem ser gerados pistões de líquido de grande comprimento, que podem alcançar até quinhentas vezes o valor do diâmetro da tubulação. Pistões com esse comprimento podem causar problemas operacionais devido à flutuação que a pressão apresenta ao longo de seu comprimento (Kadri, 2006).

A modelagem do escoamento intermitente realizada por Dukler e Hubbard em 1975 foi dedicada ao escoamento horizontal. Em 1990, Taitel e Barnea, publicaram um estudo detalhado sobre o escoamento intermitente dando uma importância maior aos parâmetros hidrodinâmicos.

A maior parte dos modelos existentes faz uso de dados empíricos, o que impõe algumas restrições aos modelos, como a faixa de vazão de líquido e gás abrangida pelo modelo. Alguns autores admitem que o comprimento do pistão de líquido seja igual a trinta vezes o valor do diâmetro da tubulação. O presente estudo demonstra que o comprimento do pistão pode até oscilar em torno de uma média, mas com um alto desvio padrão.

Kordyban (1961) foi o primeiro autor a propor uma modelagem do escoamento intermitente em dutos horizontais. Ele assumiu que parte do fluxo de líquido, na parte inferior da tubulação, segue as leis de escoamento em canal livre onde o líquido escoa em formato de

discos. No modelo, o pistão de líquido se move com a velocidade média da bolha alongada e desliza sobre uma porção de líquido. Baseado nesse conceito foi feita uma expressão para determinar a perda de carga, considerando os termos de aceleração e gravidade. A perda de carga calculada pelo método não é satisfatória. O mesmo autor, 1963, apresentou novos resultados para o escoamento intermitente e admitiu que seu modelo fosse muito simplificado e inadequado para estimar perda de cargas.

Hubbard (1965) e Dukler e Hubbard (1968) mostraram outro modelo do escoamento intermitente baseado em estudos visuais e quantitativos. Os autores descreveram o processo de formação do escoamento intermitente a partir do regime estratificado:

1) Líquido e gás escoam em um duto horizontal com o gás ocupando a parte superior do tubo e com uma velocidade maior que a do líquido, de forma que ondas começam a se formar até que o líquido consiga tocar a parte superior da tubulação;
2) Quando o líquido toca a parte superior, ele é acelerado para a velocidade do gás devido ao gás que está escoando atrás dele. O líquido, acelerado uniformemente, age como uma pá, colhendo o líquido que escoa mais lentamente a sua frente, acelerando-o à velocidade do pistão. Dessa forma, a onda fica mais espessa, formando o pistão;
3) O pistão se desloca ao longo da tubulação e devido à ação da gravidade, volta a ocupar a parte inferior da tubulação;
4) O comprimento do pistão é estabilizado;
5) O líquido presente no filme entra no pistão antes de ter sua velocidade igualada a do pistão, gerando vórtices na cauda da bolha alongada;
6) À medida que a vazão do gás é aumentada, o pistão de líquido vai ficando mais aerado até formar o padrão anular.

Diferenças significantes podem ser observadas nos dois modelos apresentados acima: (a) Hubbard (1975) assume que existe gás entrando e saindo do pistão a todo instante e (b) Kordyban (1961) considera que existe gás no pistão de líquido.

Taitel, Barnea (1990) fizeram uma descrição detalhado do escoamento intermitente. O escoamento é subdividido em bolhas alongadas, quando há poucas bolhas no pistão de líquido, e *slug flow*, para vazões mais elevadas onde existem mais bolhas no filme de líquido. Devido à complexidade do escoamento, a estimativa da perda de carga e da transferência de calor é uma

tarefa difícil. A Figura 2.3 ilustra os parâmetros hidrodinâmicos envolvidos no escoamento intermitente.

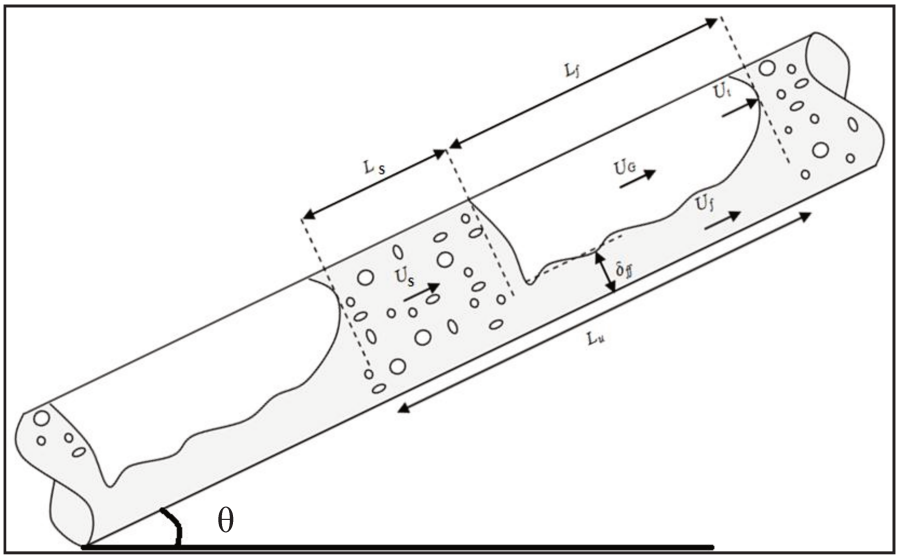


Figura 2.3. Variáveis hidrodinâmicas envolvidas no escoamento intermitente.

Fonte: Adaptado de Lima, 2009.

O modelo é dividido em dois volumes de controle: o primeiro indicado por L_S na Figura 2.3, que corresponde ao pistão de líquido, e o segundo indicado por L_F que corresponde à bolha alongada, juntos formam a célula unitária (L_U).

Kadri (2009) realizou um estudo que pode ser dividido em quatro partes: identificação da região onde grandes pistões de líquido são formados no mapa de padrões de escoamento, identificação de onde ocorre a transição do escoamento estratificado para o intermitente, identificação do efeito da pressão de operação no comprimento do pistão de líquido e a investigação da frequência de passagem dos pistões de líquido.

França *et al.* (2009) criaram um método mecanicista para calcular o coeficiente de transferência de calor do escoamento intermitente baseado no modelo de célula unitária. Os parâmetros hidrodinâmicos foram obtidos empiricamente em dois experimentos e comparados entre si. No de menor escala com 15 m de comprimento (tubulação de cobre) e 25,4 mm de diâmetro interno, escoavam água e ar; no experimento de maior escala, 200 m de comprimento (tubulação de aço) com diâmetro interno de 150 mm, o escoamento era composto por gás

natural, óleo e água. Dados de transferência de calor obtidos a partir do experimento de menor escala foram usados para validar o método proposto pelos autores para estimar esse coeficiente. Uma comparação entre os resultados do experimento de maior escala e correlações já existentes na literatura mostraram valores semelhantes entre os métodos. Esses autores contestaram que a afirmação que muitos autores fazem, assumindo que o comprimento do pistão é igual a trinta vezes o valor do diâmetro interno da tubulação, é errada e que o comprimento do pistão varia de uma célula unitária pra outra não se mantendo constante.

2.2 Métodos existentes para caracterizar o escoamento multifásico

Ayala *et al*. (2007) mostraram em seu trabalho a evolução na caracterização do escoamento multifásico água-ar. Essa evolução pode ser dividida em três períodos que se sobrepõem: o período das correlações empíricas, onde o primeiro trabalho foi realizado por Lockhart e Martineli, resultando em uma correlação para a queda de pressão em um escoamento horizontal. Essa correlação foi precedida por várias outras, onde a faixa de condições operacionais aumentava. A correlação de Beggs e Brill (1992) é uma das correlações que abrange uma maior faixa operacional, e pode ser usada em escoamentos verticais, horizontais e inclinados.

A invenção do computador pessoal (PC) possibilitou trabalhar com situações cada vez mais complexas. O trabalho de Taitel e Dukler (1990) é um trabalho clássico que leva em conta vários fenômenos físicos na análise do escoamento voltada para a área petrolífera.

O período das modelagens, que se estende até hoje, tende a introduzir mais a parte de fenômenos físicos e diminuir a quantidade de correlações usadas em dados empíricos para caracterizar o escoamento multifásico, assunto que é de interesse a vários tipos de indústrias.

Ma *et al*. (2001) utilizaram tomografia por impedância elétrica para monitorar um escoamento horizontal bifásico água-ar. A técnica pode não ser uma boa opção para escoamentos horizontais. Devido à gravidade, o ar ocupa a parte superior da tubulação, o que pode fazer com que os eletrodos percam o contato elétrico com o fluxo resultando em uma medição errônea. O experimento foi composto por uma tubulação de acrílico de 20 metros de comprimento com 50 milímetros de diâmetro interno. O sensor composto por 16 eletrodos foi

instalado distante do sistema de injeção de gás para que o escoamento pudesse se desenvolver. A velocidade superficial do líquido foi mantida constante em 0,84 m/s. Os autores afirmaram que a técnica é capaz de identificar o nível de líquido, mesmo quando toda a seção transversal está completamente tomada por água. Algumas simplificações são feitas, como o formato da superfície água-ar sendo uma linha côncava pré-alocada em determinadas posições. O método aplicado ao tratamento dos dados deve ser combinado com outra técnica, caso o objetivo seja medir importantes parâmetros do escoamento, como velocidade e comprimento de bolhas alongadas. A precisão da técnica está diretamente relacionada com a quantidade de eletrodos.

Comparando a tomografia por impedância elétrica com o ultrassom, é possível observar que aquela só é capas de identificar a localização da interface água-ar, onde para isso necessita de vários eletrodos. A técnica de ultrassom pode detectar a localização dessa interface, utilizando apenas um transdutor e com a vantagem de não precisar desmontar a tubulação para instalá-lo, enquanto na técnica de tomografia, os eletrodos precisam estar em contato com o escoamento.

Gurau *et al*. (2003) utilizaram um anemômetro a fio quente para medição da velocidade de gás e líquido em um escoamento vertical bifásico. A área transversal do duto era de 6,35 x 63,5 mm com 1,27 m de altura. Um sistema de filmagem (1000 quadros por segundo) capaz de filmar por 5 segundos também foi utilizado. O anemômetro era constituído de dois sensores de quartzo separados por uma distância de 1,91 mm. Um algoritmo, capaz de calcular a correlação cruzada entre os dois sensores com filtros para eliminar o ruído externo, foi elaborado para calcular a velocidade do escoamento. Os resultados foram satisfatórios para frações de vazio de até 25%. O equipamento não é capaz de operar em escoamentos onde o líquido esteja em ebulição. Isso porque as bolhas provenientes da ebulição podem mascarar a turbulência do escoamento.

O tratamento dos dados é semelhante ao que foi utilizado no presente trabalho; porém, a técnica utilizou equipamentos muito delicados que não são passíveis de serem utilizados na indústria petrolífera, por exemplo, caso esse anemômetro seja utilizado para monitorar uma linha de produção, por onde escoam óleo, gás e sólidos, existe uma grande probabilidade de partículas sólidas quebrarem os sensores de quartzo gerando grande prejuízo, pois será necessário parar a linha de produção para realizar a troca dos sensores.

Chakrabarti *et al*. (2006) construíram uma sonda ótica para determinar o padrão de escoamento em uma seção de testes horizontal. Apesar de a técnica ser intrusiva, tem um custo relativamente baixo em relação a outros métodos, e mostrou ser eficiente na detecção do padrão de escoamento.

Powel (2008) descreve cinco técnicas que oferecem boa precisão para escoamento multifásico em diversas velocidades, constituintes das fases e concentrações: ressonância magnética por imagem, velocimetria ultrassônica, tomografia por impedância elétrica e radiografia por raios-X e nêutrons.

Comparando-se a ressonância com a velocimetria ultrassônica, aquela é mais versátil e seu potencial ainda não foi totalmente explorado, especialmente na área de mecânica dos fluidos. É também uma técnica de alto custo e difícil de ser implementada. A velocimetria não tem tanta aplicação quanto à ressonância; porém, tem menor custo, é portátil e de fácil instalação.

A tomografia é um bom método para medir concentração de partículas em diversas posições ao longo do comprimento de uma tubulação, o que pode ser útil quando se deseja verificar se existe variação na quantidade de partículas em suspensão. É capaz também de medir a velocidade. Apesar de ser um método de baixo custo, tem dificuldades em ser automatizado.

A técnica de radiografia é altamente especializada, e no caso da radiografia por nêutrons existe a necessidade de um reator nuclear, o que não é tão fácil de ser encontrado. Geralmente o aparato experimental tem que ser montado onde o equipamento de medição se encontra, assim como, a técnica por ressonância. A radiografia por nêutrons é indicada para medições em escoamentos de gás e metais líquidos, enquanto a radiografia por raios-X é mais indicada para sólidos em suspensão. A Tabela 2-1 resume as técnicas que foram descritas acima.

Tabela 2-1. Resumo das técnicas apresentadas.

Fonte: Adaptado de Powell, 2008.

Técnica	Concentração	Velocidade	Constituintes químicos	Comentários
Ressonância magnética por imagem	Sim	Sim	Sim	- Seu uso é complicado; - Existem algumas restrições para alguns tipos de material; - Resolução temporal é limitada em 100 Hz.
Velocimetria ultrassônica	Sim	Sim	Não	- A atenuação do sinal pode ser um problema.
Tomografia por impedância elétrica	Sim	Não	Não	- Equipamento de baixo custo e fácil instalação; - É complicado extrair informações dos dados obtidos.
Radiografia por raios-X e nêutrons	Sim	Não	Possivelmente	- Equipamento de alto custo e requer qualificação do profissional que irá Manusear; - Devido ao tamanho do equipamento, geralmente o experimento tem que ser deslocado até para os medidores; - O equipamento fornece uma boa resolução no espaço e no tempo.

Rzasa (2009) utilizou simultaneamente sistemas de tomografia ótica e capacitiva, devido à complexidade envolvida no escoamento horizontal bifásico gás-líquido para reproduzir no computador o que acontece no escoamento. No sistema de tomografia ótica, o escoamento é iluminado de cinco pontos diferentes e a intensidade da luz é detectada por 64 sensores, onde os valores de luminosidade são transformados em um sinal discreto e o escoamento é reconstruído através de um algoritmo. A tomografia capacitiva é baseada na variação do sinal entre um sensor e eletrodos. Posteriormente, os dados obtidos através da tomografia capacitiva foram tratados e comparados com os resultados obtidos através da tomografia ótica. Os resultados mostraram que é possível uma reconstrução do escoamento, fiel ao que realmente ocorreu. Segundo o autor, o método proposto pode ser usado para identificação de parâmetros do escoamento, como o volume das fases, e a tomografia ótica pode ser usada para medir a velocidade da fase gasosa.

2.3 O ultrassom como instrumento de medição

Nakamura *et al*. (1998) utilizaram o ultrassom para medir a velocidade do líquido do escoamento estratificado (liso e ondulado). Para diminuir a quantidade de pulsos que, ao atingir a fronteira, não retornam diretamente para o sensor, os autores utilizaram uma borracha com 2 mm de espessura com furos em sua superfície, na parte inferior da tubulação, de modo que o eco dos pulsos que atingiam essa borracha era amortecido, não retornando ao sensor, o que tornou os resultados mais precisos.

Bond *et al*. (2003) descrevem como as várias técnicas de ultrassom podem ser usadas para caracterizar e monitorar sistemas de escoamento multifásico em tempo real. Algumas vantagens em usar um sistema de ultrassom são: é robusto, por não conter partes móveis, portátil, compacto e de baixo custo quando comparado a outros métodos. Os autores classificaram o ultrassom em quatro técnicas como mostra a Tabela 2-2.

Tabela 2-2. Aplicação da técnica de ultrassom.

Adaptada de Bond *et al.*, 2003.

Técnica	Parâmetros	Aplicação
Reflexão do ultrassom	Amplitude, frequência e fase	Distância, nível, posição, velocidade do som Estrutura de objetos, interfaces (solidificação) Presença de objetos Massa específica, viscosidade e concentração Grau de mistura Movimento, velocidade
Transmissão de ultrassom	Fase e amplitude	Concentração de sistema multicomponentes Distribuição de tamanho de partículas em suspensões e emulsões Vazões volumétrica e mássica, velocidade Massa específica, viscosidade Temperatura
Emissão de ultrassom	Frequência e amplitude	Monitoramento das condições de processo
Ressonância de ultrassom	Fase e amplitude	Massa, formato e camadas Viscosidade, massa específica Espécie química Análise de multicomponentes

Os autores mostraram duas aplicações utilizando a técnica pulso-eco (emissão e reflexão do ultrassom). Na primeira o sistema foi utilizado para medir a salinidade de um filtro, onde foi possível, através do sinal de ultrassom identificar em que porcentagem o filtro saturou. No segundo exemplo, o ultrassom foi usado para calcular a densidade de partículas em um escoamento. Os resultados foram comparados com as densidades calculadas por um densímetro, e os resultados foram semelhantes. Segundo os autores, é possível calcular essa densidade com erro inferior a 1%.

Carvalho *et al*. (2009) relacionaram sinais provenientes de sensores ultrassônicos com a fração de vazio e o padrão de escoamento. O aparato experimental era constituído de um tubo de 8 metros de comprimento com 2" de diâmetro disposto verticalmente por onde escoava água a uma vazão fixa, enquanto a vazão de ar ia sendo aumentada gradativamente, de forma que a fração de vazio aumentasse de um em um por cento. Segundo os autores, a atenuação acústica dos sensores mostra um comportamento relacionado com a fração de vazio, sendo possível ainda identificar o padrão de escoamento. À medida que a fração de vazio aumentava, maior presença de bolhas, a energia recebida pelos sensores a 0º e 180º diminuía e a dos sensores posicionados a 45º e 135º aumentava devido ao desvio do feixe de ultrassom causado pela presença das bolhas.

Masala *et al*. (2007) utilizaram a técnica do ultrassom para identificar a altura do filme de líquido, e a fração de vazio para os regimes estratificado e anular. O experimento foi realizado na condição padrão (20ºC e 1 atm) e consistiu de quatro transdutores ultrassônicos utilizados no modo pulso-eco ao longo do comprimento de um tubo circular de 2,1 cm de diâmetro. Os transdutores trabalharam em conjunto com um gerador de sinais e um sistema de aquisição de dados. A velocidade superficial do líquido foi variada entre 0,019 e 0,144 m/s e a velocidade superficial do gás entre 0,24 e 4,33 m/s. Após a aquisição, os dados eram processados a fim de identificar a localização da interface água-ar (altura do filme de líquido) e a fração de vazio. Os resultados mostraram que o método oferece uma precisão de 1,5% para a determinação da altura do filme de líquido instantânea e de 10% para a média. Para a fração de vazio, o método mostrou ser bastante eficaz quando comparado~~s~~ a valores teóricos.

Santos (2006) utilizou a técnica de ultrassom no modo pulso-eco, em tempo real, para estimar a altura do filme de líquido em escoamento bifásico água-ar e água-óleo obtendo bons

resultados. Ainda segundo o autor, a presença de ruídos externos pode atrapalhar a medição e a técnica não deve ser aplicada quando no escoamento houver fluidos muito viscosos, pois seus resultados mostraram uma atenuação crescente no sinal.

Vatanakul *et al.* (2004) utilizaram a técnica de ultrassom e transdutores de pressão para medir *holdup* das fases em um sistema trifásico composto por água, ar e esferas de vidro. Os dados provenientes dos sensores ultrassônicos foram processados usando um método estatístico que analisava a flutuação do sinal. Os resultados obtidos através de ambas as técnicas foram semelhantes. O ultrassom mostrou ser eficaz também para altas velocidades de líquido (maior que 14 cm/s). Nos resultados foi possível observar que as fases sólida e gasosa possuíam uma distribuição axial uniforme, enquanto radialmente, só para altas velocidades de líquido.

Zheng (2003) utilizou o ultrassom no modo de transmissão direta para verificar como a atenuação se comporta em escoamentos verticais bifásicos e trifásicos. Os trabalhos de Chang *et al*. (1984) e Stolojanu e Prakash (1997) mostram que a atenuação do sinal depende do *holdup* das fases. Macchi *et al*. (2001) e Vatanakul *et al*. (2002) acreditam que as bolhas podem afetar a velocidade do som. Em seu trabalho, foi explorada a relação dos *holdups* de partículas/gás e as flutuações de velocidade e atenuação no ultrassom. Dois transdutores, um emissor e outro receptor, foram instalados em um *riser* com 7,6 cm de diâmetro interno onde eram gerados os escoamentos água-ar, água-sólidos (esferas de vidro) e água-ar-sólidos. Transdutores de pressão também foram utilizados para medir o diferencial de pressão ao longo da linha. Através de uma câmera observou-se que o tamanho e a quantidade de bolhas aumentavam à medida que a vazão era aumentada. Foi observado também que à medida que o *holdup* de gás aumentava, havia um aumento bem maior na flutuação da amplitude e no tempo de trânsito. No escoamento água-sólido, o espalhamento das ondas no escoamento não é tão grande quanto no escoamento água-ar. Logo, a flutuação no sinal também não sofria grandes variações. No escoamento trifásico, a presença de sólidos não afetou a flutuação na amplitude do sinal; porém, um aumento na concentração de sólidos afeta as variações no tempo de trânsito. Segundo o autor, a concentração de gás e sólidos pode ser obtida através de uma análise na flutuação do sinal.

Em um trabalho mais recente, Zheng e Zhang (2004) mostraram que bolhas de gás são um fator dominante na flutuação do sinal.

Van Hout *et al*. (2001) investigaram os parâmetros hidrodinâmicos e estáticos do escoamento intermitente vertical para várias condições de operação e dois diâmetros de tubulação (24 e 54mm) através de três estações de fibra ótica distribuídas ao longo da tubulação. Através da técnica foi possível medir as velocidades da frente e da cauda da bolha de Taylor, e o comprimento do pistão a frente da bolha simultaneamente. Os autores mostram que a velocidade da bolha de Taylor depende do comprimento do pistão que escoa na frente da bolha, independentemente do diâmetro da tubulação. Através dos resultados, os autores propuseram uma correlação para a velocidade das bolhas de Taylor considerando a distância que as separavam. Em seguida, carregaram as correlações em modelos computacionais e compararam com os resultados obtidos experimentalmente. As correlações mostraram ser eficientes apenas para a tubulação de menor diâmetro; já para o diâmetro de 54 mm os resultados entre as correlações e o experimento foram bem diferentes devido ao escoamento em uma tubulação de maior diâmetro demorar mais tempo para se desenvolver. Outra dificuldade apresentada para o experimento de maior diâmetro é o fato de o pistão de líquido ser mais aerado, dificultando o tratamento dos dados.

Macchi *et al.* (2001) utilizaram a técnica de ultrassom para medir o *holdup* de líquido em sistemas multifásicos. Segundo o autor, as vantagens do método são: possibilidade de operar em meio opaco, requerer uma tensão (V) de trabalho muito menor, ser mais seguro e apresentar um custo menor em relação a outros métodos. Através de dois parâmetros independentes do ultrassom (atenuação e tempo de trânsito da onda), o método é capaz de relacioná-los com as características físicas do sistema onde as medidas estão sendo realizadas, como a fração de vazio.

Alguns modelos propostos por outros autores foram testados através de um aparato experimental composto por uma coluna de acrílico de 1,8 m de altura com 0,292 m de diâmetro interno, onde quatro transdutores ultrassônicos (sendo dois de 0,5 MHz e dois de 1 MHz) foram instalados. Água, ar e esferas de vidro de 1,3 mm de diâmetro são injetados na coluna vertical formando o escoamento multifásico. Cada aquisição durou 150 segundos e era composta por 125 pulsos com 300 pontos a uma taxa de 2 Hz. A velocidade do líquido foi mantida fixa em 7 mm/s. Em seus resultados, o tempo de trânsito não variou para frações de vazio menores que 4%; porém para frações maiores, até 12%, foi possível observar um aumento no tempo de

trânsito proveniente da difração e do espalhamento das ondas. Em relação ao diâmetro das bolhas, os valores obtidos através dos modelos foram aceitáveis quando comparados aos valores reais. Para a atenuação do sinal, os valores obtidos experimentalmente foram diferentes dos valores apresentados pelo modelo. Segundo o autor, a atenuação acústica limita o uso do ultrassom para a determinação de *holdup*, pois é difícil encontrar uma frequência que possa ser transmitida por todas as fases que compõem o escoamento.

Gonçalves (1991) utilizou sensores ultrassônicos para medir parâmetros como, frequência de passagem e velocidade das bolhas de *Taylor*, fração de vazio do pistão de líquido e espessura do filme de líquido. Os resultados foram comparados com um modelo e o erro absoluto da maioria dos resultados ficou dentro dos 35%. Foi verificado que a ocorrência da bolha de Taylor é um fenômeno completamente aleatório. O parâmetro que teve a menor confiabilidade nas medidas foi a espessura do filme de líquido, que, segundo o autor se deve ao tipo de transdutor usado para realizar as medidas.

Tanahashi (2010) utilizou transdutores ultrassônicos no modo pulso-eco e transmissão direta para estimar a fração de vazio (variando de 0 a 15 %) no escoamento borbulhante vertical em uma tubulação com 2 polegadas de diâmetro. Foram utilizados quatro sensores distribuídos ao longo da circunferência da tubulação nos ângulos 0º, 45º, 135º e 180º. A técnica de filmagem ultrarrápida também foi utilizada, com uma taxa de aquisição de imagens de 250 e 1000 quadros por segundo. Os resultados mostraram que bolhas que escoam em frente ao sensor causam uma atenuação no mesmo, de forma que a energia recebida pelo sensor pode ser relacionada com a fração de vazio. Através das imagens foi possível relacionar o sinal de ultrassom com o tipo de estrutura gasosa que escoava.

2.4 Síntese da revisão bibliográfica

Existem várias técnicas para medir os parâmetros hidrodinâmicos de escoamentos multifásicos. Cada técnica apresenta vantagens e desvantagens para cada situação. O ultrassom é uma técnica promissora devido à facilidade de instalação e operação. Os trabalhos que se aplicam ao presente estudo são aqueles relacionados à reflexão e emissão do ultrassom em escoamentos gás liquido. A inovação apresentada nesse trabalho é o uso do ultrassom para

medir a vazão de ambas as fases em um escoamento bifásico mostrando que é uma técnica aplicável à indústria petrolífera e pode ser usada em tempo real.

Capítulo 3

Fundamentação teórica

Nesse capítulo serão abordados alguns aspectos do ultrassom pertinentes a esse estudo. Dentre eles, podem ser citados: acústica, a natureza do ultrassom, conversão de modo, impedância acústica, transdutores ultrassônicos e ensaios com o ultrassom.

3.1 Acústica

Em algumas situações, o sinal acústico sofre dissipações de uma forma tão lenta, que podem ser desprezadas. Porém, em alguns casos, a energia acústica é dissipada na forma de calor que está associada ao meio por onde a onda escoa e às fronteiras do meio. Essas perdas podem ser divididas em duas categorias: térmicas e viscosas. As perdas térmicas estão relacionadas às mudanças de temperatura no meio, enquanto que perdas viscosas estão relacionadas à expansão e compressão do fluido.

A atenuação do sinal é a perda de energia acústica. Essa perda pode ser dividida em duas partes: mecanismos de absorção que convertem a energia acústica em energia térmica e, outros mecanismos que causam a reflexão e/ou o espalhamento da energia. Quando um fluido contém heterogeneidades como partículas suspensas, células térmicas de diferentes temperaturas ou regiões de turbulência, a energia acústica é atenuada bem mais rápida como se estivesse transitando em um meio monofásico.

Grandes atenuações são produzidas na água que contém pequenas partículas de gás. A presença dessas bolhas de gás afeta o meio pelo qual a onda trafega, alterando a

compressibilidade e a massa específica do mesmo, causando uma mudança na velocidade do som (Kinsler, 1992). Enquanto que, uma pequena bolha causa pouco efeito na transmissão do som, várias bolhas ou uma bolha de maior diâmetro alteram completamente a velocidade e a direção para onde a onda está se propagando, gerando uma grande atenuação no sinal.

3.2 A natureza do ultrassom

As ondas podem ser classificadas como mecânica ou eletromagnética, segundo sua natureza. Essas não necessitam de um meio material para se propagarem, enquanto que as mecânicas precisam. Como exemplos de onda mecânica podem ser citados a vibração de uma corda de violão e o ultrassom, enquanto ondas de rádio e a luz são exemplos de ondas eletromagnéticas.

A energia caracterizada por vibrações mecânicas propagadas num meio material, gerada com frequências acima de 20.000 Hz, frequência máxima que o ouvido humano consegue captar, são chamados de ultrassom. Porém, o intervalo de frequências utilizadas em ensaios não destrutivos está geralmente entre 100 kHz e 50 MHz. Embora a onda ultrassônica se comporte de maneira semelhante ao som audível, seu comprimento de onda é bem menor; logo esse tipo de onda pode ser refletido em pequenas superfícies, permitindo que o ultrassom seja usado nesses ensaios. A Figura 3.1 mostra um espectro de frequências dividido em três faixas, onde a faixa correspondente ao ultrassom é subdividida em três categorias.

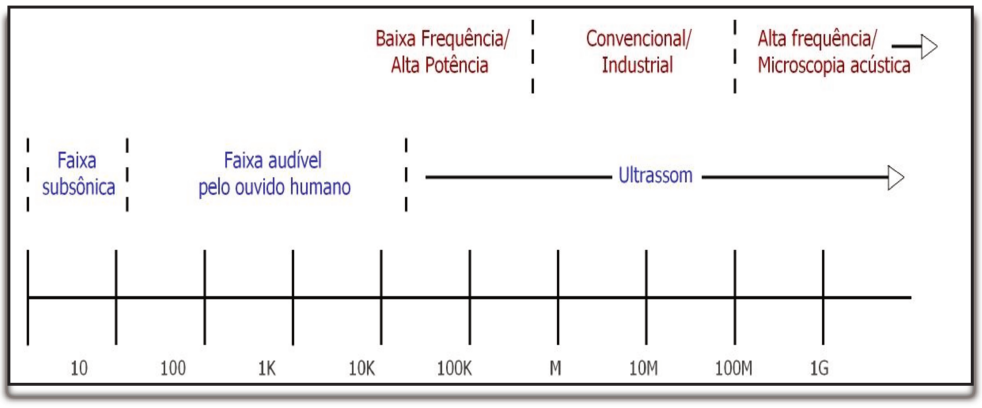


Figura 3.1. Espectro de frequências do som.

Comparando-se com a luz, o ultrassom possui as seguintes características (Asher, 1997):

a) Necessita de um meio para propagação, não podendo ser transmitido no vácuo;
b) O ultrassom pode penetrar objetos opacos; porém em outros tipos de radiação, como a luz, não.
c) A faixa de velocidades (300 m/s – 600m/s) é relativamente menor quando comparada com a velocidade da luz ($3\ 10^8$ m/s no vácuo), o que possibilita a visualização de informações referentes ao ultrassom em tempo real;
d) O ultrassom é pouco dependente da cor do material para se propagar;
e) O comprimento de onda da luz (em torno de $5\ 10^{-4}$ mm) é menor que o do som (frações de milímetros na água a uma frequência de 10 MHz);
f) Em relação à ótica, o ultrassom sofre difração, interferência, refração e reflexão assim como a luz;
g) A frequência do ultrassom está entre 20 kHz e alguns GHz, enquanto a luz possui uma frequência na ordem de milhões de GHz.

Quanto ao sentido da vibração, o ultrassom pode ser transversal, onde o movimento das partículas do meio é realizado na direção transversal em relação ao eixo de propagação, ou, longitudinal, onde o movimento das partículas é realizado no sentido contrário ou não da direção de propagação da onda, que causa uma série de compressões e descompressões das partículas do meio. A velocidade de uma onda longitudinal é maior do que a de uma onda transversal. Na Apêndice A há uma tabela com valores de velocidade do som em diferentes meios.

3.3 Conversão de modo

Ao atingir uma fronteira, uma onda ultrassônica pode ser convertida. Por exemplo, durante a reflexão de uma onda longitudinal, essa pode ser convertida em uma onda longitudinal e uma transversal. A Figura 3.2 ilustra a ocorrência desse fenômeno. Vale ressaltar que o inverso também pode ocorrer: uma onda de ultrassom transversal se converter em transversal e longitudinal (Santos, 2006).

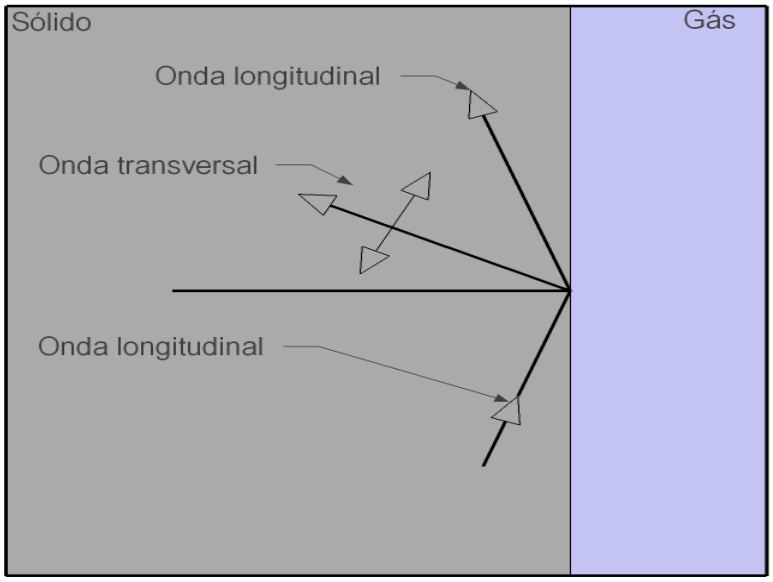


Figura 3.2. Conversão de modo.

Esse fenômeno também pode ocorrer quando o ultrassom está sendo transmitido. Em uma fronteira entre dois sólidos, por exemplo, pode ocorrer a formação de quatro feixes de ultrassom: dois feixes transmitidos, um transversal e outro longitudinal, e dois feixes refletidos, um transversal e outro longitudinal. Tal fenômeno só pode ocorrer quando ambos os meios são sólidos. A onda ultrassônica longitudinal só é propagada em gases e líquidos com baixa viscosidade, enquanto o ultrassom transversal só é propagado em sólidos e líquidos muito viscosos (Santos, 2006).

3.4 Impedância acústica

Ao atingir uma interface, o som pode ser transmitido ou refletido. A quantidade a ser refletida e transmitida é determinada através dos fatores de permeabilidade e de reflexão que, consequentemente, dependem dos valores de impedância acústica que os meios oferecem.

A impedância acústica representa a resistência do meio para a passagem das ondas, e para ondas planas em um fluido, a impedância é dada pelo produto entre a velocidade do som no meio e sua massa específica:

$$z = \pm \rho_0 v \tag{3.1}$$

O sinal da equação depende da direção de propagação da onda em relação ao sistema de coordenadas adotado. A diferença entre impedâncias acústicas é uma propriedade que influencia consideravelmente o comportamento da onda na fronteira entre dois meios. Sua unidade é rayl (Kg/m^{2}s). O mais utilizado na prática é o MRayl (10^6 rayls) (Kinsler, 1980). A Figura 3.3 ilustra a reflexão e a transmissão do ultrassom na fronteira entre dois meios.

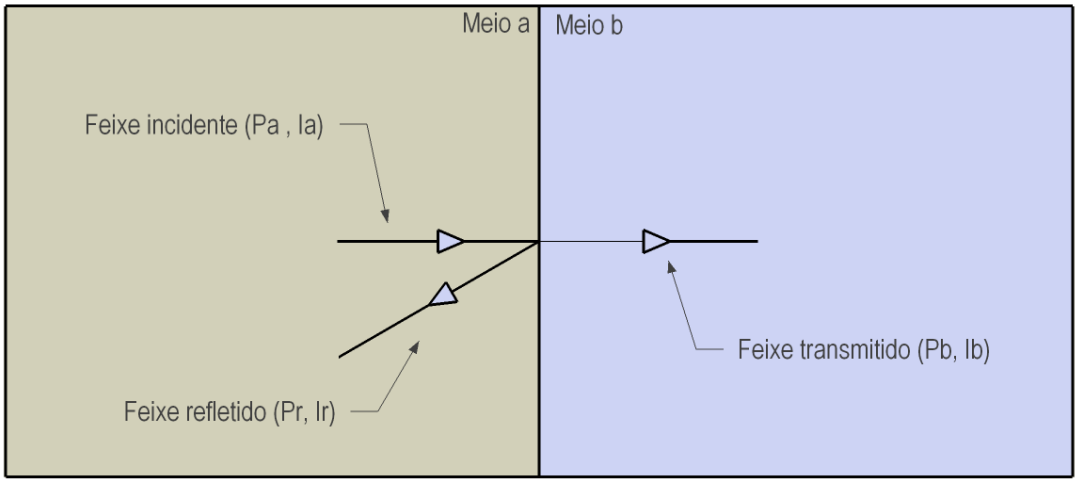


Figura 3.3. Transmissão e reflexão na fronteira.

Considerando as impedâncias acústicas de dois fluidos dadas por Z_A e Z_B, e considerando a onda se deslocando do ponto A para o ponto B, com ângulo de incidência normal à fronteira, o fator de reflexão é definido por (Krautkramer, 1977):

$$R = \frac{Z_A - Z_B}{Z_A + Z_B} \tag{3.2}$$

Logo, como a soma entre o fator de reflexão e a permeabilidade é igual a um, a permeabilidade é dada por:

$$Pa = \frac{2.Z_B}{Z_A + Z_B} \tag{3.3}$$

Sólidos e líquidos possuem maiores massa específicas e altas velocidades sônicas em relação aos gases. O que significa que, fronteiras entre gases e sólidos ou líquidos terão valores de permeabilidade próximos a zero e fatores de reflexão próximos a um. Devido a isso, assume-se na prática que a onda não ultrapassará as fronteiras, sendo totalmente refletido, desde que o Meio A seja sólido ou líquido e o Meio B seja gás.

Ao se aplicar a técnica de transparência no escoamento, o ultrassom será totalmente refletido ao ser interceptado por um volume de gás, sendo possível identificar a fase predominante.

3.5 Transdutor

O transdutor é um dos importantes componentes de um sistema ultrassônico. Antes de expor suas características, é necessário compreender alguns conceitos que irão auxiliar na escolha correta do transdutor.

3.5.1 Campo acústico

O campo acústico é subdividido em dois campos: o campo próximo e o campo distante. O campo próximo (Figura 3.4.a) é a região diretamente em frente ao transdutor, onde a amplitude do eco oscila entre máximos e mínimos até atingir um último máximo a uma distância N do transdutor. O campo distante, também indicado na Figura 3.4.é a região onde a partir do último máximo, a amplitude gradualmente cai até zero.

O perfil de intensidade da onda é mostrado na Figura 3.4.b; áreas vermelhas representam uma maior energia, enquanto áreas de cores verde e azul representam energia de menor intensidade.

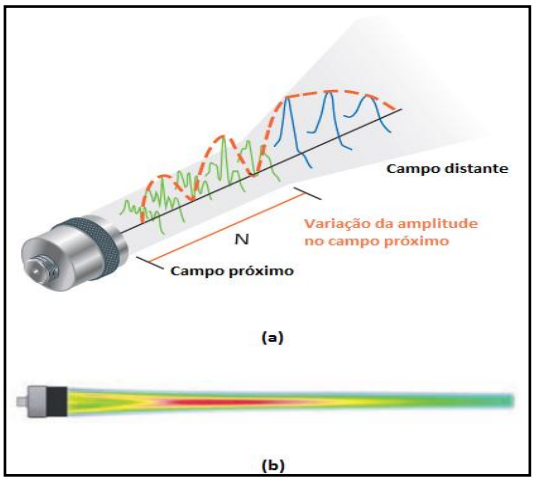


Figura 3.4. (a) Representação esquemática de campo próximo e campo distante **(b)** Perfil de intensidade do ultrassom.

Fonte: Adaptado de Panametrics, 2001.

Devido às variações no campo próximo, é complicado usar uma técnica que se baseia em amplitude para calcular distâncias ou medir falhas em peças. Esse parâmetro é calculado em função da frequência e do diâmetro do transdutor, e da velocidade do som no material em teste, através da equação 3.4.

$$N = \frac{D^2 . f}{4 . c} \tag{3.4}$$

A Figura 3.5 mostra alguns dos parâmetros que devem ser considerados ao escolher um transdutor.

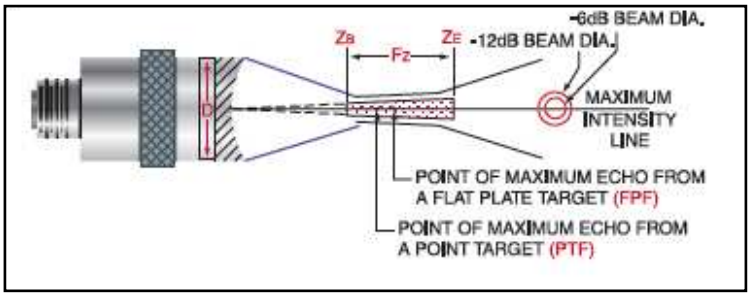


Figura 3.5. Parâmetros do feixe ultrassônico

Fonte: Panametrics, 2001.

3.5.2 Diâmetro do feixe ultrassônico (BD)

A sensibilidade de um transdutor é determinada pelo diâmetro do feixe de ultrassom no ponto onde se deseja realizar a medição. Quanto menor for o feixe, maior será a reflexão medida a partir de uma falha na peça em teste. Para transdutores cilíndricos esse feixe pode ser calculado pela equação 3.5.

$$BD = \frac{0{,}2568.D.F}{N} \tag{3.5}$$

3.5.3 Zona focal (F_z)

É a zona no feixe ultrassônico onde o eco do sinal é atenuado em 6 dB. Esse parâmetro é calculado através da equação 3.6.

$$F_Z = \frac{F^2}{N}\left(\frac{2.N}{N+5.F}\right) \tag{3.6}$$

3.5.4 Características dos transdutores

Algumas das características dos transdutores são:

(a) Tamanho do cristal piezelétrico: possuem geralmente entre 5 e 25 mm de diâmetro, com exceção dos transdutores angulares que são retangulares.
(b) Faixa de frequência: existe no mercado transdutores entre 0,5 e 25 MHz, mas usualmente vão de 1 a 6 MHz.
(c) Capa protetora: é o elemento de contato com o acoplante ou a peça. Geralmente são feitas de plástico.
(d) Possui contatos elétricos que ligam o cristal ao elemento de engate do cabo coaxial.

3.5.5 Tipos de transdutores

A seleção do tipo de transdutor pode ser decisiva para o sucesso ou a falha de um ensaio.

O desempenho de um ensaio pode ser afetado por diferenças nas características da instrumentação, propriedades dos materiais dos transdutores e as condições de acoplamento.

Os transdutores podem ser divididos em sete categorias: de contato, de duplo elemento, angulares, com atraso, submersíveis, com capa protetora e de alta frequência.

Transdutores de contato (Figura 3.6.a) possuem um transdutor que geralmente gera uma onda longitudinal. É usado para contato direto com a peça, separado apenas pelo acoplante.

Transdutores que possuem dois cristais de ondas longitudinais, sendo um emissor e o outro receptor, separados por uma barreira acústica, são chamados transdutores de duplo elemento (Figura 3.6.b). Os cristais são posicionados de tal forma, que não haja interferência.

Quando os transdutores de contato normal à superfície a ser analisada não podem ser usados, os transdutores angulares (Figura 3.6.c) podem ser utilizados. Esses transdutores são capazes de gerar uma onda transversal ou longitudinal em certo ângulo.

Transdutores com atraso (Figura 3.6.d) são transdutores de contato simples feitos especificamente para realizar medições próximas ao transdutor de forma mais precisa.

Os transdutores protegidos (Figura 3.6.e) são transdutores de um único cristal que geram ondas longitudinais, que possuem uma proteção em volta da sua face, e com isso, podem ser utilizados em uma grande variedade de aplicações. Eles podem, por exemplo, ser utilizados em contato direto com materiais que apresentam baixa impedância, como o plástico ou borracha, obtendo um casamento de impedância acústica perfeita.

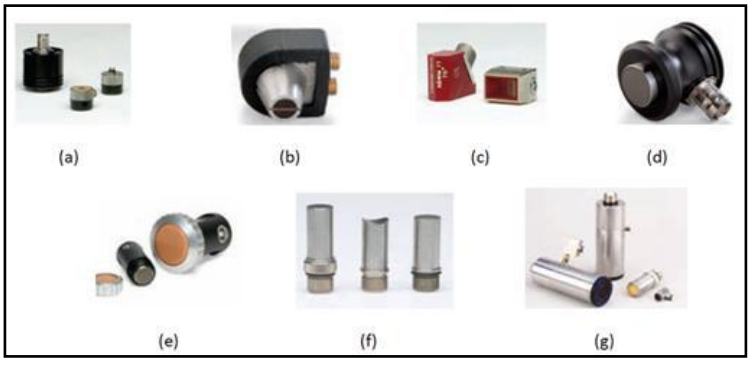


Figura 3.6. Tipos de transdutores.
Adaptado de Panametrics, 2001.

Usados com cabos a prova d'água, os transdutores submersíveis (Figura 3.6.f) podem ser usados em baixo d'água, pois a impedância da sua face é compatível com a impedância da água, o que faz desse tipo de transdutor uma ótima escolha; porém se faz necessário um acoplamento consistente.

Para frequências entre 20 e 225 MHz é recomendado o uso dos transdutores de alta frequência (Figura 3.6.g). Com esses transdutores é possível realizar medidas de comprimento na ordem de 0.010 mm.

A Tabela 3-1 ilustra as principais características de cada transdutor.

Tabela 3-1. Características dos transdutores.

Tipo	Vantagens	Aplicações
Contato	Alta durabilidade e resistência à fratura Impedância acústica compatível com diversos materiais	Detecção de falhas Trabalha em temperaturas de até 122 ^{0}C
Elemento Duplo	Diminuição da zona morta Pode ser usado em peças curvas	Medição de espessura Ambientes com temperaturas de até 800 ^{0}C
Angular	Opera em alta temperatura Disponível em vários ângulos	Detecção de falhas Medidas de comprimento
Imersão	A técnica fornece um acoplamento uniforme A distância focal é especificada pelo usuário	Processos automatizados Rápida detecção de falhas em diversos materiais
Alta freq.	Maior resolução quando comparada com outros tipos Menor comprimento de onda, aumentando a resolução de uma falha	Inspeção de microporo Medições de comprimentos da ordem de 0,010 mm
Face protegida	Quando usado sem acessórios, sua impedância é compatível com o plástico e outros materiais compósitos	Inspeção em alta temperatura Inspeção de forjamento
Com atraso	Maior resolução com transdutores de frequências mais altas Habilidade de detectar pequenas falhas nas peças	Inspeção de partes com área de contato limitada Precisão em medidas de comprimento

3.6 Ensaios com ultrassom

O meio mais simples de se produzir ultrassom em ensaios não destrutivos é através de cristais piezelétricos.

Quando comparado a outros métodos, ensaios realizados com ultrassom possuem as seguintes características:

(a) Produz respostas imediatas;
(b) Localização precisa em descontinuidades;
(c) Alta sensibilidade ao detectar pequenas descontinuidades;
(d) Maior penetração para detectar descontinuidades.

Algumas desvantagens dos métodos são:

(a) O equipamento deve estar bem calibrado;
(b) Necessidade de utilizar uma substância que faça a ligação entre o instrumento de ultrassom e a peça onde as medições são desejadas, para que haja o mínimo de interferência, evitando o mau contato. Esse elemento é conhecido como acoplante e pode ser água, óleo, glicerina, entre outros.

Em relação ao transdutor, o ensaio pode ser classificado de duas formas: quanto ao ângulo de emissão/recepção do ultrassom e quanto a sua função.

Quanto ao ângulo, os transdutores podem ser angulares ou normais. Esses emitem e/ou recebem perpendicularmente à superfície e aqueles obliquamente a superfície.

O transdutor ainda pode ser classificado quanto a sua função. Um transdutor monocristal possui apenas um cristal piezelétrico, podendo trabalhar como emissor, receptor ou emissor e receptor em intervalos de tempo sincronizados. Já um transdutor duplo cristal possui dois cristais, sendo um para emissão e outro para recepção.

Existem dois modos de como ensaios de ultrassom podem ser realizados. Por contato direto: o transdutor é colocado em contato com o meio onde as medições serão realizadas, com o transdutor separado apenas pelo acoplante. No ensaio por imersão, a peça é colocada em um líquido, geralmente água, obtendo-se um acoplamento perfeito.

3.6.1 Técnicas de ensaio

Para realizar um ensaio com ultrassom existem várias técnicas: transparência, pulso-eco, duplo cristal e transdutores angulares.

Na técnica de transparência são usados dois transdutores, sendo um emissor e o outro receptor. Nessa técnica, caso não haja descontinuidade no material, o receptor recebe quase 100% do sinal enviado, e caso haja descontinuidade, apenas uma parte é recebida pelo transdutor receptor. Deve-se ter o cuidado de deixar os transdutores bem alinhados.

Esse método é indicado para processos automáticos que envolvem grandes produções. Para medições manuais, não é adequada pela dificuldade de alinhar os dois transdutores, e de conseguir um bom acoplamento em ambos os lados.

Em processos manuais, as medições geralmente são realizadas através de um transdutor monocristal; o mesmo transdutor funciona como emissor e receptor, devido à facilidade na operação. É possível que uma medição seja realizada de forma precisa no momento em que o transdutor não está enviando um sinal, funcionando como receptor. A desvantagem desse método é que, ao encontrar uma descontinuidade muito próxima à superfície, um eco irá retornar, e caso a transmissão ainda não tenha sido concluída, o sinal não será percebido pelo transdutor. A área próxima à superfície onde os ecos não são detectados é conhecida como zona morta.

Caso a peça em que se deseja realizar o ensaio tenha uma espessura muito reduzida, o pulso-eco não é um método recomendado, como explicado acima. Para este caso, outra técnica deve ser utilizada, como a técnica do duplo cristal através de transdutores TR (transmissor e receptor). Outro tipo de transdutor deve ser utilizado, minimizando assim a zona morta. Esse tipo de ensaio é muito utilizado para verificar dimensões de peças e detectar falhas subsuperficiais. Quando se deseja realizar medições onde a superfície é irregular, não conseguindo um bom acoplamento, em um cordão de solda, por exemplo, se faz necessário o uso de transdutores angulares que possibilita um acoplamento perfeito e detecta as descontinuidades.

3.7 O ultrassom como instrumentação dedicada

A técnica utilizada é baseada nos conceitos de reflexão, transmissão e atenuação de uma onda de alta frequência. Os sinais provenientes dos sensores ultrassônicos são processados, analisados e associados às variáveis do escoamento: velocidade da bolha alongada, altura do

filme de líquido, comprimento da bolha alongada e do pistão de líquido, frequência de passagem de bolhas alongadas e vazão das fases.

A técnica de ultrassom pode ser usada de diferentes métodos de medição para processos em tempo real. Várias técnicas que utilizam sensores ultrassônicos são aplicadas em diferentes tipos de geometria.

3.7.1 A aplicação do ultrassom no escoamento gás-líquido

A medição realizada com o ultrassom oferece uma resposta rápida, baixos níveis de energia envolvidos e várias técnicas aplicáveis, como o pulso-eco e a transmissão direta, potencializando seu uso para uma aplicação em tempo real. Ainda merece ser citado que a medição com o ultrassom é um processo não intrusivo e não invasivo (Figura 3.7), que propicia as seguintes vantagens: pode ser substituído ou consertado sem a necessidade de se interromper a produção, não provoca perdas de carga localizadas (não restringe o fluxo). Pelo fato de não possuir partes móveis, o equipamento utilizado está menos sujeito à manutenção.

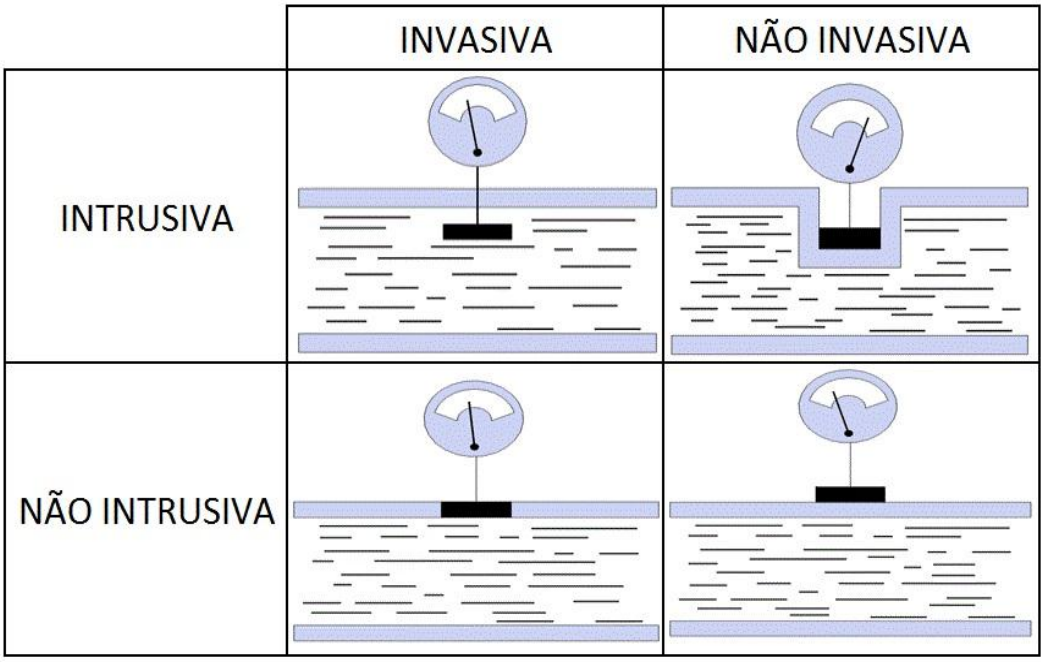


Figura 3.7. Definições de uma medição não invasiva e não intrusiva.

A técnica consiste em emitir uma onda de alta frequência através do meio que será investigado. Uma corrente elétrica de alta frequência induz o cristal piezelétrico do transdutor emissor a vibrar, criando a onda ultrassônica, que é percebida pelos transdutores receptores dependendo do meio em que a onda trafega.

Os sinais de ultrassom gerados através das técnicas de transmissão direta e pulso-eco trazem informações sobre duas variáveis: o tempo de trânsito e a amplitude do sinal. Através do tempo de trânsito é possível determinar a distância e/ou fronteira entre interfaces. Por exemplo, é possível encontrar a que distância do transdutor está a interface entre a tubulação e o fluido, assim como a interface gás-líquido, tendo prévio conhecimento da velocidade da onda no meio.

3.8 A técnica de filmagem ultrarrápida

A captura através de imagens de fenômenos que ocorrem rapidamente facilita bastante a compreensão do mesmo. Câmeras comuns não são capazes de fotografar ou filmar com uma boa resolução, eventos como uma bala sendo disparada por uma arma, o bater das asas de um pássaro ou o escoamento de líquido e gás que ocorre no interior de uma tubulação; logo existe a necessidade de uma câmera que consiga realizar filmagens com captura de quadros na ordem de 1000 quadros por segundo para que se capturem tais eventos com boa resolução.

Recentemente, técnicas de obtenção de imagens rápidas têm sido combinadas com técnicas de medição a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos. A filmagem ultrarrápida também tem suas limitações, como a necessidade de um meio transparente para que a filmagem possa ser realizada, e é uma técnica que não pode ser usada em ambientes hostis, com altas temperaturas, por exemplo, devido à sensibilidade do equipamento.

Capítulo 4

Procedimento experimental

Esta seção está dividida em quatro seções. A primeira descreve instrumentos e equipamentos de cada um dos sistemas que compõem o aparato experimental. A segunda seção mostra o procedimento adotado para a realização dos testes. A terceira seção descreve como foi realizado o tratamento dos dados obtidos através do sistema de ultrassom. A última mostra como foi realizado o tratamento das imagens dos testes realizados.

4.1 Descrição do aparato experimental

Os testes foram realizados num aparato experimental projetado e construído no Labpetro da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Os objetivos deste aparato são: investigar a transferência de calor que ocorre no fundo do mar envolvendo os dutos horizontais e os fluidos que por eles escoam, e caracterizar o escoamento bifásico intermitente horizontal através de métodos não intrusivos, como filmagens ultrarrápidas e a aplicação de ultrassom.

O aparato experimental, representado esquematicamente na Figura 4.1, consiste de um circuito fechado disposto de modo que a mistura água-ar seja desenvolvida antes que as medidas sejam realizadas.

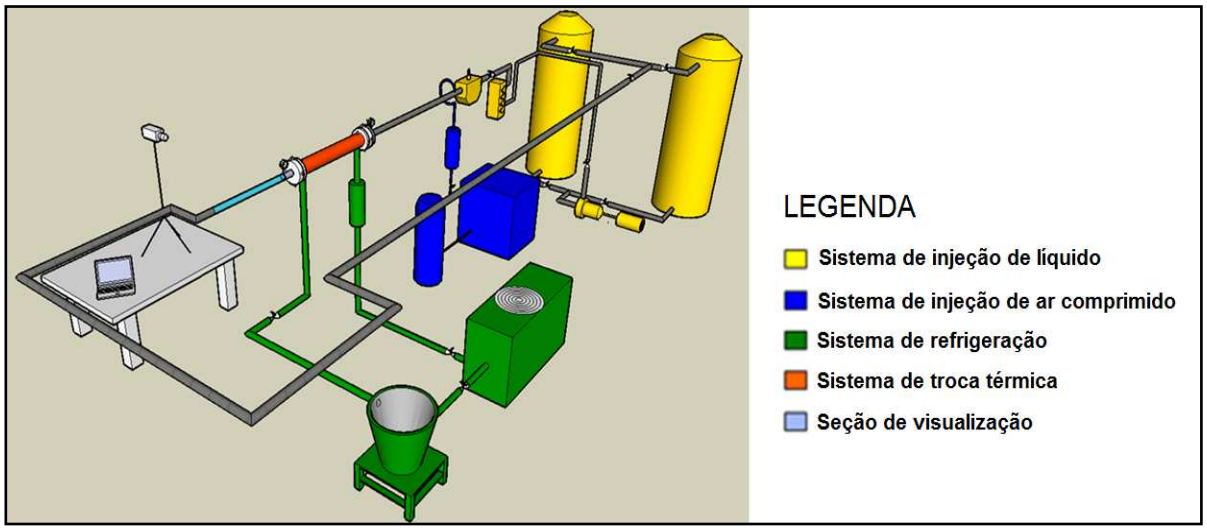


Figura 4.1. Desenho esquemático do aparato experimental.

O circuito de testes foi dividido da seguinte forma: sistema de injeção de líquido, sistema de injeção de ar comprimido, sistema de refrigeração, sistema de troca térmica, sistema de aquisição de dados e sistema de visualização. Apesar de estarem inclusos no aparato experimental, a resistência e o sistema de troca térmica não foram utilizados neste trabalho.

A Tabela 4-1 mostra as características da tubulação usada no aparato experimental.

Tabela 4-1. Características do circuito.

Seção	Material [-]	Rugosidade [m]	Di [m]	De [m]	l [m]
Trecho a jusante da injeção de ar	Aço galvanizado	0,00015	0,0535	0,060	17,74
Seção de troca térmica (tubo interno)	Cobre	$1{,}500e^{-6}$	0,0520	0,054	6,071
Seção de troca térmica (tubo externo)	PVC	$1{,}500e^{-6}$	0,0750	0,085	5,996
Seção de visualização	Acrílico	-	0,0500	0,059	0,860
Trecho a montante da curva de retorno	Aço galvanizado	0,00015	0,0535	0,060	4,400
Trecho de retorno	Aço galvanizado	0,00015	0,0535	0,060	81,00

4.1.1 Sistema de injeção de líquido

Esse sistema tem a função de armazenar, bombear e aquecer o líquido. Para o armazenamento são usados dois tanques, sendo um de 2 m^3 e outro de 4 m^3. O bombeamento é realizado por uma motobomba controlada por um inversor de frequência. Ao sair da bomba, o

líquido passa pelo aquecedor, que teria sua temperatura controlada por um microcontrolador e que atua de acordo com a informação recebida por um termopar na entrada da resistência; porém os testes foram realizados a temperatura ambiente. A Figura 4.2 ilustra esse sistema. Uma foto dos tanques e da motobomba pode ser observada na Figura 4.3.

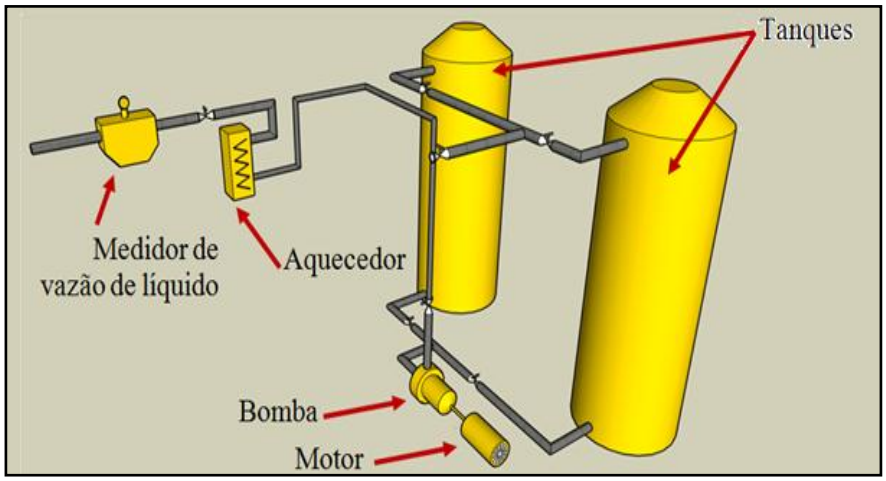


Figura 4.2. Sistema de injeção de líquido.

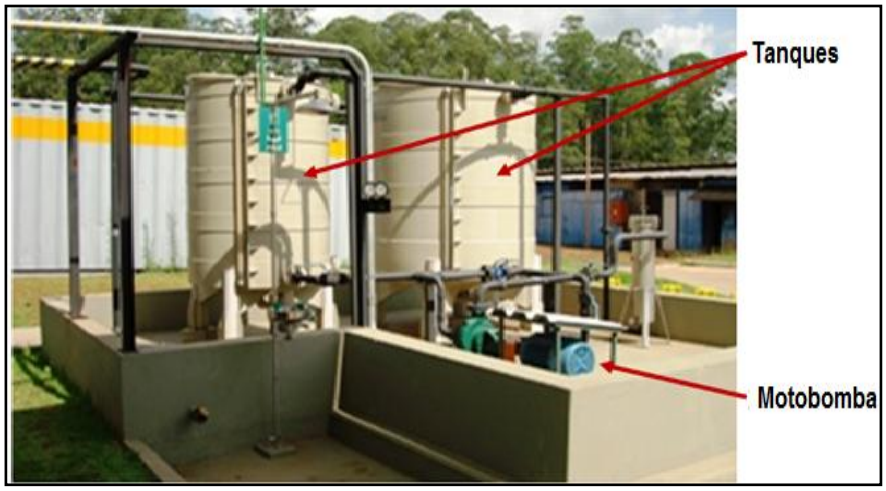


Figura 4.3. Foto dos tanques, bomba e motor do sistema de injeção de líquido.

As Tabelas 4-2 e 4-3 mostram as características dos equipamentos de bombeamento e de aquecimento, respectivamente.

Tabela 4-2. Características da bomba, do motor e do inversor de frequência.

Equipamento	Fabricante	Modelo	Faixa [W]	Rotação [rpm]
Bomba	Imbil	ITAP	-	-
Motor	WEG	-	0 - 15000	0 - 1760
Inversor de frequência	Vacon	NXL	250 - 3000	-

Tabela 4-3. Características da resistência.

Equipamento	Fabricante	Material	Potência [W]	Voltagem [V]	Diâmetro [m]	Sinal de saída [mA]
Aquecedor de passagem	HG Resistência	Aço 1020	40000	380	0,0508	4 - 20
Controlador	Novus N1100	-	-	-	-	4 - 20

Após passar pela resistência, a água passa por um medidor Coriolis onde as seguintes propriedades são medidas: vazão mássica ($\dot{m}$), vazão volumétrica (Q), massa específica (ρ), temperatura (T). Todas essas informações são lidas diretamente no visor do medidor, com exceção da vazão mássica que é enviada para o sistema de aquisição de dados. As características desse medidor são mostradas na Tabela 4-4.

Tabela 4-4. Características do medidor de vazão de líquido (Coriolis).

Equipamento	Fabricante	Tipo	Modelo	Série	Diâmetro [m]	Faixa [Kg/s]	Sinal de saída [mA]
Medidor de vazão	Emerson	Coriolis	Micro-Motion	F200S	0,0508	0 - 12	-
Transmissor	Emerson	Multivariável	MVD 2700	-	-	-	4 - 20

4.1.2 Sistema de injeção de ar comprimido

Após o líquido passar pelo medidor de vazão, o ar é injetado no circuito a fim de gerar o padrão de escoamento bifásico. A Figura 4.4 ilustra esse sistema.

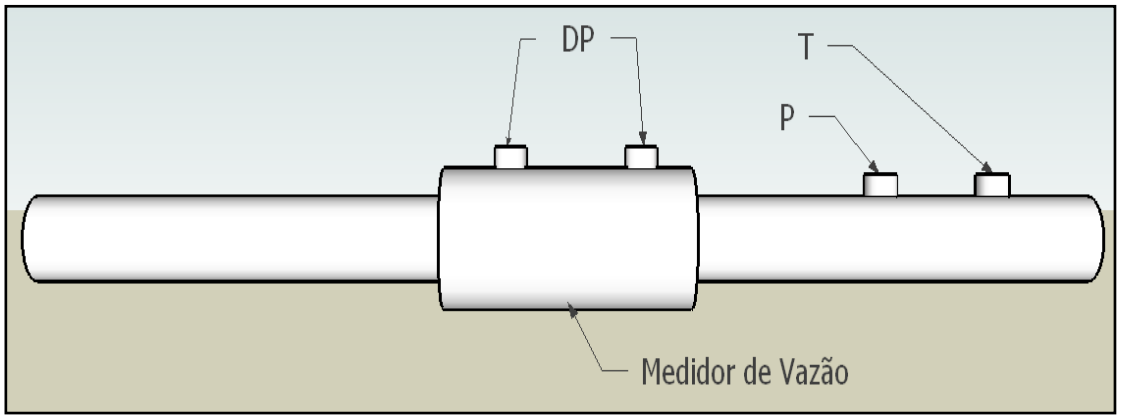


Figura 4.4. Esquema do medidor de vazão de ar.

O ar é comprimido por um compressor de ar rotativo, armazenado em dois cilindros com volume de 1,0 m^3 cada, a fim de evitar grandes variações na pressão. Esse sistema é responsável por abastecer uma linha de 0,0762 m de diâmetro interno, que distribui o ar comprimido para todo o Labpetro. A linha conta com dois purgadores eletrônicos a fim de garantir a baixa umidade do ar durante o uso. As propriedades do compressor são mostradas na Tabela 4-5.

Tabela 4-5. Características do compressor de ar.

Equipamento	Tipo	Potência [CV]	Vazão de saída [m3/h]	Pressão de operação [Pa]
Compressor de ar	Rotativo	50	349,3	960000

Antes de ser injetado no circuito, o ar tem sua temperatura medida por um termopar tipo 'J', e flui através de um elemento de fluxo laminar que envia informações de temperatura e pressão ao computador de vazão. Nesse computador são registradas as seguintes variáveis: pressão (P), temperatura (T), vazão mássica ($\dot{m}$), vazão volumétrica (Q) e massa específica (ρ). O valor da vazão mássica é enviado ao sistema de aquisição de dados, enquanto as outras são

lidas diretamente no computador de vazão (suas características são apresentadas na Tabela 4-6). A Figura 4.5 mostra a estação onde as propriedades do ar são medidas.

Tabela 4-6. Características do computador de vazão de ar.

Equipamento	Fabricante	Série	Versão do software	Versão do hardware	Sinal de saída [mA]
Computador de vazão de ar	Meriam	1900	02.12.166	01.01.00	4/20

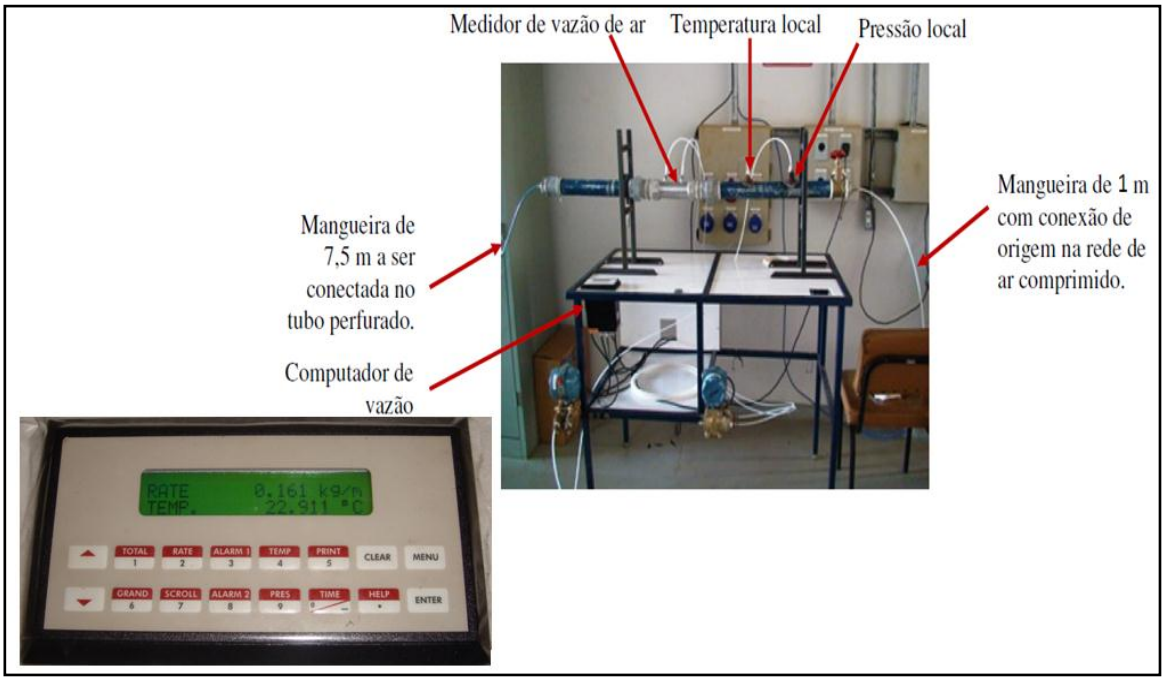


Figura 4.5. Estação de medição de ar.

O ar é injetado através de um tubo de aço de 0,013 m de diâmetro e 0,098 m de comprimento, perfurado ao longo de seu comprimento com a extremidade vedada, posicionado no centro da tubulação onde o líquido está escoando. O tubo possui uma válvula de retenção a fim de evitar que o líquido entre no sistema de injeção de ar. A injeção é realizada dessa forma a fim de melhorar o desenvolvimento do escoamento. O tubo é mostrado na Figura 4.6.

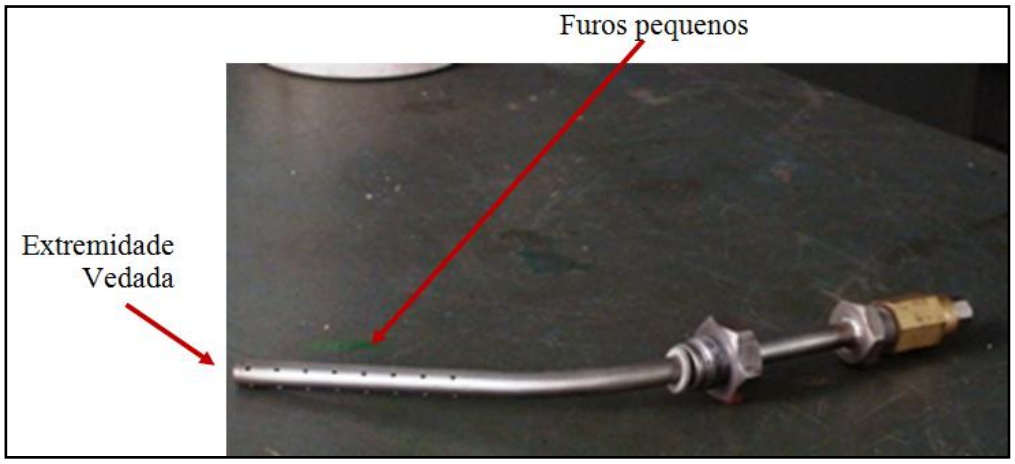


Figura 4.6. Tubo por onde a injeção de ar é realizada no circuito.

4.1.3 Sistema de aquisição de dados

A principal função desse sistema é receber os dados fornecidos pelos sensores de pressão, vazão e temperatura presentes no circuito e informar tais parâmetros para o usuário através de gráficos e tabelas.

Para adquirir esses dados foi usado um módulo *CompactDAQ* fabricado pela *National Instruments* com oito módulos de entrada disponíveis. Desses módulos, apenas dois foram utilizados: um deles, módulo de tensão, recebia os sinais provenientes do termopar situado próximo à seção de visualização, operando na faixa de ± 125 mV, enquanto o outro, módulo de corrente, recebia os sinais provenientes dos sensores de pressão e vazão com valores entre 4 e 20 mA. A Figura 4.7 mostra esse módulo.

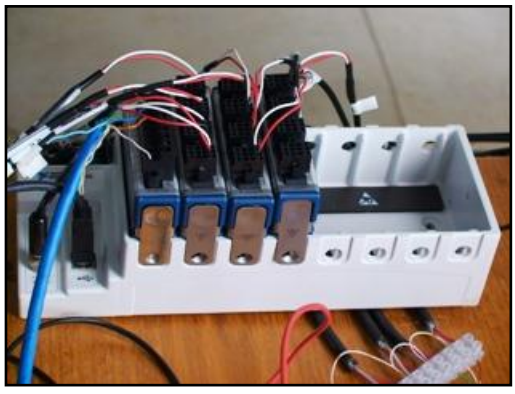


Figura 4.7. Módulo Compact DAQ, responsável pela aquisição de dados.

As informações foram então enviadas a um computador através de um cabo USB e processado através do programa *Labview Signal Express* v 2.0, também da *National Instruments*. A Figura 4.8 mostra o programa utilizado para visualizar as grandezas que foram adquiridas pelo *Compact DAQ (*temperatura e pressão na seção de visualização, vazão mássica de ar no medidor de vazão e vazão mássica de líquido no medidor C*oriolis).*

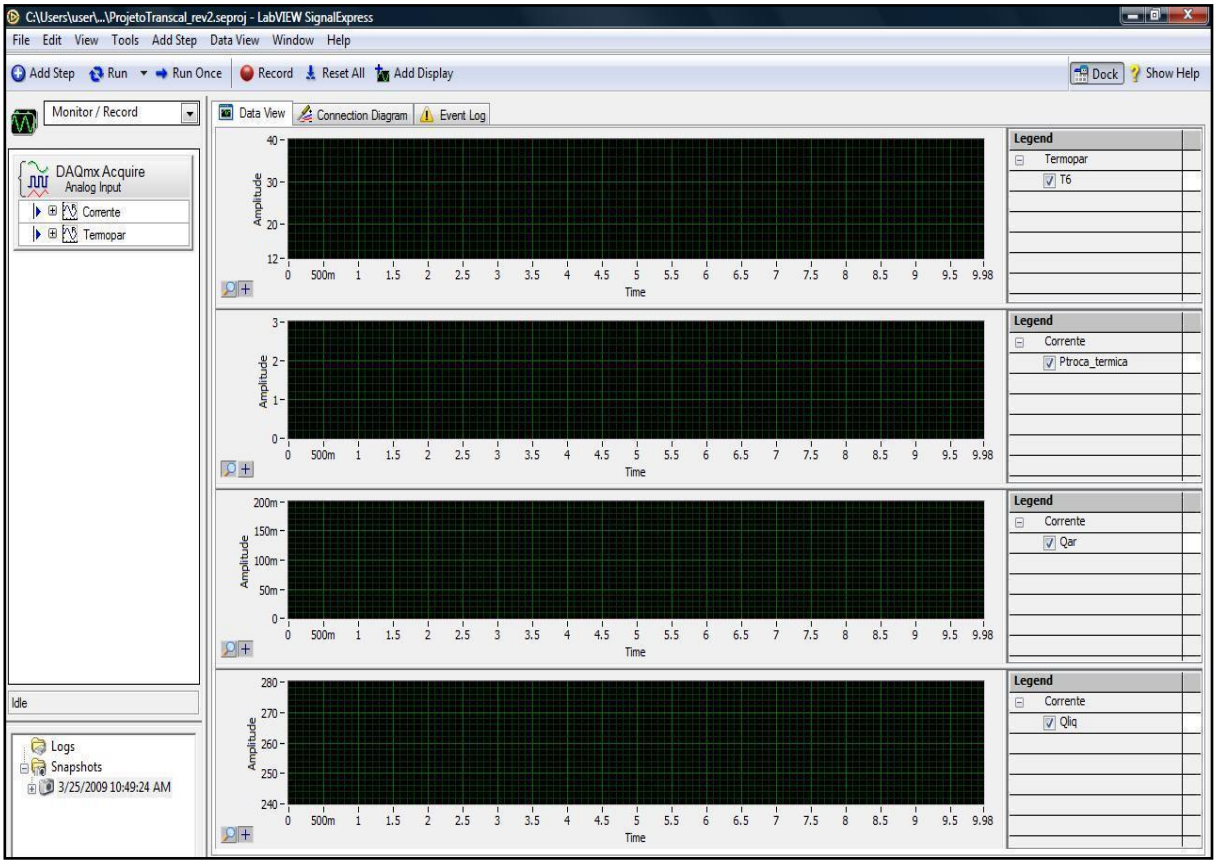


Figura 4.8. Interface do programa *Labview Express*.

4.1.4 Sistema de visualização e de ultrassom

Esse sistema tem o objetivo de adquirir e armazenar as imagens do escoamento obtidas através de uma câmera ultrarrápida e dados dos transdutores ultrassônicos para que os mesmos possam ser tratados posteriormente a fim de obter os parâmetros hidrodinâmicos do escoamento: comprimentos da bolha alongada (l_f), do pistão de líquido (l_s) e da célula unitária (l_c), velocidade da frente da bolha alongada (v_t) e do pistão (v_s), frequência de passagem das células (V_u) e altura do filme de líquido (δ_{ff}).

Esse sistema, mostrado na Figura 4.9, é composto por:

• Seção transparente de acrílico com 0,74 m de comprimento, onde foram instalados os sensores ultrassônicos e capturadas as imagens do escoamento.

• Câmera digital *MotionPro X3*, capaz de capturar até 2000 quadros por segundo, com memória interna de 4 GB e resolução de 1136 x 268;

• *Flash* composto por 19 *Leds* brancos;

• Lâmpada fria, responsável pela iluminação no momento da filmagem;

• Aplicativo *Motion Studio*, responsável pela aquisição e gravação das imagens diretamente no disco rígido do laptop Sony Vaio (Modelo VGN-FZ350AE), com processador Intel Core 2 Duo T8100 (Velocidade: 2.1GHz) e memória RAM de 2GB;

• Dois transdutores de contato *Panametrics* de 2,25 KHz;

• Dois transdutores pulso-eco *Panametrics* de 2,25KHz;

• Duas pulsadoras *Panametrics*, modelos 500PR e 507PR;

• Sistema de aquisição PXI fabricado pela *National Instruments* que possui 8 portas de entrada/saída e adquire dados até uma taxa de 100MSPS (milhões de amostras por segundo);

• Aplicativo *Labview 8.6* fornecido pela *National Instruments*.

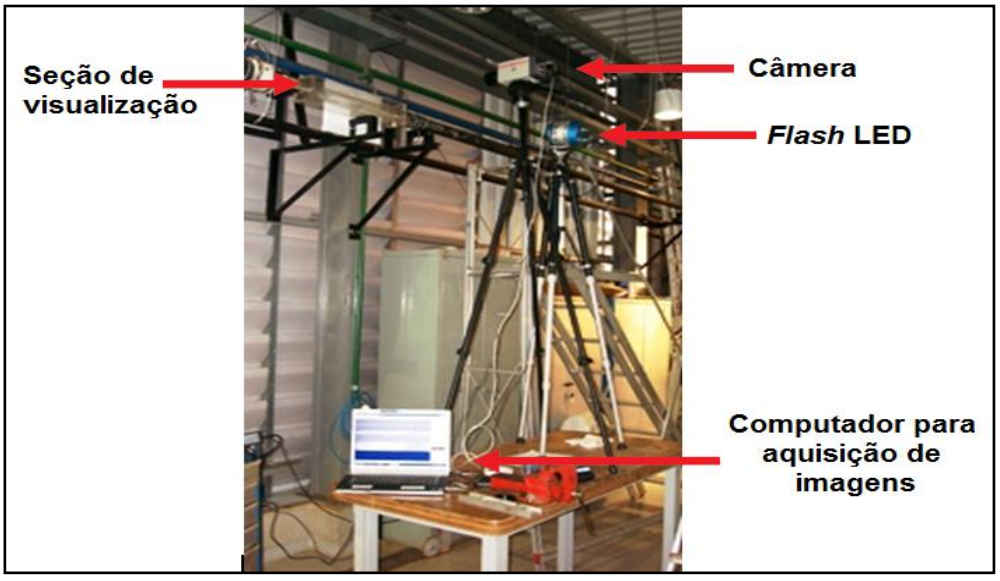


Figura 4.9. Sistema de visualização.

4.1.4.1 Instalação dos transdutores ultrassônicos

Para instalar os transdutores ultrassônicos foram necessários os seguintes componentes: discos de PVC partidos ao meio com rasgos feitos em ângulos predefinidos (Figura 4.10), suportes de acrílico, discos centralizadores e adaptadores de acrílico (Figura 4.11).

Figura 4.10. Disco de PVC.

Figura 4.11. Peças utilizadas para fixar os transdutores.

Os discos de PVC foram fixados na tubulação através de parafusos. Em seguida, os suportes de acrílico foram parafusados nos discos. Os transdutores foram posicionados nos suportes de acrílico junto com os discos centralizadores e os adaptadores (com vaselina em ambas as extremidades para realizar o acoplamento).

Todos os discos centralizadores possuem o mesmo diâmetro para que os transdutores fiquem alinhados na mesma altura, não causando atenuação no sinal por desalinhamento. A Figura 4.12 ilustra um transdutor montado no suporte.

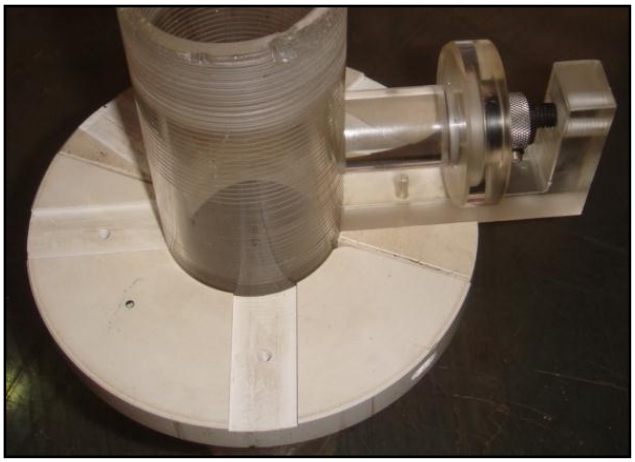


Figura 4.12. Transdutor montado no suporte.

Os transdutores ultrassônicos foram distribuídos em duas estações, sendo uma antes da região onde foi realizada a filmagem, e outra 64,5 cm à frente da primeira estação. A Figura 4.13 mostra as estações fixadas na tubulação com os transdutores e a lâmpada fria para realizar a iluminação no momento da filmagem.

Figura 4.13. Posicionamento das estações de transdutores.

A Figura 4.14 mostra como os transdutores foram distribuídos radialmente ao longo do disco de PVC.

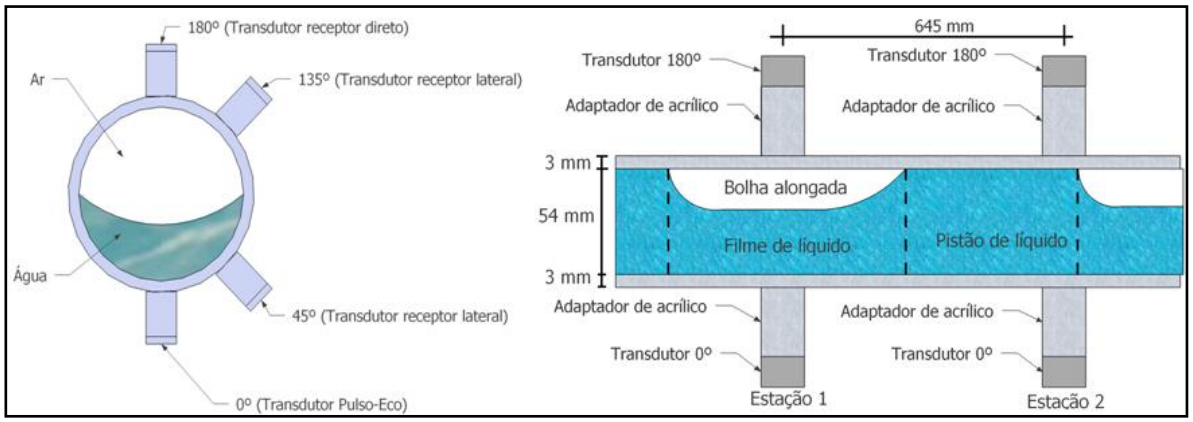
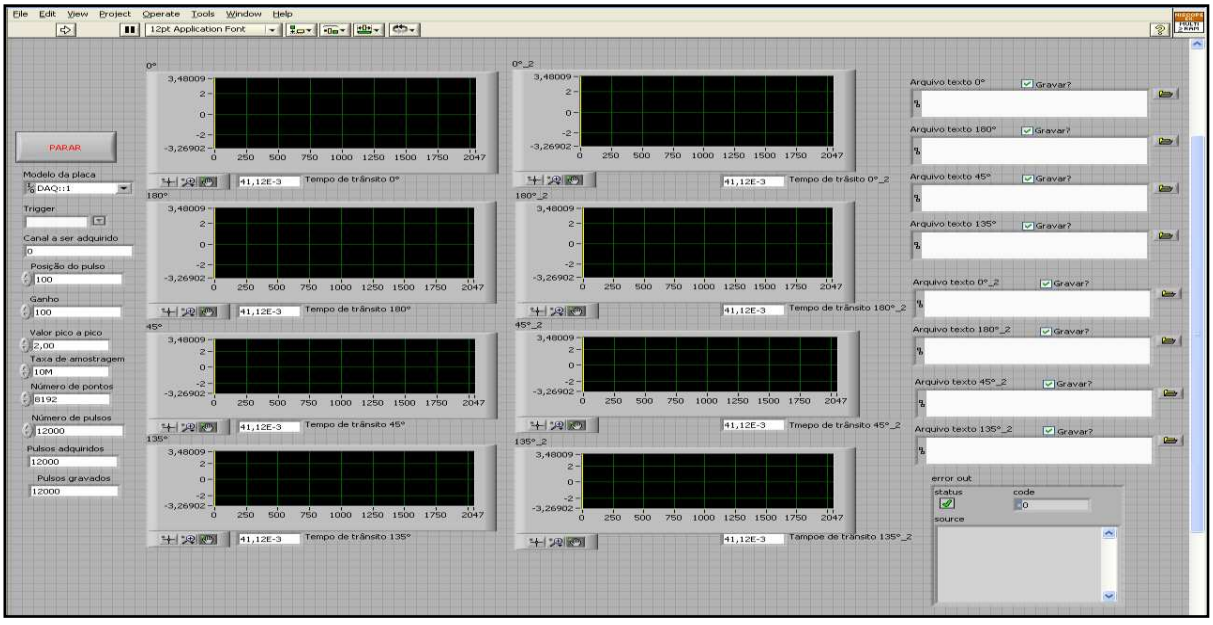


Figura 4.14. Posicionamento dos transdutores.

Na plataforma *Labview* foi elaborado um programa para aquisição dos dados de ultrassom. Esse programa é responsável pela aquisição simultânea dos dados de todos os transdutores. As informações de cada sensor foram armazenadas em um arquivo diferente. Cada arquivo é composto por uma matriz de 12000 linhas por 3000 colunas, referente a 12000 pulsos adquiridos, sendo cada um composto por 3000 pontos, totalizando 36 milhões de pontos por aquisição, por transdutor. A interface do programa é ilustrada na Figura 4.15.

Figura 4.15. Interface para aquisição dos sinais de ultrassom.



4.2 Procedimento experimental

Inicialmente foram realizados testes para saber qual o tipo de iluminação seria utilizado ao longo dos experimentos, dentre elas uma lâmpada fria (posicionada atrás da seção de visualização) e flash LED (posicionada ao lado da câmera, de frente para a seção de visualização) para saber qual seria mais adequado.

Em seguida, foi realizado um teste monofásico a fim de verificar se o tempo que a onda sonora levaria para sair do sensor de 0º e atingir o sensor de 180º estava coerente com o valor teórico. Esse tempo foi obtido através do gráfico da energia de um pulso do sensor posicionado a 180º.

Três condições operacionais, definidas pelas velocidades superficiais das fases, foram selecionadas de modo que as principais características do escoamento intermitente variassem. A Figura 4.16 mostra os pontos que foram selecionados no mapa de padrões de escoamento. Para as condições operacionais #1 e #2 foram realizadas três aquisições com as duas estações de ultrassom, e uma aquisição com a primeira estação de ultrassom, funcionando em sincronismo com a câmera ultrarrápida. Para a condição operacional #3 foram realizadas duas aquisições com ambas as estações de ultrassom, e uma com a primeira estação e a câmera. A Tabela 4-7 mostra as condições operacionais utilizadas.

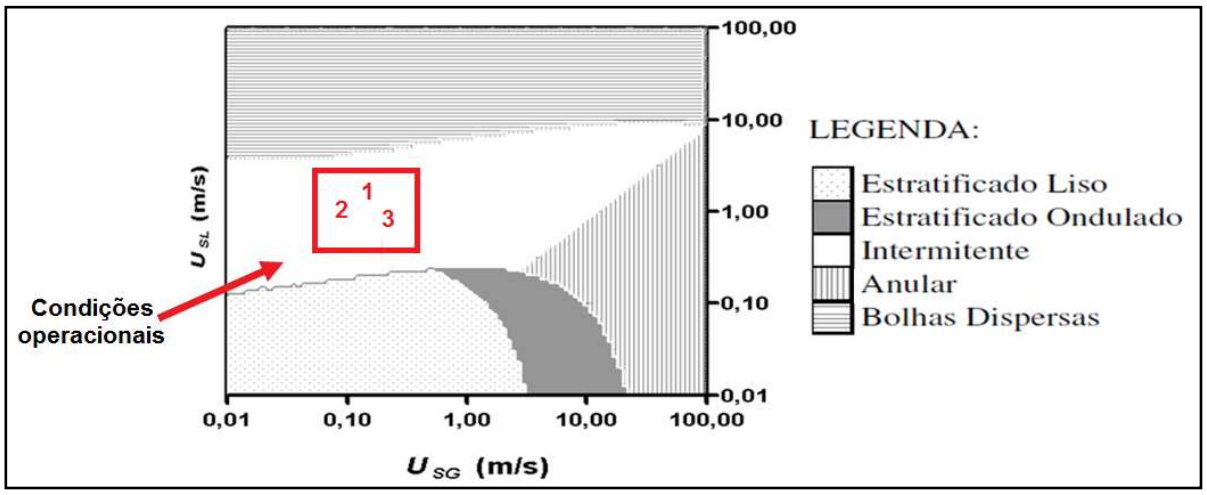


Figura 4.16. Condições operacionais testadas.

Tabela 4-7. Parâmetros das condições operacionais.

Condição operacional	Amostra #	j_L [m/s]	j_G [m/s]	Estação #1	Estação #2	Filmagem
1	1	2,07	0,11	sim	sim	não
	2			sim	sim	não
	3			sim	sim	não
	4			sim	não	sim
2	1	1,49	0,09	sim	sim	não
	2			sim	sim	não
	3			sim	sim	não
	4			sim	não	sim
3	1	0,90	0,14	sim	sim	não
	2			sim	sim	não
	3			sim	não	sim

Condição operacional	Tempo de amostragem [s]	Taxa de amostragem [MHz]	Taxa de pulsação dos transdutores [KHz]	Pulsos por amostra	Velocidade de filmagem [Quadros/s]
1	6,0	20	2,25	12.000	1.000
2	6,0	20	2,25	12.000	1.000
3	5,5	20	2,25	12.000	1.000

As filmagens foram realizadas a uma taxa de aquisição de 1000 quadros por segundo durante 6 segundos para as condições operacionais #1 e #2, e 5,5 segundos para a condição #3. Os transdutores pulsavam a uma taxa de 2,25 MHz. A taxa de aquisição dos dados era de 20 MHz para evitar o efeito de *aliasing*, que ocorre quando a taxa de amostragem é muito mais elevada que a taxa na qual o fenômeno ocorre de modo que o mesmo ponto é adquirido mais de

uma vez causando uma sobreposição de pontos. Como o PXI não possuía entradas suficientes para todos os transdutores e a câmera, não foi possível sincronizar as duas estações de ultrassom com a filmagem.

O sinal de ultrassom foi gerado excitando-se um transdutor piezelétrico com um sinal elétrico. De modo análogo, quando esses transdutores recebem um sinal, é possível medir a variação do mesmo. Como o sinal emitido atravessa um meio, no caso composto por acrílico e água, o sinal recebido fornece diversas informações sobre a influência do padrão de escoamento na onda de ultrassom (França *et al*., 2007). Então é possível extrair informações sobre o material ou escoamento que está sendo investigado através das características do sinal recebido. A Figura 4.17 ilustra a técnica utilizada no momento em que uma bolha alongada está passando em frente aos sensores. Como o ultrassom não se propaga no ar, a onda é refletida não chegando ao transdutor de 180º.

Às vezes, nem todo o sinal que é emitido pelo sensor de 0º é refletido para o mesmo; parte devido à atenuação no sinal e parte devido à reflexão para outras regiões que não o sensor, como mostra o feixe 3.a, refletido na bolha alongada a partir do feixe 3, indicado na Figura 4.17.

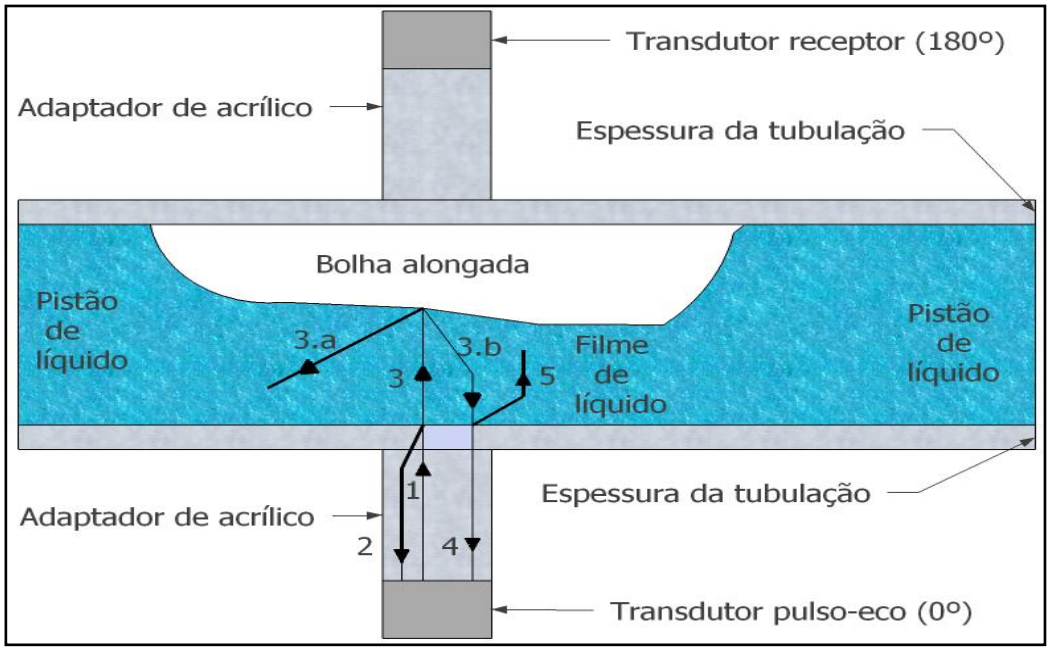


Figura 4.17. Método utilizado para aquisição dos sinais.

Nos itens 4.3 e 4.4 serão descritos os procedimentos utilizados para tratamento dos dados de ultrassom e filmagem, respectivamente, e quais parâmetros foram possíveis extrair dos dados obtidos.

Em seguida, os resultados obtidos de ambas as técnicas serão apresentados e comparados entre si.

4.3 Tratamento dos dados de ultrassom

Considerando a velocidade do ultrassom na água de 1480 m/s e 2730 m/s no acrílico (Halliday *et al*., 2002), e conhecendo a soma dos comprimentos dos adaptadores, a espessura da tubulação (8,305 mm) e o diâmetro interno da tubulação (54 mm), foi possível calcular quanto tempo a onda levaria para chegar ao sensor de 180º. Esse cálculo foi realizado através da equação (4.1).

$$t = \frac{espessura\ do\ trecho\ em\ acrílico}{velocidade\ do\ ultrassom\ no\ acrílico} + \frac{diâmetro\ interno\ do\ tubo}{velocidade\ do\ ultrassom\ na\ água} \quad (4.1)$$

Através dos pulsos adquiridos nos ensaios com as estações de ultrassom, foi possível elaborar os gráficos com os tempos de trânsito de cada pulso. Através desses gráficos os parâmetros hidrodinâmicos do escoamento foram calculados.

4.3.1 Velocidade da bolha alongada (v_t)

Para obter a velocidade da bolha, foram verificados os instantes em que a frente da bolha passava pela primeira estação (t1) e pela segunda estação (t2). Como o espaço entre as estações era conhecido (0,645 m), logo a velocidade é calculada através da equação (4.2). A Figura 4.18 ilustra os gráficos de tempo de trânsito de uma bolha alongada para as duas estações e os tempos t1 e t2.

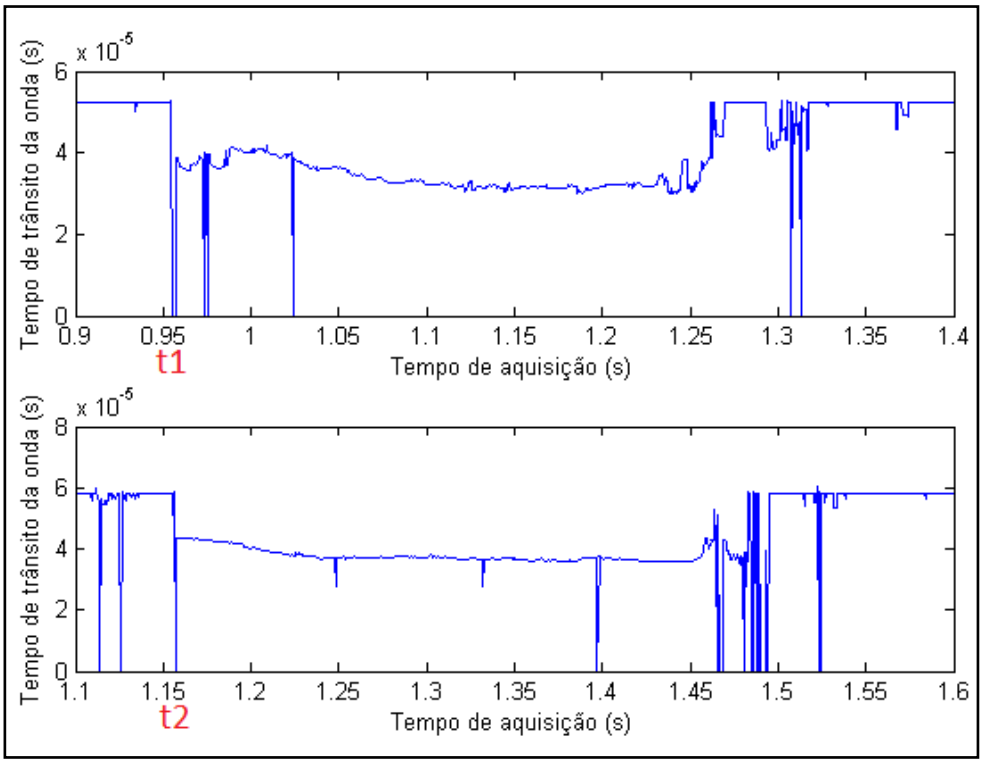


Figura 4.18. Instantes em que uma bolha alongada passa pela primeira e pela segunda estação.

$$v_t = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{0{,}645m}{t_2 - t_1} \tag{4.2}$$

4.3.2 Comprimento da bolha alongada (l_f)

Tendo a velocidade da bolha alongada, seu comprimento é estimado multiplicando a velocidade pelo tempo no qual a bolha passava em frente ao sensor de 0º (tempo de passagem entre a frente (t_{f1}) e a cauda da bolha (t_{c1})). Esse procedimento é realizado para ambas as estações. A Figura 4.19 mostra os tempos utilizados para calcular o comprimento na equação (4.3).

$$l_f = v_t.(t_{c1} - t_{f1}) \tag{4.3}$$

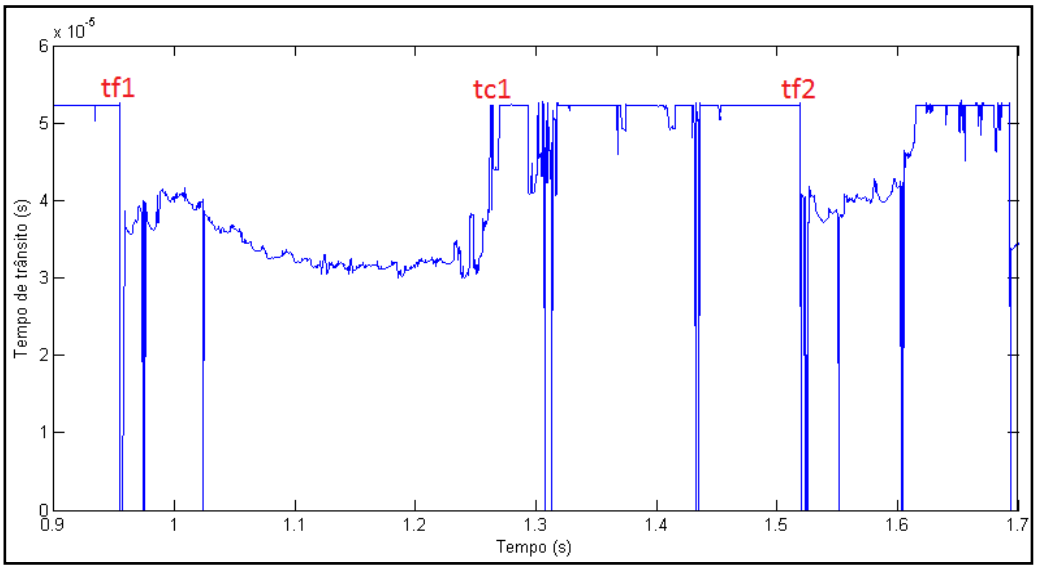


Figura 4.19. Tempos utilizados para calcular o comprimento da bolha alongada.

4.3.3 Comprimento do pistão de líquido (l_s)

O comprimento do pistão foi estimado de forma semelhante ao comprimento da bolha alongada. A diferença são os tempos utilizados: o instante em que o final da cauda da bolha alongada, que está à frente do sensor pulso-eco, e o instante em que a frente da próxima bolha passa em frente ao sensor. A Figura 4.19 ilustra os tempos utilizados na equação (4.4).

$$l_s = v_t.(t_{f2} - t_{c1}) \tag{4.4}$$

4.3.4 Frequência de passagem da célula unitária (υ_u)

Para o cálculo da frequência, são verificadas quantas células foram obtidas nas imagens. Para esse cálculo só foram consideradas células unitárias inteiras, ou seja, que fosse possível visualizar toda a bolha alongada e todo o pistão de líquido. A Figura 4.20 ilustra os instantes em que a primeira bolha alongada e o pistão de líquido passaram pelo sensor de 0º. Logo, dividindo a quantidade de células unitárias por essa diferença de tempo, é possível calcular a frequência de passagem das bolhas (Equação 4.5).

$$\upsilon_u = \frac{Quantidade\ de\ células\ unitárias}{t_f - t_i} \tag{4.5}$$

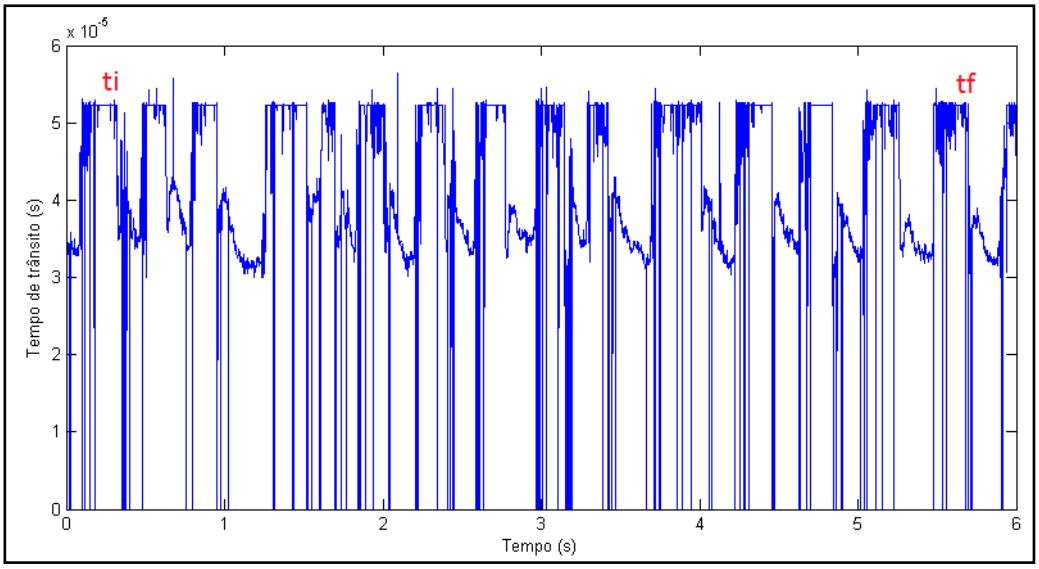


Figura 4.20. Tempos utilizados para calcular a frequência de passagem de bolhas.

4.3.5 Detecção de estruturas a partir do sensor de 180º

A partir dos dados de energia recebidos pelo sensor de 180º, foi elaborado um programa para identificar a estrutura (pistão de líquido ou bolha alongada). A lógica do programa foi a seguinte: caso a energia do pulso fosse maior do que metade da média de todos os pulsos, o valor 1 era armazenado em um vetor, indicando que o pistão de líquido escoava, caso contrário o valor 0 era armazenado. O fluxograma desse programa é mostrado na Figura 4.21.

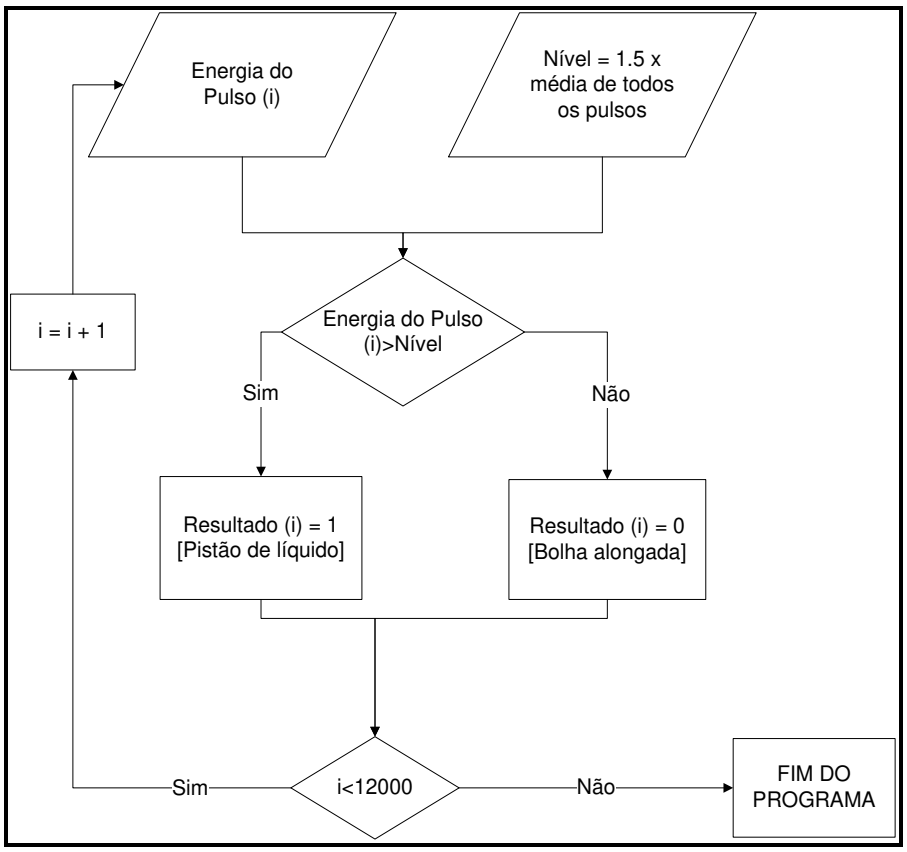


Figura 4.21. Fluxograma para tratamento do sinal de 180^{o}.

4.3.6 Detecção de estruturas a partir do sensor de 0º

Diferentemente do tratamento dos dados do sensor posicionado a 180^{o}, a detecção de estruturas, aplicada aos dados provenientes do sensor de 0^{o}, foi realizada a partir do tempo de trânsito e não da energia. Antes de detectar as estruturas, foi necessário filtrar o sinal. A seguir está a sequência seguida pelo algoritmo para realizar essa filtragem, a partir do gráfico de tempo de trânsito mostrado na Figura 4.22

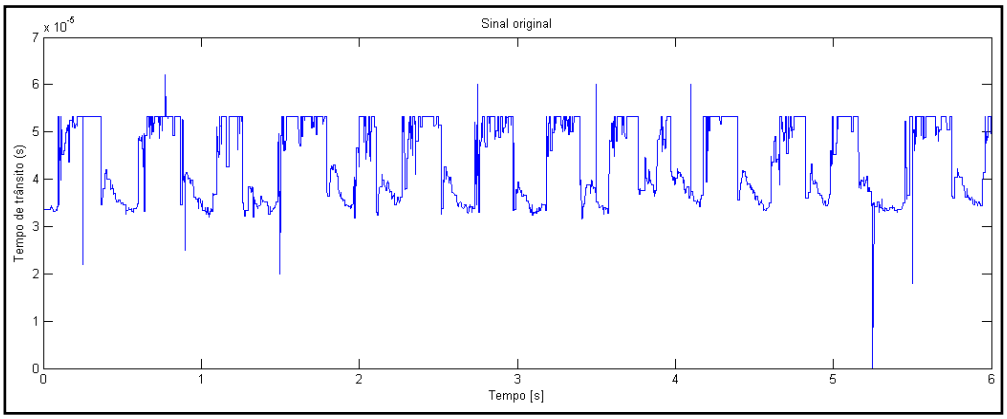


Figura 4.22. Sinal original.

1) Uma rotina foi elaborada para excluir do sinal pontos que estavam acima do tempo máximo esperado da duração de um pulso (tempo necessário para o pulso atingir a parte superior da tubulação) e pontos de pulsos que foram emitidos pelo sensor, mas não retornaram. Caso o tempo de trânsito, armazenado no vetor 'b', do pulso estivesse dentro do limite esperado, o valor do pulso era armazenado no elemento d (i), caso contrário o elemento d (i) receberia o valor do elemento anterior d (i-1). Logo o vetor 'd' seria o vetor 'b' com todos os elementos dentro dos limites esperados. A Figura 4.23 mostra o resultado desse primeiro passo;

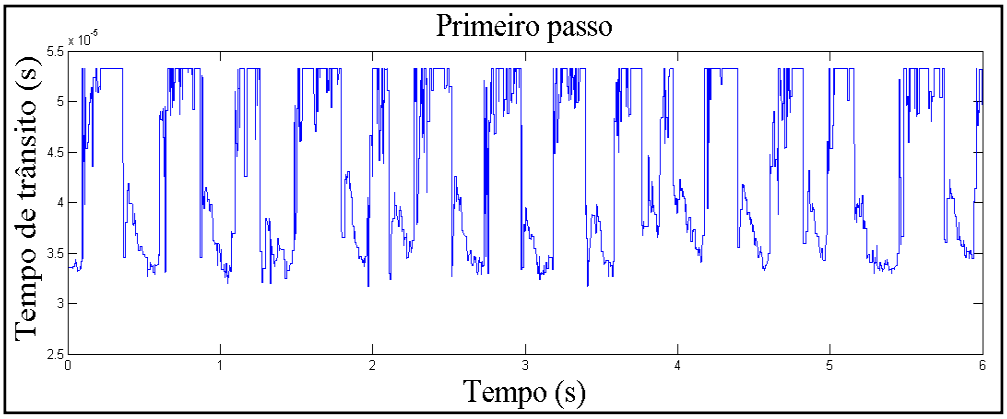


Figura 4.23. Primeiro passo do processo de filtragem.

2) Todos os elementos do vetor ‘d’ eram comparados com 90% do valor do limite superior. Caso o tempo de trânsito fosse menor que essa comparação, o elemento c (i) receberia o valor do limite inferior; caso contrário, receberia o valor do limite superior. Logo o vetor ‘c’ continha valores que eram iguais ao limite superior ou ao inferior. O resultado desse passo é mostrado na Figura 4.24;

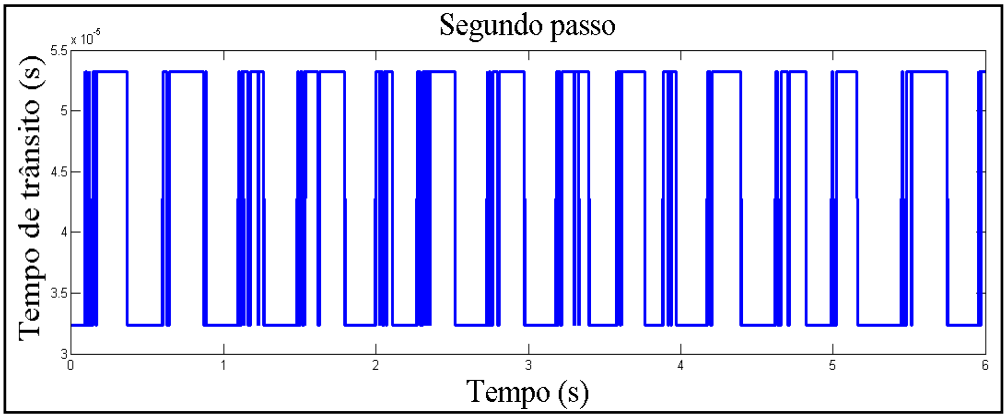


Figura 4.24. Segundo passo do processo de filtragem.

3) Era feita uma análise para saber se os primeiros pontos do vetor ‘c’ estavam no limite superior, correspondente ao pistão de líquido ou no inferior, correspondente à bolha alongada. Esses valores eram armazenados no vetor ‘e’. Um vetor auxiliar composto por n elementos era comparado com uma parte do vetor ‘c’. Essa variável n é definida como a menor quantidade de pontos que os elementos do vetor ‘c’ precisam ser iguais ao limite inferior para caracterizar a passagem de uma bolha alongada. Caso a comparação fosse igual, os elementos do vetor ‘e’ eram igualados ao limite inferior até que um valor igual ao limite superior fosse encontrado no vetor ‘c’. Caso contrário, o valor do limite superior era armazenado no vetor ‘e’ até que uma sequência de valores iguais ao limite inferior fosse encontrada. O resultado desse passo pode ser observado na Figura 4.25;

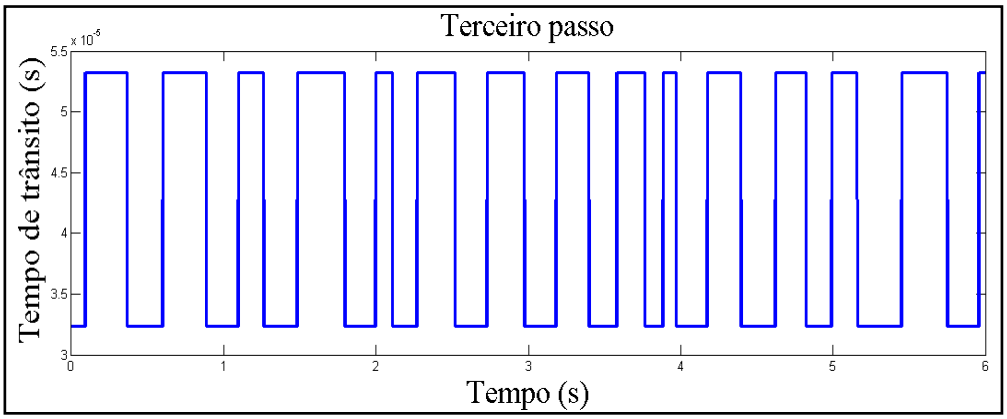


Figura 4.25. Terceiro passo do processo de filtragem.

4) Os intervalos onde ocorreram as transições entre os limites superior e inferior foram armazenados em outro vetor para que a média da espessura do filme de líquido pudesse ser armazenada. O elemento (i) do vetor 'f' receberia o valor do limite superior quando o valor do elemento e (i) também fosse igual ao elemento superior. Quando uma sequência de elementos do vetor 'e' fosse igual ao limite inferior, à sequência do vetor 'f' receberia a média da sequência correspondente do vetor 'd'. O resultado desse processo é ilustrado na Figura 4.26.

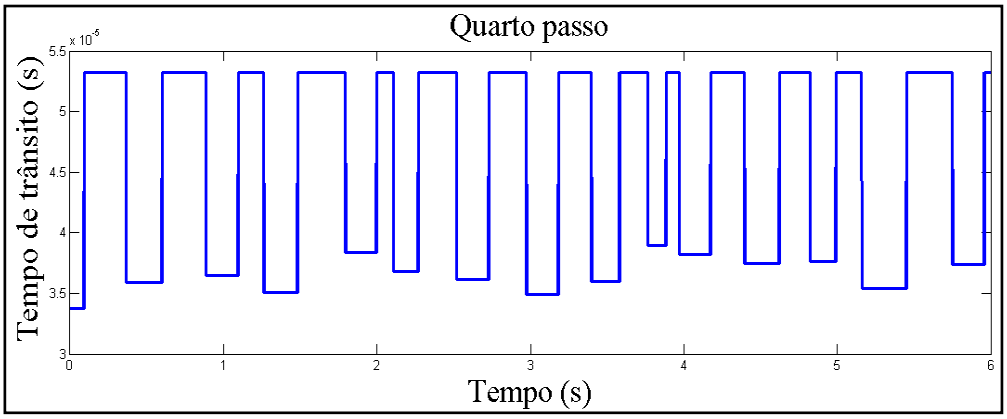


Figura 4.26. Último passo do processo de filtragem.

A Figura 4.27 mostra como o sincronismo entre as técnicas foi utilizado para identificar as estruturas que passavam em frente ao sensor e verificar se o filtro estava funcionando como deveria. Esse sincronismo foi feito através de um programa desenvolvido em *LABVIEW* de

modo que quando a aquisição dos dados provenientes dos transdutores ia começar, um pulso era enviado para a câmera através de um cabo para que a mesma também iniciasse a aquisição.

A Figura 4.28 mostra um fluxograma que resume as etapas realizadas no processo de filtragem do sinal. Esse processo de filtragem foi necessário para que a área transversal ocupada pelo gás, o volume e a vazão de cada fase pudessem ser calculadas conforme o próximo item.

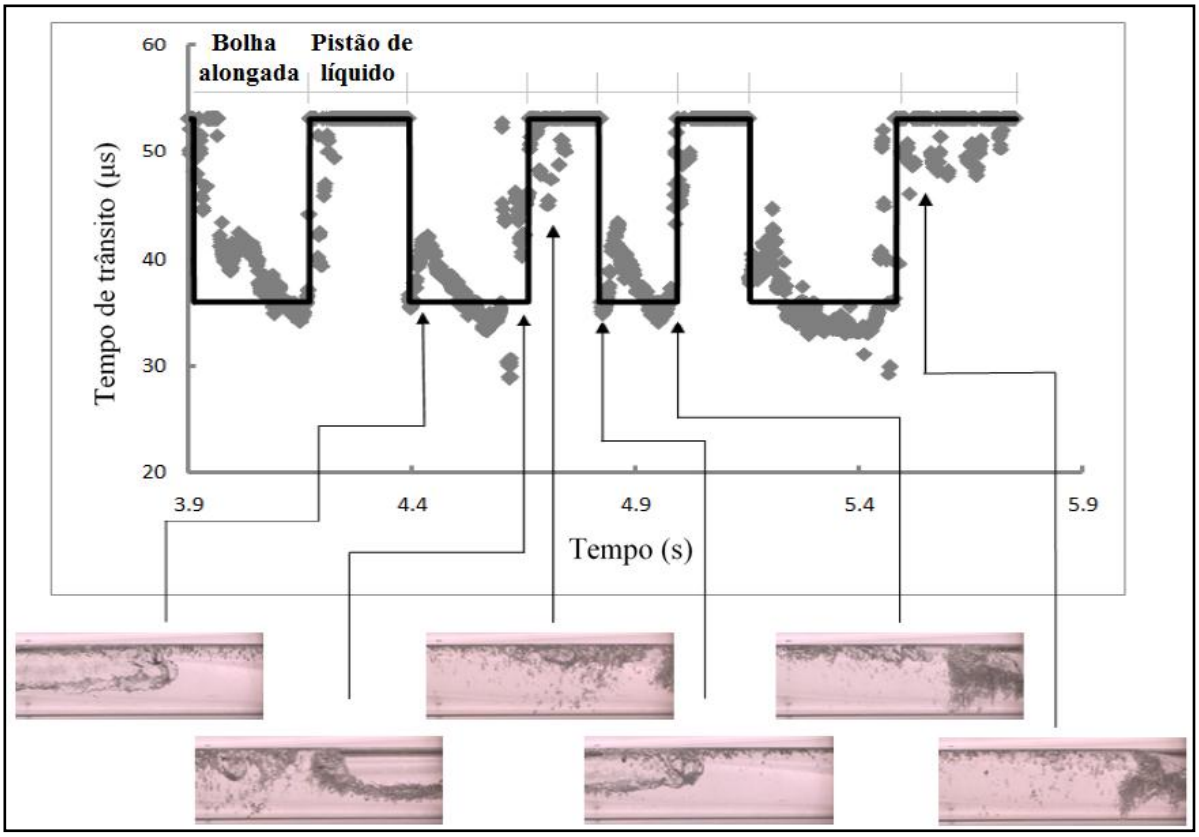


Figura 4.27. Sincronismo entre as técnicas.

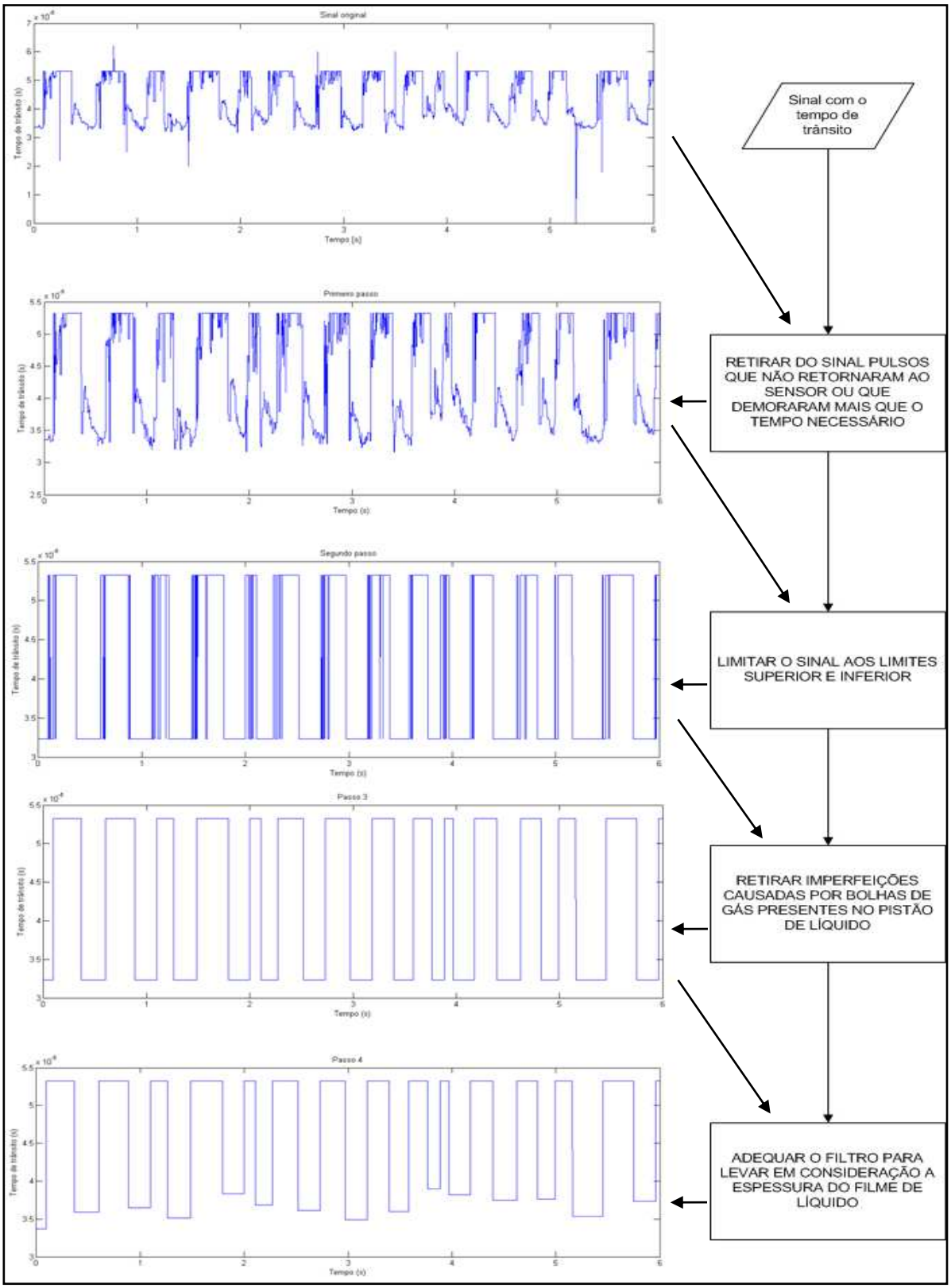


Figura 4.28. Fluxograma para tratamento do sinal de trânsito.

4.3.7 Área transversal ocupada pelo gás (A_G)

O cálculo da área transversal ocupada pelo gás é o primeiro passo para que se possa calcular a vazão das fases. Esse cálculo depende da espessura do filme de líquido, daí a importância da filtragem do sinal. Dependendo do seu valor, igual, menor ou maior que o raio interno da tubulação, o procedimento de cálculo é diferente. A seguir são mostrados os três diferentes tipos de cálculos para a área transversal.

4.3.7.1 δ_{ff} = r

Esse é o caso mais simples, onde a área transversal ocupada pelo gás é igual à metade da área do círculo com diâmetro igual ao diâmetro interno da tubulação. Logo:

$$A_G = \frac{\pi r^2}{2} \tag{4.6}$$

4.3.7.2 δ_{ff} < r

Considerando a Figura 4.29 onde a espessura do filme de líquido é menor que o raio interno da tubulação, a área a ser calculada é a área ocupada pelo gás, indicada na figura pela cor branca. Para esse cálculo é necessário saber o comprimento do segmento da interface água-ar.

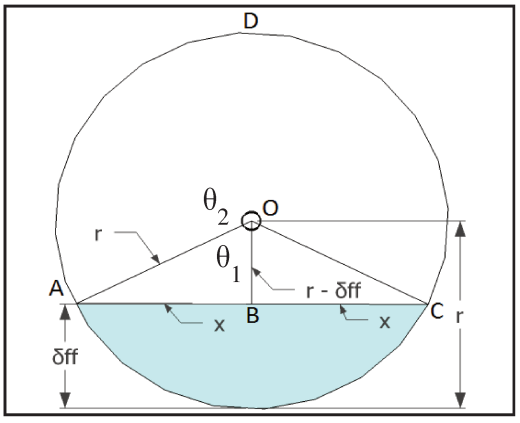


Figura 4.29. Cálculo da área transversal do gás com δ_{ff} < r.

Através do triângulo AOC da Figura 4.29 é possível calcular o comprimento do segmento e assim a área ocupada pelo gás. A área ocupada pelo gás é igual à área do triângulo AOC somada à área do arco ACD. Logo,

$$A_G = A_\Delta + A_A \tag{4.7}$$

Considerando o triângulo OAB, o lado AB é calculado por Pitágoras:

$$x = \sqrt{r^2 - (r - \delta_{ff})^2} \tag{4.8}$$

Como os triângulos OAB e OBC são semelhantes, o comprimento do segmento AC é igual a:

$$AC = 2.\sqrt{r^2 - (r - \delta_{ff})^2} \tag{4.9}$$

A área do triângulo AOC é dada por:

$$A_\Delta = \sqrt{r^2 - (r - \delta_{ff})^2}.(r - \delta_{ff}) \tag{4.10}$$

O ângulo formado entre a hipotenusa e o cateto OB do triângulo AOB é:

$$\theta_1 = arcos(\frac{r - \delta_{ff}}{r}) \tag{4.11}$$

Logo o ângulo formado pelo arco AOCD é:

$$\theta_2 = 360° - 2.\theta_1 \tag{4.12}$$

A área do arco AOCD é:

$$A_A = \frac{\pi r^2 \theta_2}{360} \tag{4.13}$$

Logo, a área ocupada pelo gás é:

$$A_G = A_\Delta + A_A = \sqrt{r^2 - (r - \delta_{ff})^2}.(r - \delta_{ff}) + \frac{\pi r^2 \theta_2}{360} \tag{4.14}$$

4.3.7.3 δ_{ff} > r

De modo análogo ao que foi feito no item anterior, a área transversal ocupada pelo gás é calculada quando a espessura do filme de líquido é maior que o raio. Os cálculos são realizados baseados na Figura 4.30.

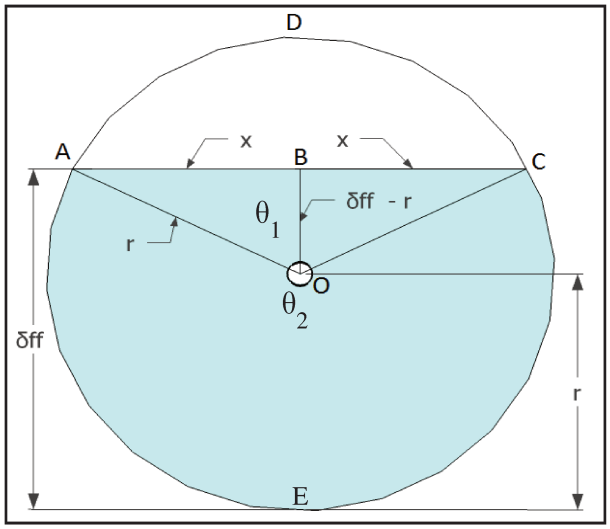


Figura 4.30. Cálculo da área transversal do gás com δff > r.

Nesse caso, a área transversal ocupada pelo gás é igual à área transversal da tubulação subtraída da área do triângulo AOC e do arco ACE, portanto:

$$A_G = A_I - A_\Delta + A_A \tag{4.15}$$

A área interna da tubulação é igual a πr^2.

Para saber o comprimento do segmento AC é necessário calcular o valor de x:

$$x = \sqrt{r^2 - (\delta_{ff} - r)^2} \tag{4.16}$$

Logo o comprimento do arco AC é:

$$AC = 2.\sqrt{r^2 - (\delta_{ff} - r)^2} \tag{4.17}$$

Os triângulos AOB e BOC são semelhantes, portanto a área do triângulo AOC é:

$$A_\Delta = \sqrt{r^2 - (\delta_{ff} - r)^2}.(\delta_{ff} - r) \tag{4.18}$$

O ângulo θ_2 é calculado de forma análoga ao item anterior:

$$\theta_2 = 360° - 2.\theta_1 \tag{4.19}$$

onde θ_1 é:

$$\theta_1 = arcos(\frac{\delta_{ff} - r}{r}) \tag{4.20}$$

Logo, o arco ACE vale:

$$A_A = \frac{\pi r^2 \theta_2}{360} \tag{4.21}$$

Por fim, a área da seção transversal vale:

$$A_G = A_I - A_\Delta - A_A = \pi r^2 - \sqrt{r^2 - (\delta_{ff} - r)^2}.(\delta_{ff} - r) - \frac{\pi r^2 \theta_2}{360} \tag{4.22}$$

4.3.8 Volume das fases (V)

Para o cálculo dos volumes de gás e líquido, foi assumido que não existiam bolhas de gás no pistão de líquido e que a área transversal da bolha alongada não variava ao longo do seu comprimento. A Figura 4.31 mostra o modelo utilizado para o cálculo das vazões.

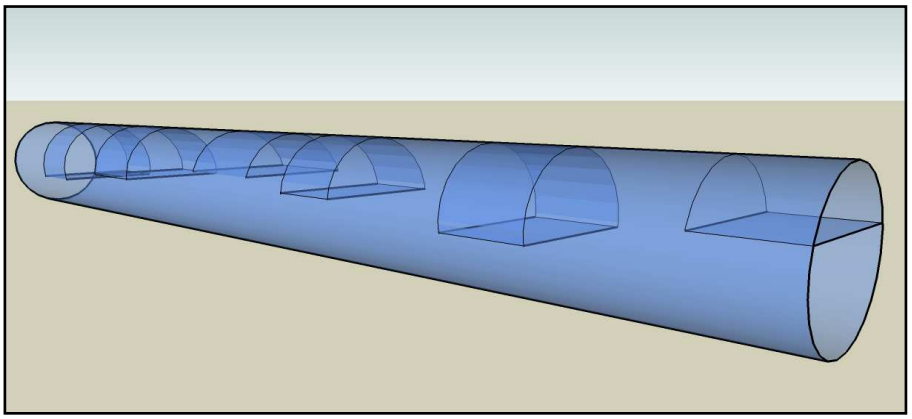


Figura 4.31. Modelo usado para calcular os volumes das fases.

4.3.8.1 Volume de gás (V_G)

O volume de cada bolha alongada é obtido multiplicando-se o valor de sua área, calculada no item anterior, pelo seu comprimento. Logo, o volume total de gás em cada aquisição é igual ao somatório dos volumes de cada bolha alongada (Equação 4.23).

$$V_G = \sum A_G . l_f \tag{4.23}$$

4.3.8.2 Volume de líquido (V_L)

O volume de líquido é calculado subtraindo-se o volume de gás (V_G) do volume total da aquisição. Esse volume total é igual à área interna da tubulação se multiplicado pelo somatório dos comprimentos das células unitárias obtidas durante a aquisição (Equação 4.24).

$$V_L = \pi r^2 . \sum l_U - V_G \tag{4.24}$$

4.3.9 Vazão das fases (Q)

As vazões das fases foram obtidas dividindo o volume calculado no item anterior, pelo tempo de aquisição da condição operacional (t), que é de 6 segundos para as duas primeiras condições e 5,5 segundos para a terceira. Portanto:

$$Q_G = \frac{V_G}{t} \tag{4.25}$$

e

$$Q_L = \frac{V_L}{t} \tag{4.26}$$

4.4 Tratamento das imagens

Aqui será detalhado o procedimento adotado para obter as características do escoamento utilizando as imagens.

4.4.1 Velocidade da bolha alongada (v_t)

Para obter os parâmetros das imagens, o programa *Image Pro* foi utilizado. O procedimento adotado para tratar as imagens foi o seguinte:

1) Com a imagem de uma régua posicionada no centro da seção de visualização, foi feita a calibração do programa *Image Pro,* que permitiu a conversão de pixels para centímetros.

2) Os quadros em que a frente da bolha alongada começava e terminava de ser mostrados na tela, foram identificados.

3) No quadro em que a bolha começava a aparecer na tela, foi medida a distância até o limite esquerdo da imagem como mostra a Figura 4.32 (a).

4) No último quadro em que a frente da bolha podia ser vista na tela, foi medida a distância da sua frente até o limite direito da imagem, onde a altura da posição a ser medida era a mesma da medida tomada no item 3, como mostra a Figura 4.32 (b).

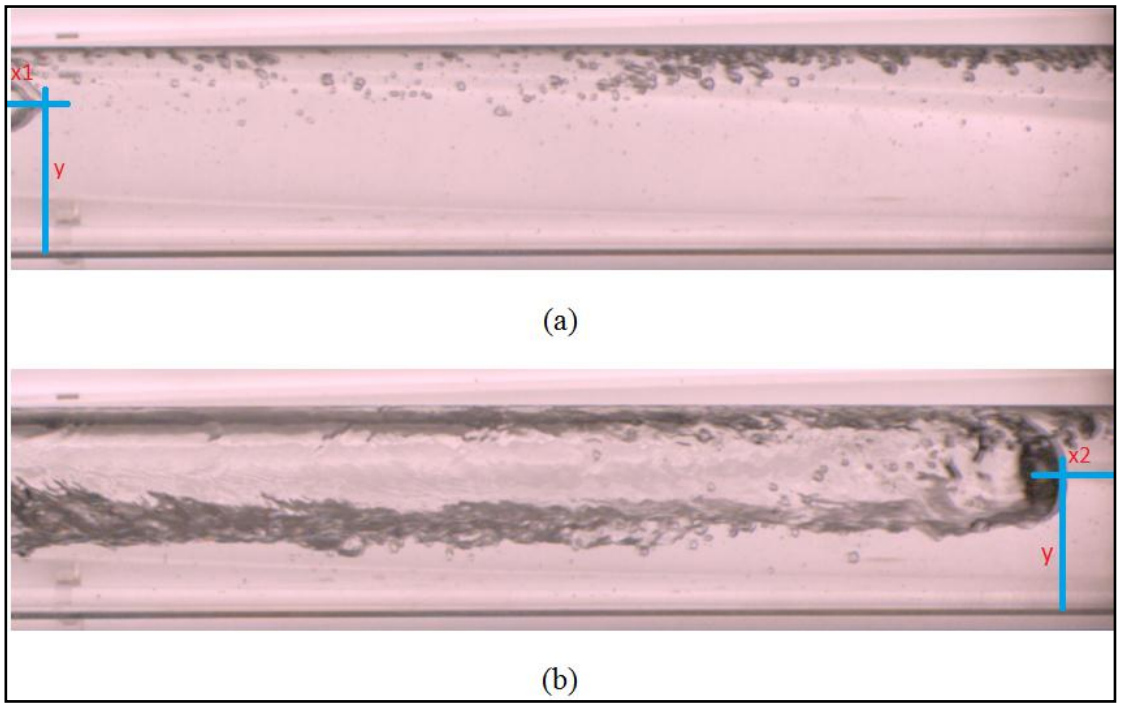


Figura 4.32. (a) Após a bolha aparecer na imagem (b) Antes que a bolha deixe a imagem.

5) As distâncias calculadas nos itens 3 e 4 são subtraídas da distância horizontal total da imagem que é fixa (0,3138 m) como mostra a equação (4.27).

$$\Delta s = 0{,}3138m - x_1 - x_2 \tag{4.27}$$

6) Como as imagens de cada aquisição são gravadas em ordem crescente de 0000 até 6000 (correspondente a 6000 quadros em 6 segundos de aquisição), então a diferença da numeração das imagens dividida pela taxa de aquisição da câmera (1000 quadros/segundo), foi usada para calcular o tempo que a bolha levou para percorrer o espaço calculado no item 5, equação (4.28).

$$\Delta t = \frac{Quadro_{final} - Quadro_{inicial}}{1000} \tag{4.28}$$

7) Dividindo a distância calculada no item 5 pelo tempo medido no item 6, foi possível calcular a velocidade da bolha. Esse procedimento foi realizado para cada pistão de ar que pôde ser observado. A velocidade final de cada condição experimental foi obtida através da média

aritmética das velocidades de cada bolha. A equação (4.29) mostra como a velocidade é calculada.

$$v_t = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{0{,}3138\ m - x_1 - x_2}{(Quadro_{final} - Quadro_{inicial})/1000} \tag{4.29}$$

4.4.2 Comprimento da bolha alongada (l_f)

Assumindo que a velocidade da bolha alongada é a velocidade média da bolha, foi fixado um ponto no limite direito da imagem no quadro em que a frente da bolha atingisse esse limite. Então, os quadros foram avançados até que a cauda da bolha atinja esse ponto. Multiplicando-se a velocidade da frente da bolha pela diferença de quadros, e dividindo-se pela frequência de aquisição, foi possível calcular o comprimento da bolha como mostra a equação (4.30).

$$l_f = v_t . \frac{Quadro_{final} - Quadro_{inicial}}{1000} \tag{4.30}$$

4.4.3 Velocidade do pistão de líquido (v_S)

Para estimar a velocidade do pistão de líquido, foi considerado que a velocidade de uma bolha muito pequena, escolhida de forma a ter uma trajetória retilínea, teria a mesma velocidade do líquido. Então, o mesmo procedimento adotado para identificar a velocidade da bolha alongada pistão de ar foi usado para estimar a velocidade dessa bolha.

4.4.4 Comprimento do pistão de líquido (l_s)

Com a velocidade do pistão de líquido estimada, o tempo de passagem do pistão de líquido é determinado pela diferença de quadros, entre o quadro em que um pistão de ar termina e o próximo inicia em um ponto fixo na imagem, dividida pela taxa de aquisição da câmera. Então, o tempo é multiplicado pela velocidade, estimando o comprimento do pistão.

Nesse procedimento também foi assumido que o pistão de líquido escoa com velocidade constante.

4.4.5 Frequência de passagem da célula unitária (υ_u)

Para estimar a frequência da célula unitária através das imagens, um ponto imaginário foi fixado na imagem e realizada uma contagem do número de bolhas passando pelo ponto. Só foram consideradas para a contagem as células unitárias completas, em que foi possível visualizar completamente a bolha alongada e o pistão de líquido. Pela diferença de quadros, entre a frente da primeira bolha, que estava no ponto imaginário, e a frente da última bolha alongada, que não fosse possível observar a célula unitária completamente, foi calculado o tempo de passagem das células unitárias. Logo, a frequência foi calculada pela equação (4.31).

$$\upsilon_u = \frac{Quantidade\ de\ células\ unitárias}{(Quadro_{final} - Quadro_{inicial})/1000} \tag{4.31}$$

4.5 Critério de *Student*

Em um experimento prático se obtém somente uma amostra relativamente pequena de todos os possíveis valores da medida que está sendo realizada. Logo, não é possível obter a média aritmética verdadeira, portanto, também não é possível calcular o desvio padrão verdadeiro. Dada essa deficiência, *William S Gosset* (1876 – 1937) desenvolveu um método de cálculo de intervalos de confiança, conhecido como critério de *Student*, baseado no desvio padrão, σ, de uma amostra finita de dados. Logo, o intervalo de confiança associado uma medida X será:

$$\mu = X \pm t_{v,p}\sigma \tag{4.32}$$

Onde os valores de $t_{v,p}$ são dados no Anexo B. Esses valores depende da quantidade de valores por amostra, grau de liberdade, v. O objetivo desse método e reduzir o efeito de subestimar o desvio padrão. No presente trabalho foi usado um intervalo de confiança de 95%.

Capítulo 5

Resultados e discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes realizados e os parâmetros hidrodinâmicos medidos.

5.1 Escolha do tipo de iluminação

A Figura 5.1 mostra duas imagens obtidas com a câmera ultrarrápida: a primeira utilizando a lâmpada fria como iluminação, e a segunda utilizando o flash de 19 *leds*. Observa-se que a imagem (a) realizada com a lâmpada fria como iluminação, é bem mais nítida e possui menos sombras e reflexos, portanto foi a escolhida para ser usada no decorrer dos testes.

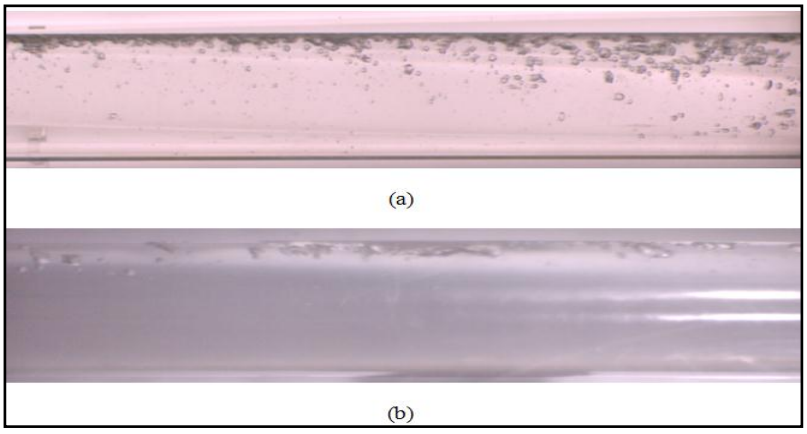


Figura 5.1. Imagem realizada com a lâmpada fria (a) e com o *flash* (b) como iluminação.

5.2 Teste monofásico

A Figura 5.2 mostra o sinal de um pulso recebido pelo sensor de 180º. Era esperado que o pico de tensão apresentado na figura estivesse em $0{,}67x10^{-4}$ s, calculado pela equação 4.1, porém o valor encontrado foi de $0{,}76x10^{-4}$ s. Esse valor esta coerente, pois esse é um cálculo aproximado. Essa diferença pode estar relacionada com as medições realizadas dos comprimentos das peças de acrílico e diâmetro interno do tubo e ainda das velocidades teóricas utilizadas que variam com a temperatura.

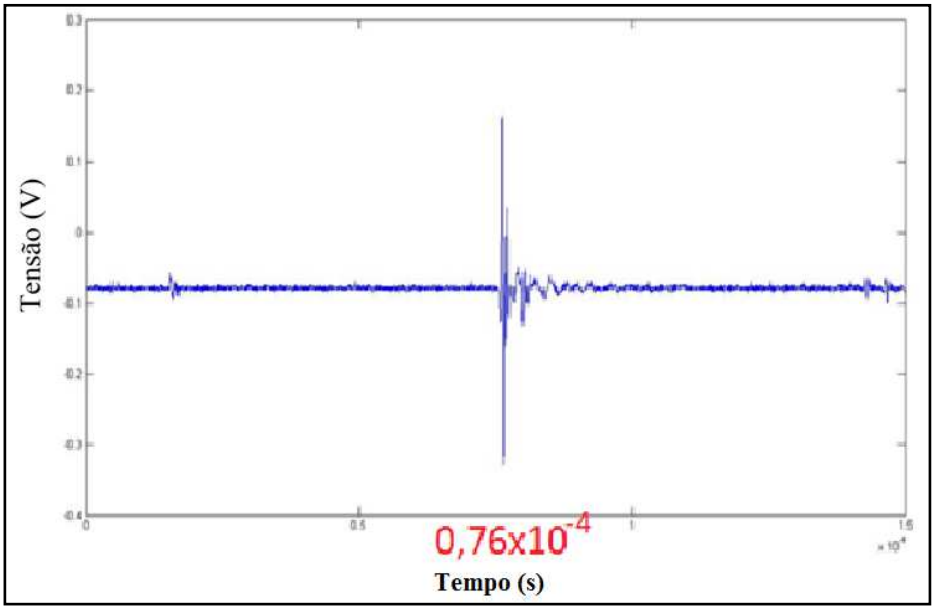


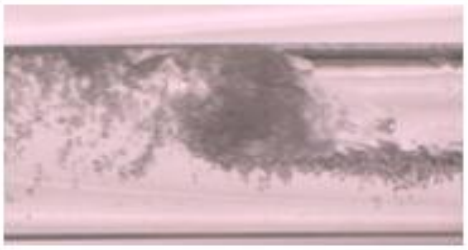
Figura 5.2. Sinal do sensor de 180º no escoamento monofásico.

5.3 Análise da energia dos transdutores

A Tabela 5-1 mostra imagens observadas durante a passagem de um pistão de líquido ou da cauda de uma bolha alongada. A chegada de energia no transdutor posicionado na parte superior da tubulação (180º), só é perceptível no pistão de líquido quando existe uma pequena quantidade de bolhas. Estruturas maiores de gás atenuam o sinal, não permitindo que a onda chegue ao sensor.

O transdutor posicionado na parte inferior da tubulação (0º) sempre recebe alguma quantidade de energia. Isso porque ele também é o emissor, logo tem sempre uma parcela de energia, mesmo que pequena, sendo refletida para esse transdutor.

Tabela 5-1. Análise qualitativa da energia dos transdutores.

Imagem	Energia			
	180°	0°	45°	135°
	Baixo	Baixo	Baixo	-
	-	Alto	Baixo	-
	-	Baixo	Baixo	-
	-	Médio	-	-

O transdutor posicionado a 45º recebe energia quando pequenas bolhas escoam, refletindo a onda proveniente do emissor para esse sensor. Também recebe energia quando escoa uma bolha alongada com um filme de líquido espesso, o suficiente para que a onda seja refletida para o sensor.

O sensor posicionado à 135º raramente recebe energia. Isso porque quando a bolha alongada escoa em frente à estação de transdutores, toda a energia é refletida de volta para a parte inferior da tubulação; e quando o pistão de líquido escoa, ou a quantidade de bolhas é insuficiente para desviar a onda para o sensor de 135º ou a posição na qual essas bolhas escoam bloqueiam a ondas que chegariam ao sensor de 135º.

5.4 Escolha do sensor para detecção de fases

No Capítulo anterior foi mostrado o procedimento para identificar qual fase passava através dos sensores de 0º e 180º. A Figura 5.3.a mostra o resultado do algoritmo usado para o sensor posicionado a 0º e a Figura 5.3.b mostra o resultado para o sensor de 180º.

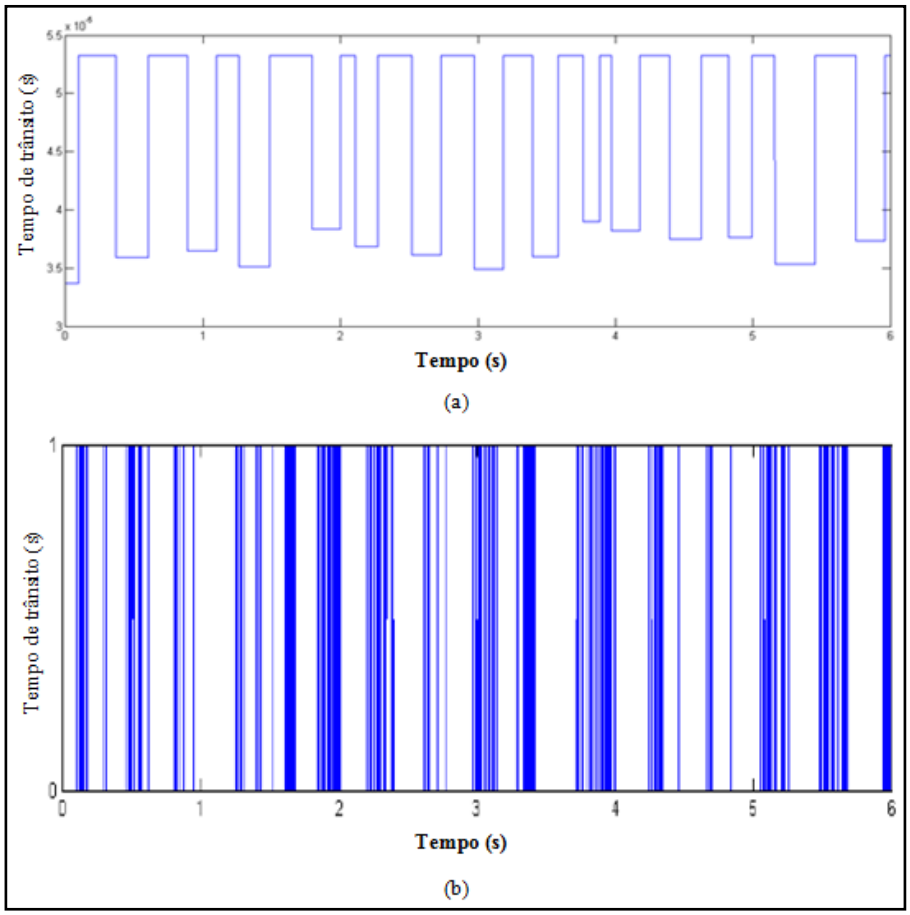


Figura 5.3. Detecção de fases através do (a) sensor a 0º e (b) sensor a 180º.

É nítida a diferença no resultado de ambos os programas. Para o sensor de 180º, a passagem de pequenas bolhas, como mostra a Figura 5.4, dificulta a identificação de qual estrutura está escoando, enquanto que o algoritmo do sensor posicionado na parte inferior da tubulação, além de permitir identificar qual estrutura escoa, permite identificar a espessura do filme de líquido (δ_{ff}). Logo, apenas os dados provenientes do sensor posicionado a 0º foram utilizados para identificar as estruturas.

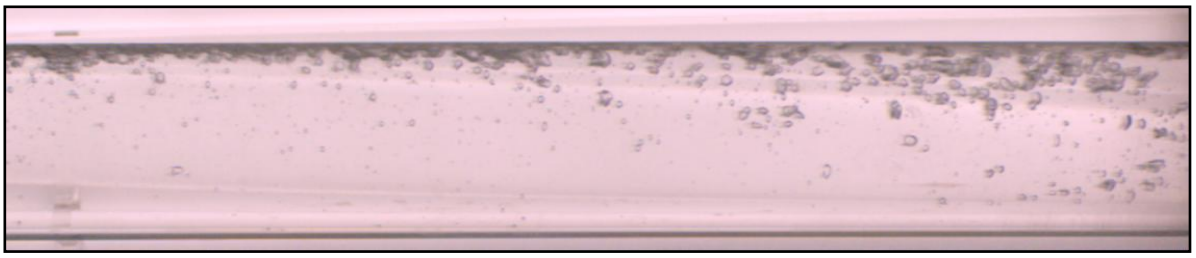


Figura 5.4. Bolhas escoando no pistão de líquido que dificultam a chegada da onda no sensor de 180º.

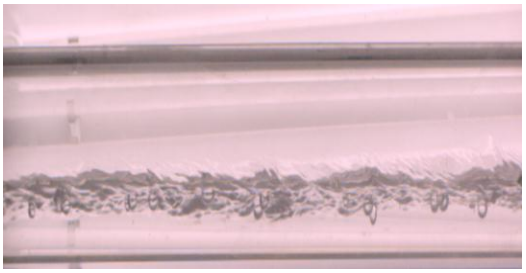
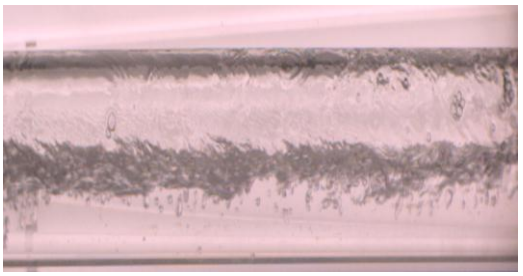
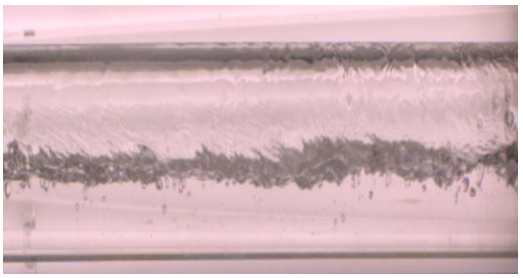
5.5 Velocidade do pistão de líquido (v_s)

Em relação à velocidade do pistão de líquido, o método utilizado para obter esse parâmetro não proporcionou bons resultados. Isso porque a bolha, cuja trajetória estava sendo acompanhada, escoava em linha reta por um curto período de tempo, aumentando a margem de erro na medição. Também, com apenas uma câmera, não foi possível garantir que a bolha escoava no plano paralelo à câmera, ou seja, que a bolha não estava se afastando ou se aproximando da câmera. Através do tempo de trânsito da onda também não foi possível realizar essa medição.

5.6 Espessura do filme de líquido (δ_{ff})

A espessura do filme de líquido foi o parâmetro que menos variou. Seu desvio padrão foi inferior a 10% para todas as condições operacionais. A Tabela 5-2 mostra parte da bolha alongada escoando nas três condições operacionais. Observa-se que a interface água-ar é bem estável para os três casos. Devido a essa estabilidade, a interface água-ar foi considerada uma superfície plana para o cálculo da vazão, como foi mostrado no capítulo anterior.

Tabela 5-2. Espessura do filme de líquido (δ_{ff}) nas três condições operacionais.

Condição operacional	jL [m/s]	jG [m/s]	Imagem correspondente	δ_{ff} [cm]
#1	2,07	0,11		2,3
#2	1,49	0,09		2,2
#3	0,90	0,14		1,4

5.7 Frequência de célula unitária (υ_u)

A Figura 5.5 mostra a frequência de células unitárias em todas as aquisições. Pode-se perceber que os valores obtidos entre a estação #1 e a estação #2, ou entre a estação #1 e a filmagem, foram semelhantes. Algumas pequenas diferenças podem ser notadas na condição operacional #1. Essas diferenças se devem ao fato de serem consideradas apenas células unitárias completas, onde podem ser observados a célula unitária e o pistão de líquido. Como os instrumentos não estavam localizados na mesma posição, um pode ter capturado mais estruturas que o outro, resultando nessa diferença.

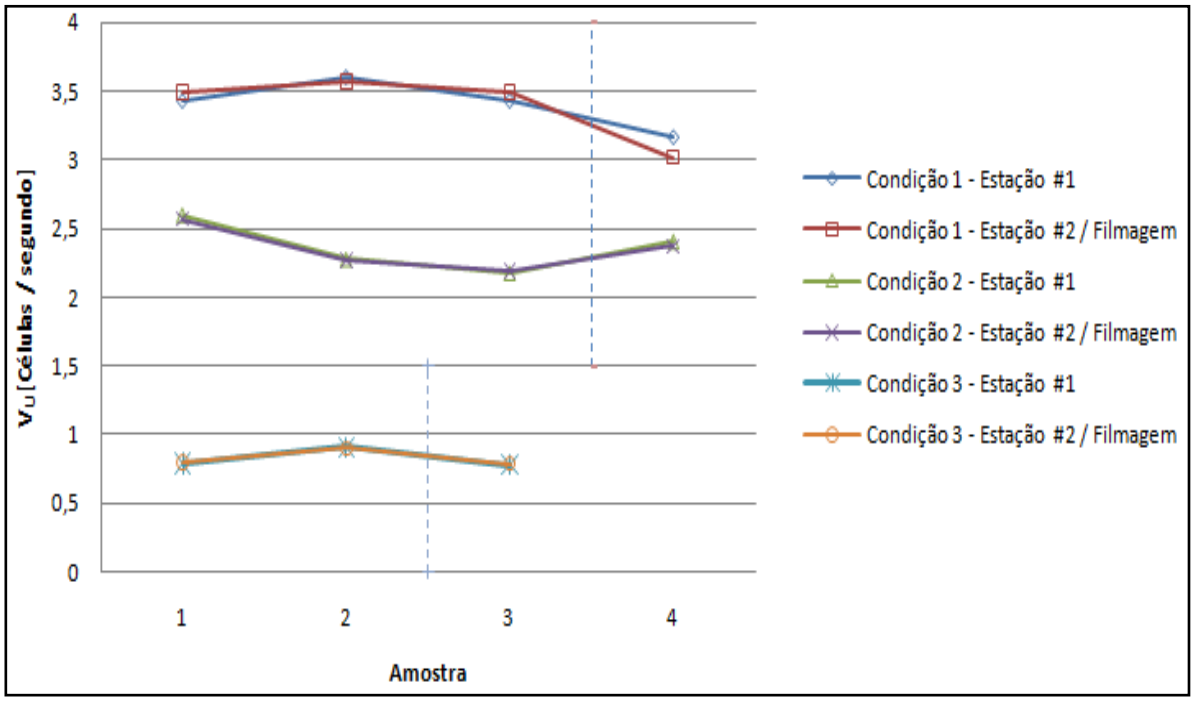


Figura 5.5. Frequência de célula unitária.

Ainda da Figura 5.5, observa-se que a condição operacional #3 foi a que apresentou a frequência mais baixa, o que é coerente, pois nessa condição, o líquido escoava com uma velocidade mais baixa e o gás com uma velocidade superficial mais alta que as demais condições, resultando em bolhas alongadas mais compridas.

5.8 Condição operacional 1

Para essa condição, a velocidade média da frente da bolha (v_t) foi de 3,58 m/s com desvio padrão de 13,35%. A Figura 5.6 mostra as velocidades calculadas para as bolhas alongadas da amostra #1. A Tabela 5-3 mostra a média das velocidades em cada aquisição. Observa-se que o valor flutua em torno de uma média.

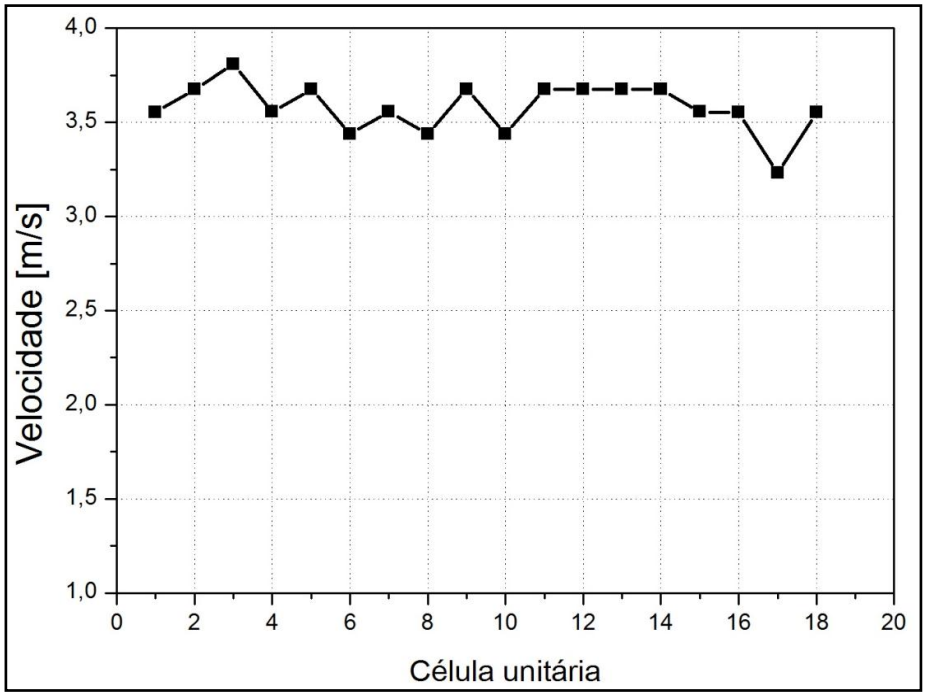


Figura 5.6. Velocidade translacional (v_t) para a amostra #1.

Tabela 5-3. Velocidade média para todas as amostras.

Amostra	v_t [m/s]	σ
1	3,58	13,35%
2	3,59	12,24%
3	3,64	18,82%
4	3,59	12,03%

Analisando os comprimentos das estruturas obtidas a partir da estação #1, observa-se que para essa condição operacional a bolha alongada teve maior comprimento que o pistão de líquido em todas as células unitárias, como mostra a Figura 5.7, referente à amostra #1.

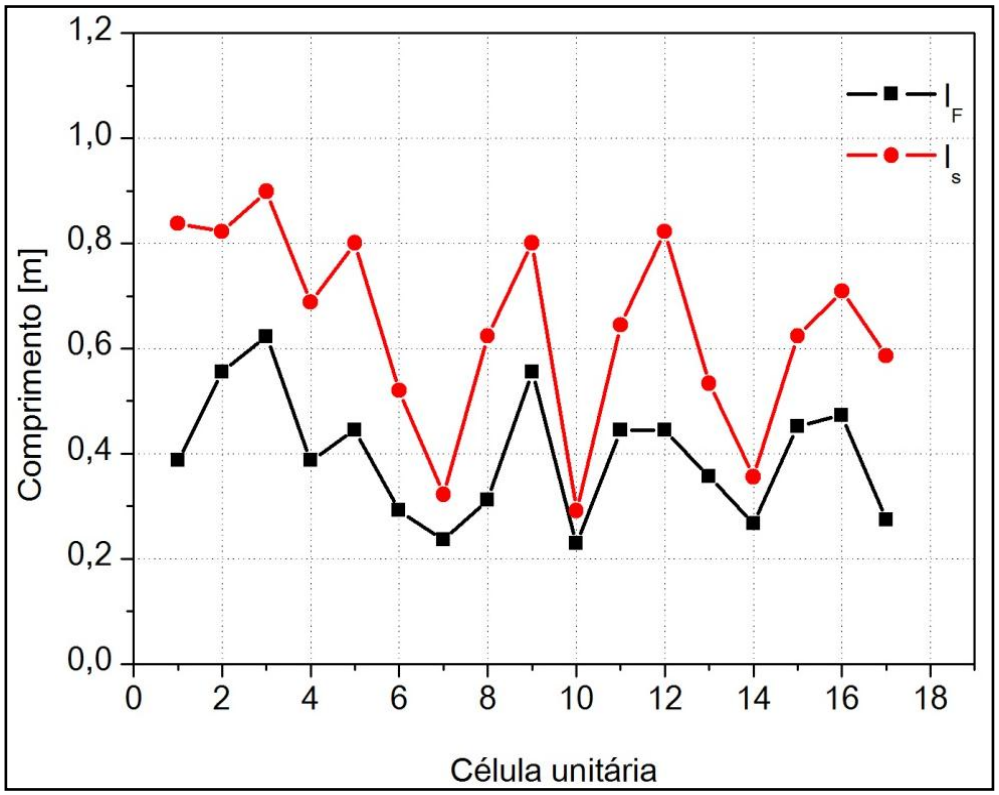


Figura 5.7. Comprimentos de bolha alongada (l_f) e pistão de líquido (l_s) para a amostra #1.

A Tabela 5-4 mostra os comprimentos de bolha alongada (l_f) e pistão de líquido (l_s) obtidos nas estações #1 e #2, respectivamente. Observa-se que nos dois casos, os comprimentos medidos por ambas as estações foram semelhantes, ou seja, a estrutura do escoamento não mudou entre as estações. Houve uma diferença maior na amostra #4, mas ainda assim os valores ficaram próximos. Essa diferença pode ser devido à precisão das medidas nas imagens ou aos pulsos que não retornaram ao sensor.

Tabela 5-4. Comprimentos de bolha alongada (l_f) e pistão de líquido (l_s) obtidos por ambas as técnicas.

Amostra	Estação 1				Estação 2 / Filmagem			
	l_F [m]	σ	l_S [m]	σ	l_F [m]	σ	l_S [m]	σ
1	0,40	13,35%	0,64	18,78%	0,38	10,11%	0,65	19,81%
2	0,38	12,24%	0,64	28,57%	0,40	13,43%	0,63	25,95%
3	0,40	18,82%	0,61	20,95%	0,42	17,25%	0,58	20,34%
4	0,44	12,03%	0,69	20,63%	0,38	8,95%	0,75	20,44%

Observa-se também que o pistão de líquido, apesar de ter um valor médio semelhante para todas as aquisições, tem um desvio padrão muito alto, o que inviabiliza o uso de seu valor médio em correlações, pois pode resultar em medidas erradas de outros parâmetros. Na amostra #4, por exemplo, o comprimento do pistão de líquido varia de 0,38 m a 1,1 m, como mostra a Figura 5.8.

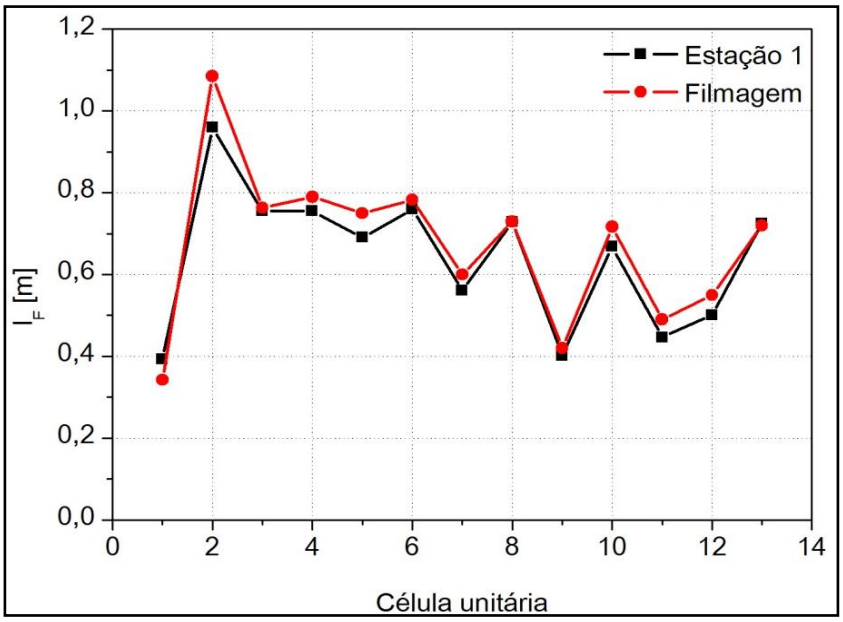


Figura 5.8. Comprimento do pistão de líquido (l_s) medido através da estação #1 e das imagens adquiridas (amostra #4).

O comprimento da célula unitária, l_u, foi a grandeza que apresentou o maior desvio padrão, o que já era esperado, pois a célula unitária é a soma do comprimento da bolha alongada com o pistão de líquido. A Tabela 5-5 mostra os valores médios para todas as amostras. Assim como l_f e l_s, l_u é um parâmetro que oscila em torno de um valor médio. Tal fato pode ser observado na Figura 5.9.

Tabela 5-5. Comprimento da célula unitária (l_u).

Amostra	Estação 1		Estação 2 / Filmagem	
	l_f [m]	σ	l_f [m]	σ
1	1,02	29,41%	1,04	27.88%
2	1,02	38,23%	1,03	35.92%
3	1,00	26,00%	0,97	25.77%
4	1,12	26,79%	1,13	26.55%

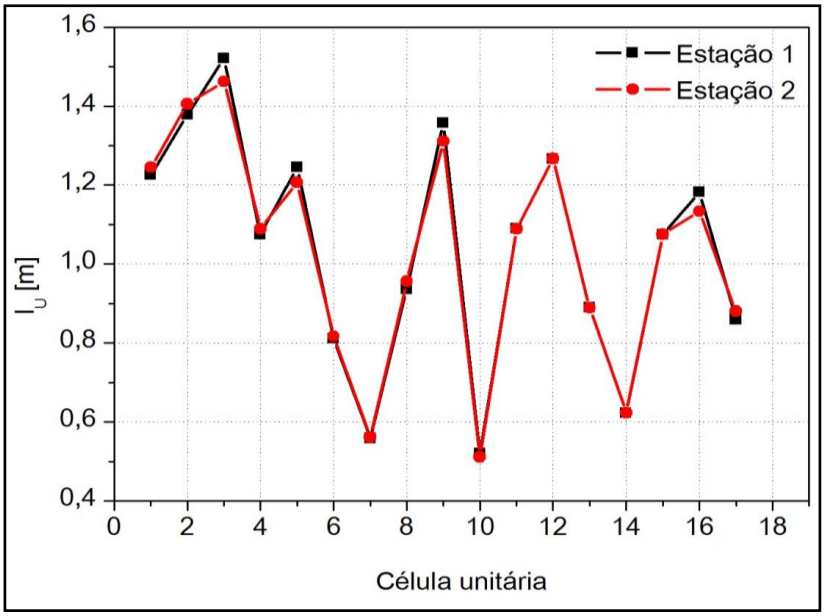


Figura 5.9. Comprimento da célula unitária (l_u) da amostra #1.

A Figura 5.10 ilustra o filtro realizado nos dados do sensor 0º. Observa-se que na bolha alongada da célula 17 há um degrau na bolha. Isso se deve ao fato de naquele instante, o pulso demorar a retornar mais do que deveria atingindo um valor de tempo de trânsito maior. Então, a partir desse ponto é calculada uma nova média até o final da bolha alongada.

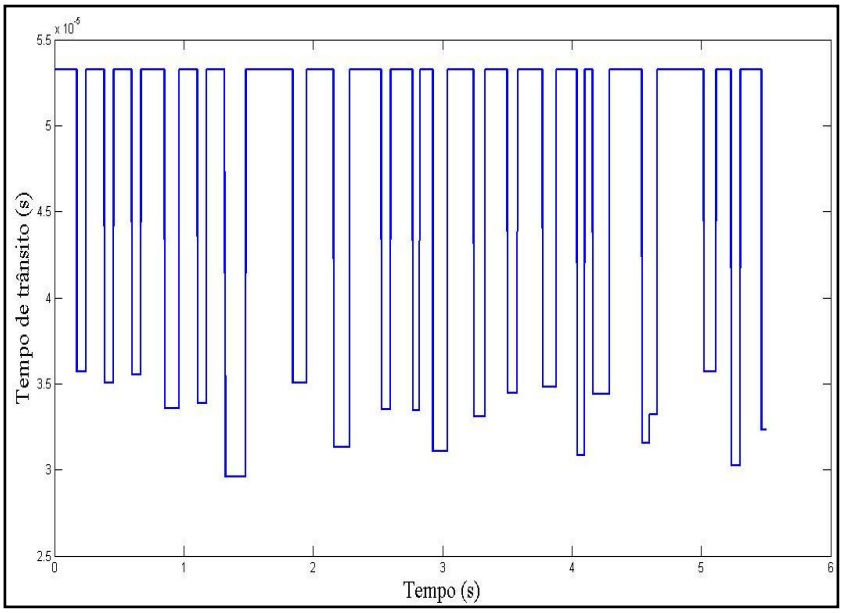


Figura 5.10. Filtro realizado na amostra 2.

5.9 Condição operacional 2

A Figura 5.11 mostra a velocidade da bolha alongada (v_t) obtida através da filmagem que teve uma média de 3,03 e desvio padrão de 4,62%. De todos os testes realizados foi o que apresentou menor desvio em relação à média. Mesmo tendo o menor desvio, os outros parâmetros hidrodinâmicos, l_f, l_s e l_u, continuaram com altos desvios. Nota-se da Tabela 5-6 que as velocidades obtidas com o ultrassom tiveram os desvios na mesma ordem de grandeza. Isso mostra que os resultados obtidos por ambas as técnicas são semelhantes, o que é esperado.

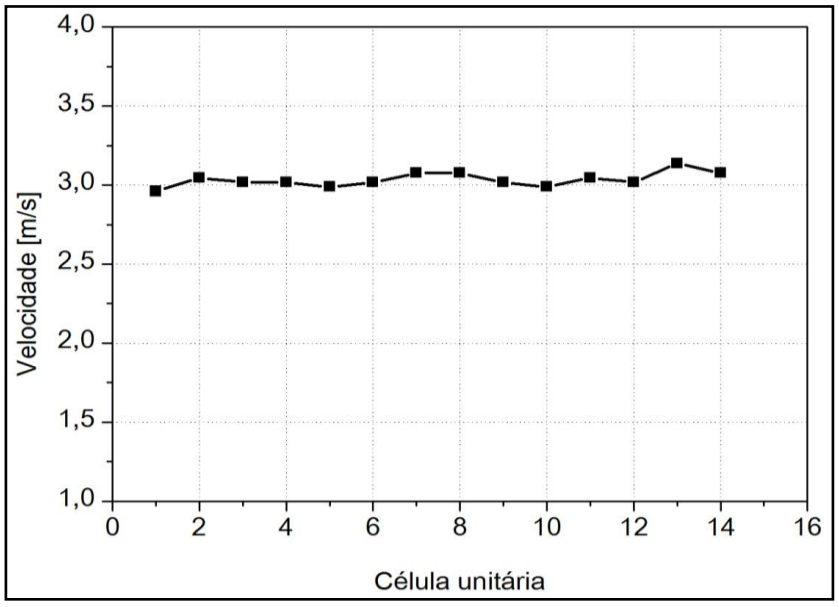


Figura 5.11. Velocidade da bolha alongada (v_t) obtida através da filmagem.

Tabela 5-6. Média das velocidades da frente da bolha (v_t) para todas as condições.

Amostra	v_t [m/s]	σ
1	3,04	15,42%
2	3,06	11,70%
3	3,10	17,63%
4	3,03	4,62%

Da Figura 5.12 observa-se que ambas as estações obtiveram o mesmo comprimento para a bolha alongada. Pequenas diferenças podem ser observadas devido aos pulsos que não retornaram para o sensor ou por uma mudança no perfil da bolha entre as estações.

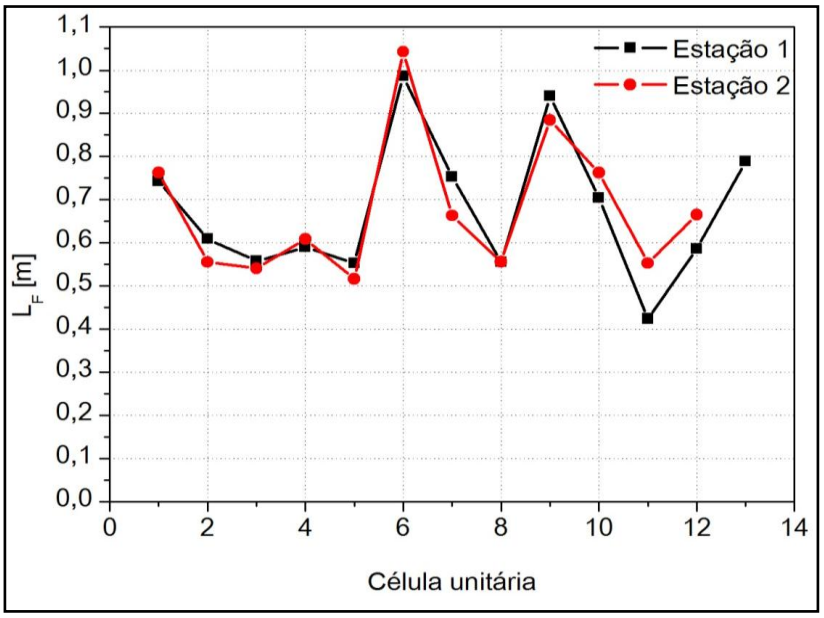


Figura 5.12. Comprimento da bolha alongada (l_f) nas duas estações para a amostra 2.

A Tabela 5-7 mostra as medidas de comprimento para a bolha alongada e o pistão de líquido. Observa-se que todos os parâmetros hidrodinâmicos, medidos por ambas as técnicas, tiveram valores semelhantes. Novamente, um alto desvio padrão para o comprimento do pistão de líquido, indicando que, um valor médio não pode ser usado para alimentar correlações ou afirmar que ele é estável o suficiente para ser igual a trinta vezes o diâmetro da tubulação.

Tabela 5-7. Comprimentos da bolha (l_f) e do pistão (l_s) obtidos por ambos os métodos.

Amostra	Estação 1				Estação 2 / Filmagem			
	l_f [m]	σ	l_s [m]	σ	l_f [m]	σ	l_s [m]	σ
1	0,62	17,00%	0,57	18,00%	0,62	19,01%	0,55	20,44%
2	0,68	16,25%	0,68	16,13%	0,68	27,87%	0,68	29,77%
3	0,71	13,68%	0,63	18,15%	0,70	13,86%	0,62	18,50%
4	0,63	13,99%	0,60	12,88%	0,63	20,43%	0,66	21,00%

A Figura 5.13 mostra os valores de comprimento da célula unitária para a amostra 2. Nota-se que as medidas realizadas pelas duas estações são semelhantes. Se uma estação

subestimou o comprimento da bolha, foi compensando superestimando o pistão de líquido. Os valores médios permaneceram constantes para ambas as técnicas de medição em todas as amostras como mostra a Tabela 5-8.

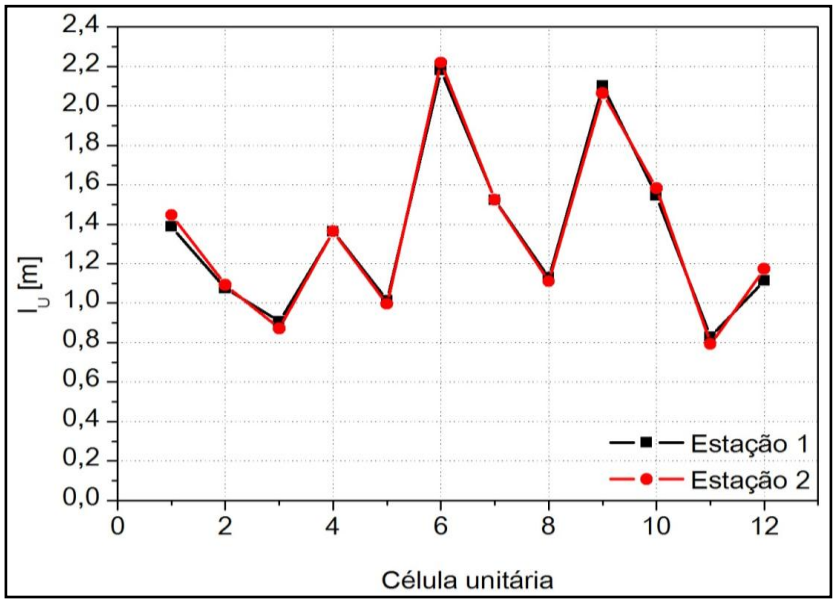


Figura 5.13. Comprimento da célula unitária (l_u) da amostra 2.

Tabela 5-8. Valores médio de l_u.

Amostra	Estação 1		Estação 2 / Filmagem	
	l_f [m]	σ	l_f [m]	σ
1	1,19	24,86%	1,17	26,28%
2	1,35	43,54%	1,35	44,50%
3	1,34	29,36%	1,33	29,34%
4	1,26	31,09%	1,26	32,48%

A Figura 5.14 mostra o resultado do filtro aplicado ao tempo de trânsito da amostra #3. O algoritmo identificou com precisão as estruturas que passavam pelo transdutor.

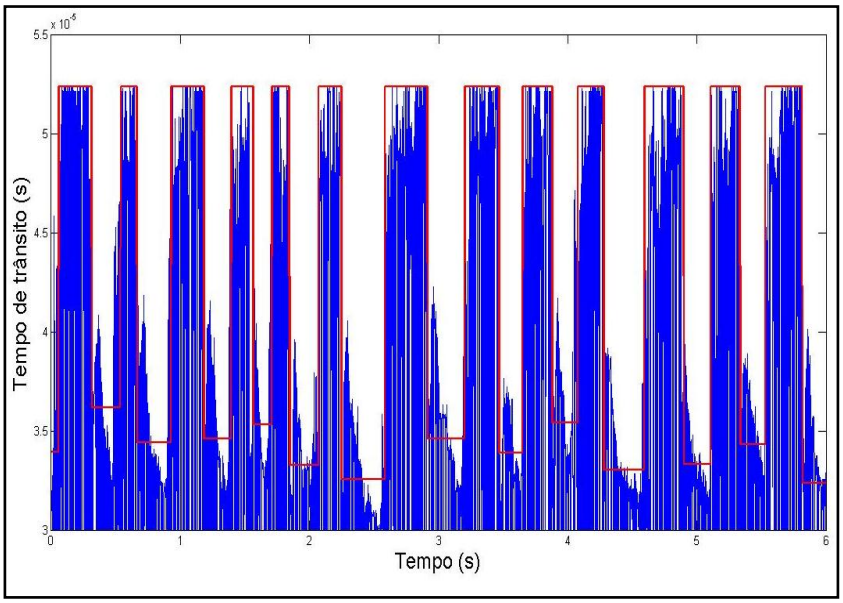


Figura 5.14. Filtro realizado na amostra #3.

5.10 Condição operacional 3

Como na condição 3 as bolhas alongadas eram muito compridas, e o tempo de aquisição dos testes estava limitado em poucos segundos, só foi possível visualizar uma média de três células unitárias por amostra. Logo, nos gráficos pertinentes a essa condição são apresentadas todas as amostras, sendo os primeiros pontos adquiridos através da estação #1 e da estação #2, e os últimos pontos, após a linha azul nos gráficos, pela estação #1 e pela filmagem ultrarrápida.

A Figura 5.15 mostra os valores medidos através de ambas as técnicas: ultrassom e filmagem ultrarrápida. Percebe-se da figura que a velocidade oscila em torno de uma média, com um desvio padrão de 30%.

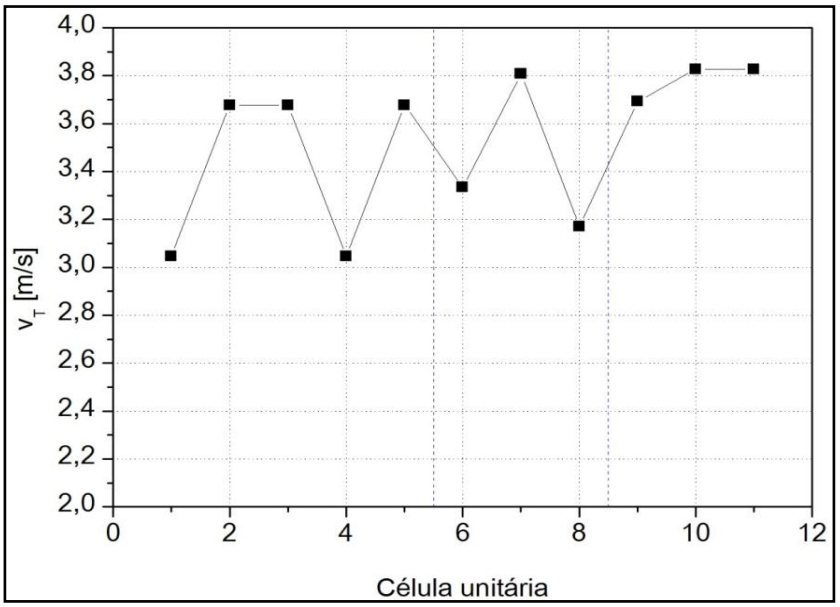


Figura 5.15. Velocidade translacional da bolha alongada v_t.

A Figura 5.16 mostra os comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido obtidos na estação #2, onde se observa que o comprimento da bolha alongada (l_f) é sempre maior que o comprimento do pistão de líquido (l_s), o que é coerente com o que foi observado visualmente, e com o gráfico de tempo de trânsito da onda da mesma estação, Figura 5.17.

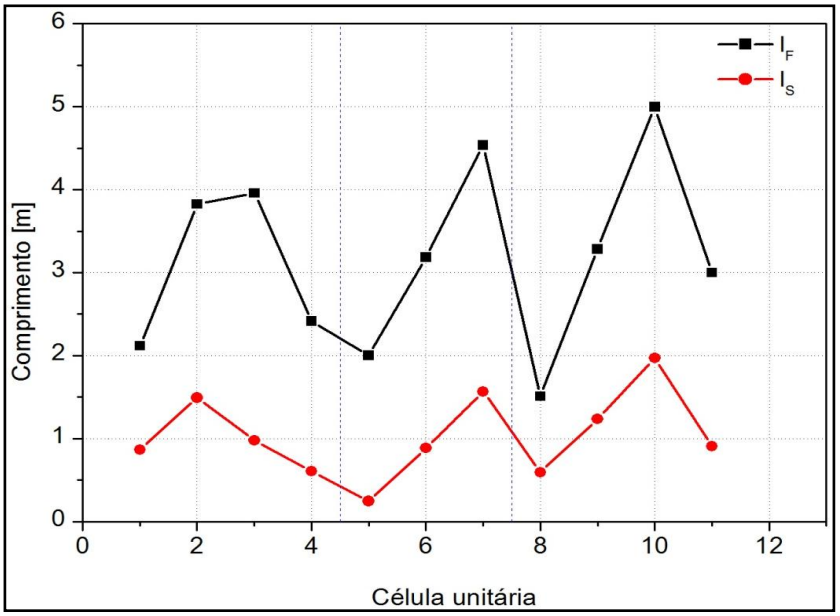


Figura 5.16. Comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido medidos pela estação #2.

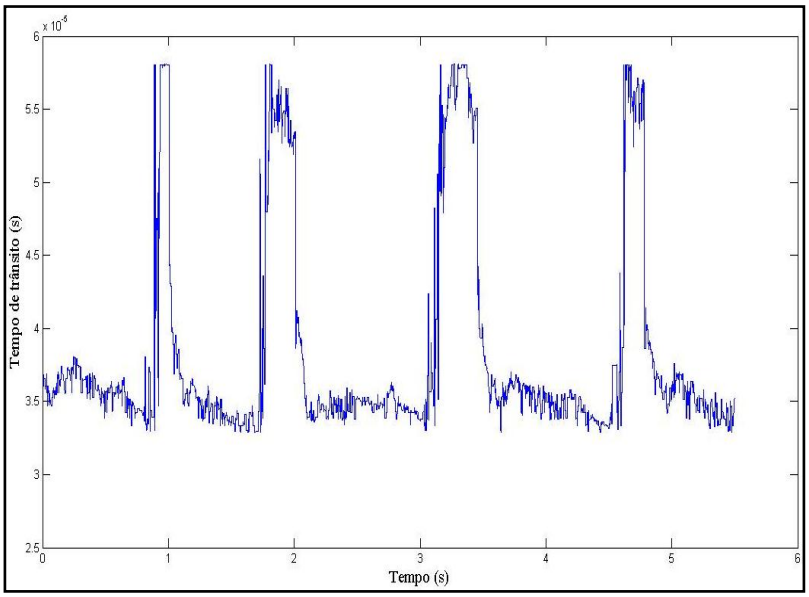


Figura 5.17. Tempo de trânsito do ultrassom na estação #2.

Os comprimentos das bolhas alongadas (l_f) são ilustrados na Figura 5.18. Na estação #1, o comprimento teve um valor médio de 3,48 m com desvio padrão de 120% para a primeira estação, enquanto na estação #2/filmagem o valor médio do comprimento foi de 3,39 m com desvio padrão de 117%. Essa diferença se deve pelo fato de o ultrassom apresentar dificuldade em identificar a cauda da devido à grande quantidade de bolhas próximas à cauda como pode ser observado na Figura 5.19.

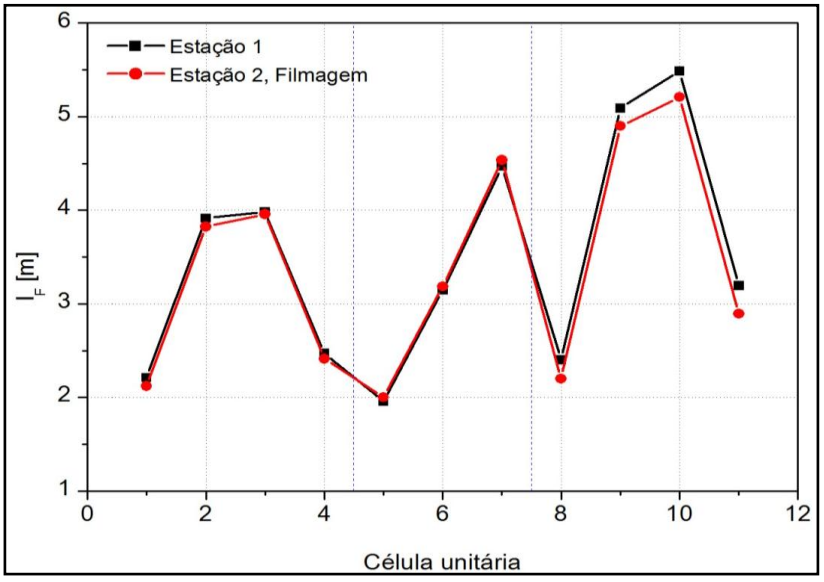


Figura 5.18. Comprimento da bolha alongada (l_f).

Ainda da Figura 5.18, é possível observar que o ultrassom superestima o comprimento da bolha alongada (l_f). Isso se deve à cauda da bolha alongada ser muito aerada, dificultando o método de diferenciar o fim da cauda da bolha alongada e o começo do pistão de líquido. A Figura 5.19 ilustra um quadro capturado pela câmera, onde é possível identificar o fim da bolha alongada, mas que através do ultrassom é difícil identificar.

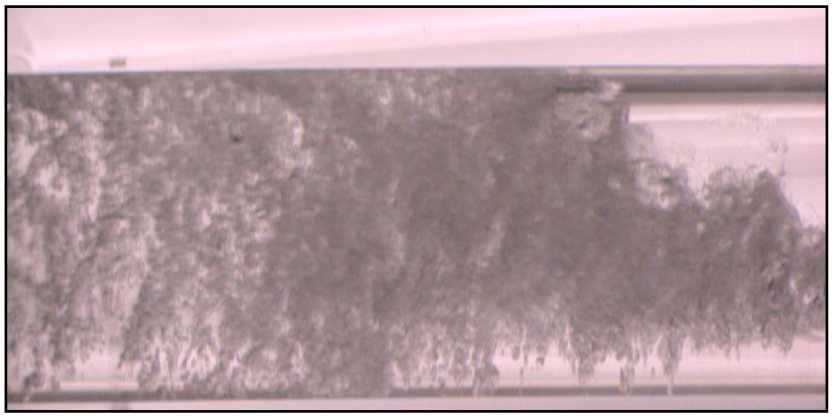


Figura 5.19. Bolha alongada com a cauda bastante aerada.

A partir da Figura 5.20 é possível observar que houve um ajuste entre o que foi medido pelas duas estações. Porém, comparando-se os comprimentos medidos pela estação #1 e a imagem, observa-se que a técnica subestimou o comprimento da bolha alongada devido à cauda da bolha alongada ser muito aerada. A média dessa medida foi de 1,01 m com desvio padrão de 50%.

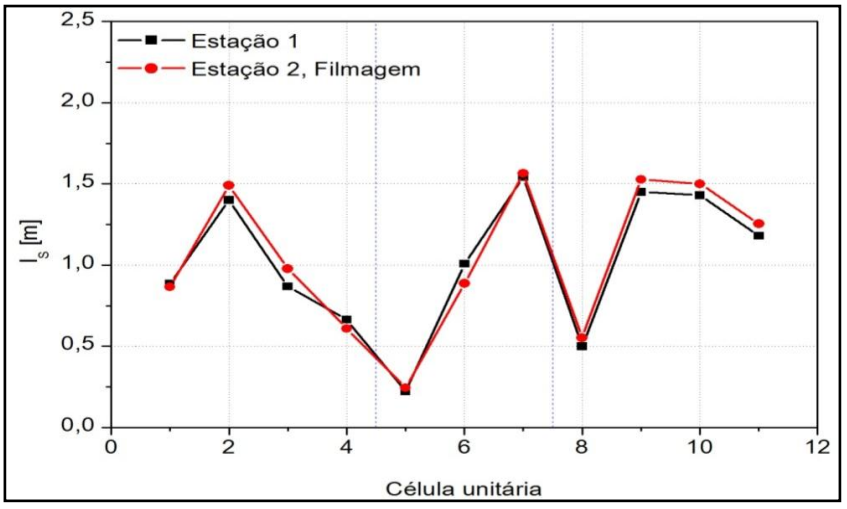


Figura 5.20. Comprimento do pistão de líquido (l_s).

A Figura 5.21 mostra o comprimento da célula unitária (l_u). O comprimento da célula unitária teve um valor médio de 4,50 m, que corresponde a 87D, com desvio padrão de 150%. Esse alto desvio padrão, apesar da pequena quantidade de amostras, mostra que o escoamento ainda não foi completamente desenvolvido, visto que do ponto de injeção de ar até o ponto onde as medidas foram realizadas (seção de visualização), o comprimento da tubulação é de 485 D, ou seja, pouco mais de cinco vezes maior que o comprimento da célula unitária, o que é considerado baixo para esse comprimento de bolha alongada (Shohan, 2006).

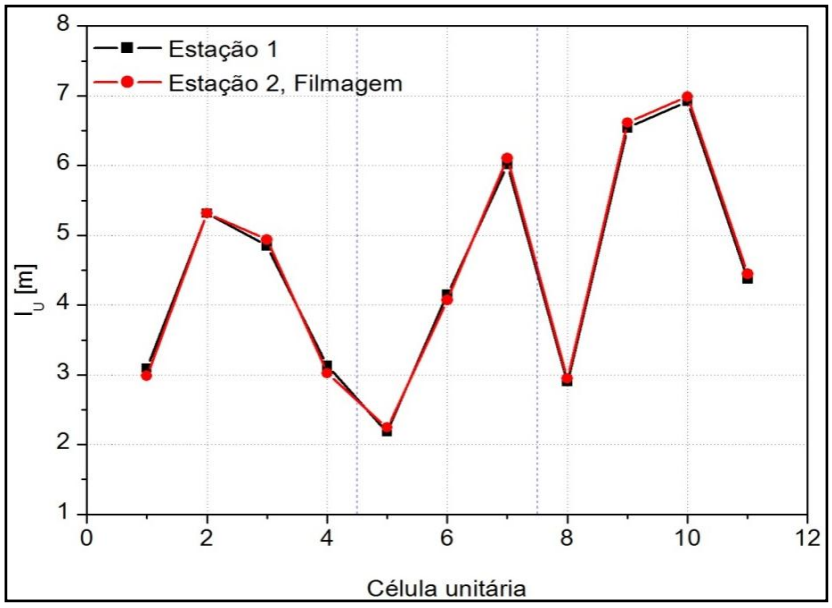


Figura 5.21. Comprimento da célula unitária (l_u).

A Figura 5.22 mostra o filtro aplicado às duas estações de ultrassom da primeira amostra da condição 3. Observa-se que as estruturas capturadas com ambas as estações são semelhantes, contendo diferenças mínimas nos comprimentos.

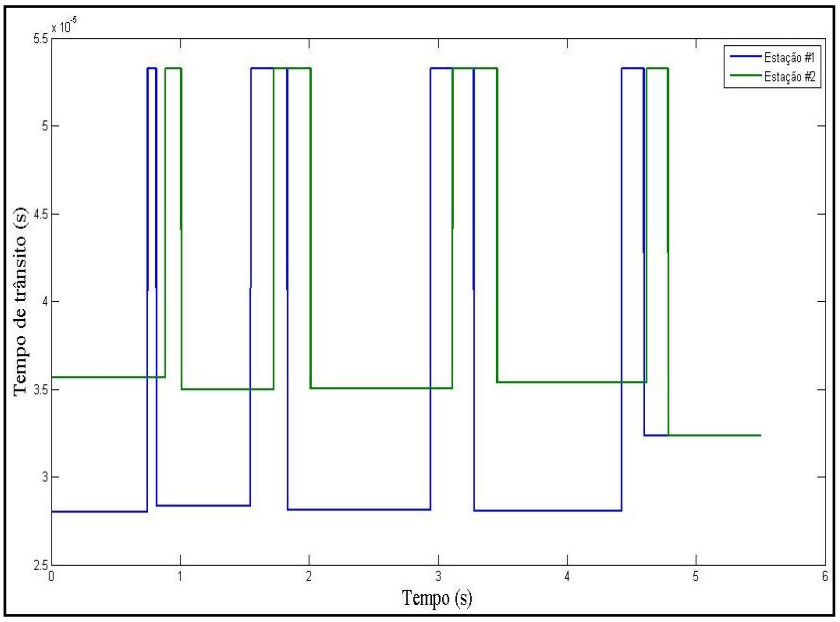


Figura 5.22. Filtro aplicado à amostra #1 da condição 3.

5.11 Vazões de líquido e gás

As Figuras 5.23 e 5.24 apresentam as vazões experimentais e calculadas pelo modelo de líquido e gás, respectivamente, para a amostra #1 de cada condição experimental. Nota-se que a vazão de líquido está superestimada para todas as condições operacionais e o gás está subestimado, o que é coerente já que o modelo assume que a interface água-ar é plana e que não há presença de bolhas no pistão de líquido. Como essa foi a primeira tentativa em estimar a vazão através do ultrassom, nota-se que o modelo ainda precisa ser aprimorado, as bolhas existentes no pistão de líquido devem ser consideradas, dessa forma o resultado será mais preciso.

Observa-se também que para a condição 3, o líquido não foi tão superestimado e nem o gás tão subestimado. Isso se deve pela grande quantidade de bolhas presente na cauda das bolhas alongadas, levando a técnica a calcular um comprimento maior de l_f do que o real. Isso pode ser corrigido através de uma análise da variação de energia dos sensores posicionados em outros ângulos.

A Figura 5.25 mostra a energia recebida por cada transdutor. Apesar de não ter seus valores normalizados, nota-se que quando os sensores posicionados a 45º e 180º graus não

estão recebendo energia, o sensor posicionado a 135º está, caracterizando a passagem de bolhas que refletem energia para esse sensor.

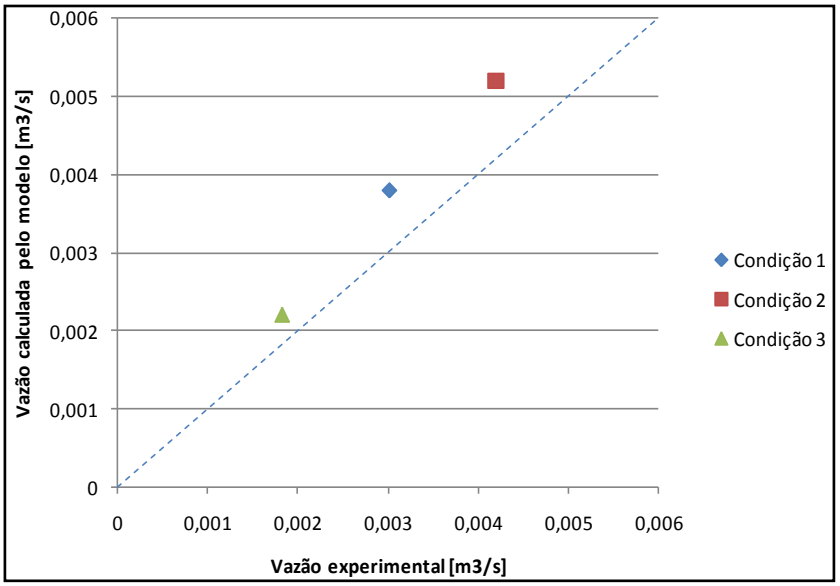


Figura 5.23. Q_l medida no instrumento e calculada pelo modelo.

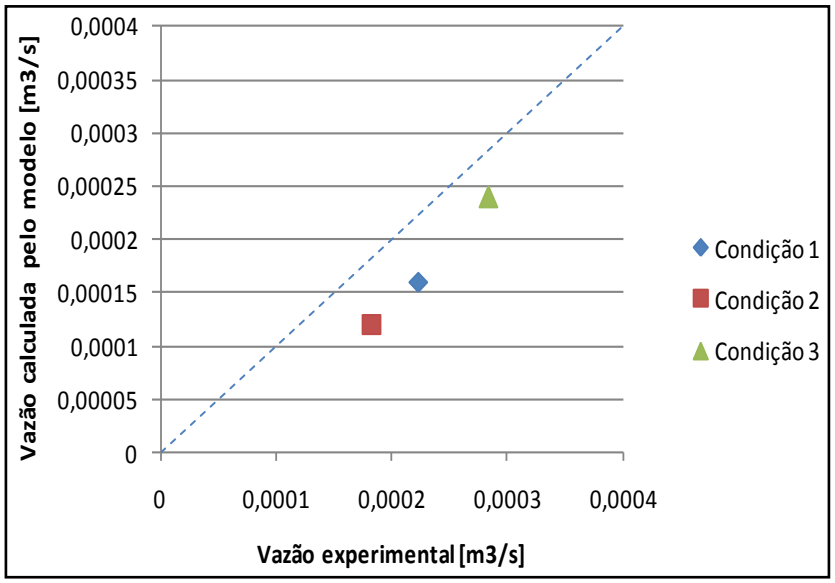


Figura 5.24. Q_g medida no instrumento e calculada pelo modelo.

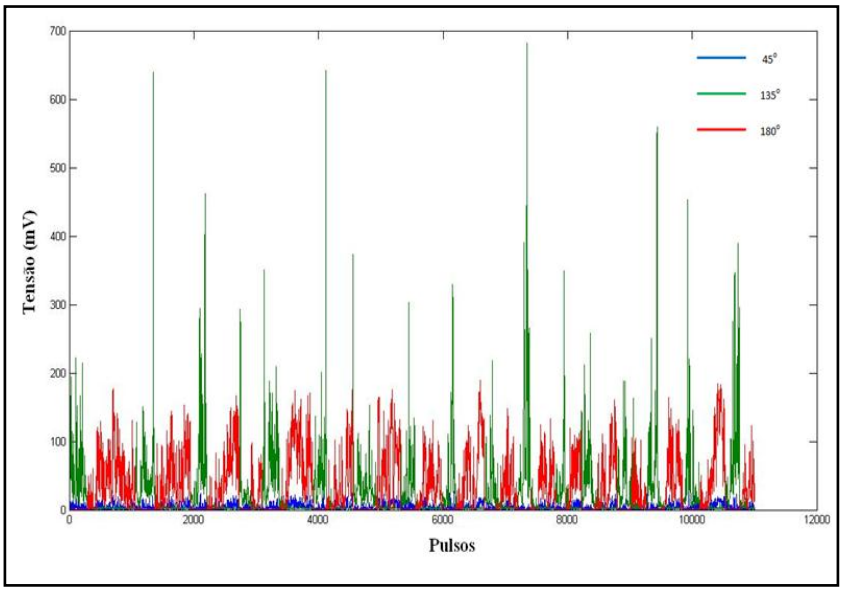


Figura 5.25. Energia dos sensores posicionados a 45º, 135º e 180º para a condição operacional 1.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões

O presente trabalho verificou a possibilidade de usar a técnica de ultrassom para medir parâmetros hidrodinâmicos do escoamento intermitente horizontal água-ar. O aparato experimental foi projetado e construído no Labpetro da Universidade Estadual de Campinas. Água e ar escoavam por uma tubulação de 2" de diâmetro interno devidamente instrumentada. Uma câmera ultrarrápida foi utilizada para que os resultados obtidos a partir do ultrassom pudessem ser comparados.

Os parâmetros medidos foram: velocidade da bolha alongada (v_t), espessura do filme de líquido (δ_{ff}), comprimento da bolha alongada (l_f), comprimento do pistão de líquido (l_s), comprimento da célula unitária (l_u) e frequência de passagem da célula unitária ($\boldsymbol{\upsilon}_u$).

Um algoritmo foi elaborado a fim de identificar qual fase (líquida ou gasosa) escoava em frente ao sensor ultrassônico baseado no tempo de trânsito da onda no escoamento. A partir desse programa foi então possível calcular a vazão de líquido e de gás.

O estudo mostra algumas conclusões que merecem destaque:

a) A filmagem é uma técnica que se mostra eficiente na caracterização do escoamento. Porém, não pode ser usada em campos de petróleo devido à necessidade de um meio transparente para as medições, o que é difícil conseguir

na área petrolífera devido às altas temperaturas e vazões envolvidas na produção de óleo e gás, portanto, inviabilizando seu uso;

b) A baixa capacidade de aquisições de imagens através da câmera também é um fator que deve ser considerado. A uma taxa de 1000 quadros por segundo, a câmera só registrou imagens durante 6 segundos devido à sua memória interna ser de apenas 4 GB. Esse tempo é suficiente para escoamentos mais velozes; porém em baixas vazões, poucas estruturas são capturadas nesse tempo, sendo necessários mais testes. Vale ressaltar ainda que a câmera leva muito tempo para descarregar as imagens adquiridas em sua memória interna para o disco rígido do computador;

c) A filmagem é uma técnica que apesar de não ser aplicável para medições em campos de petróleo, pode ser usada para aferir outras técnicas, no caso o ultrassom. Através da análise dos resultados foi possível observar que ambas as técnicas conseguiram realizar as medições estando sempre na mesma ordem de grandeza.

d) O ultrassom é uma técnica bastante promissora na área petrolífera. O fato de ser não invasiva e não intrusiva, assim como a robustez dos transdutores ultrassônicos, potencializam seu uso;

e) Para medições de comprimento da bolha alongada, a técnica de ultrassom superestimou o comprimento. Isso pode ser corrigido através de uma análise mais aprofundada dos sinais provenientes de transdutores instalados em outros ângulos;

f) O algoritmo para detecção de fases mostrou ser eficiente, sendo capaz de detectar todas as bolhas alongadas de todas as amostras realizadas.

g) Correlações podem ser alimentadas através dos parâmetros medidos pelo ultrassom, resultando em uma medida mais precisa;

h) Assumir que o comprimento do pistão é igual a 30 vezes o valor do diâmetro da tubulação pode ser uma afirmativa um tanto errada. O valor pode até oscilar em torno de uma média, porém com alto desvio padrão, o que torna o uso da média dessa medida uma ação não confiável.

i) Das variáveis medidas, a espessura do filme de líquido foi a variável que se mostrou mais estável, tendo o menor desvio padrão;

Podem ser citados como recomendações para trabalhos futuros:

a) Analisar a influência da temperatura nos parâmetros hidrodinâmicos e no perfil da bolha alongada. O atual aparato experimental possibilita isso, pois conta com uma resistência e uma seção de troca térmica;
b) Construir um aparato em que a tubulação seja de acrílico, do ponto de injeção ao ponto de medição, de modo que permita acompanhar toda a evolução do escoamento e compreendê-lo melhor;
c) Realizar testes com mais vazões, de modo que permita fixar a vazão de uma das fases e variar a outra, de modo que seja possível qualificar o impacto das fases nos parâmetros hidrodinâmicos do escoamento intermitente;
d) Utilizar o petróleo como a fase líquida nos testes;
e) Aumentar o número de amostras por condições operacionais de modo que os resultados possam ser comparados com correlações;
f) Aprimorar o algoritmo de tratamento dos sinais de ultrassom de modo que uma resposta mais rápida seja obtida;
g) Elaborar um algoritmo para tratar as imagens automaticamente;
h) Medir o volume de gás (da bolha alongada) pontualmente e não com a média da espessura do filme de líquido. Isso deve aumentar a precisão da medição.

Finalmente, o presente trabalho mostrou a utilização do ultrassom para medições dos parâmetros hidrodinâmicos. Para a aplicação da técnica em tempo real e outros padrões de escoamentos, mais estudos são necessários.

Referências bibliográficas

Asher, R. C. *Ultrasonic Sensors for Chemical Process Plant*. Londres: Institute of Physics Publishing, 1997.

Ayala, O. F., Ayala, L., Ayala, O. M. *Multi-phase flow analysis in oil and gas engineering system and its modeling*. Hydrocarbon World, v. 1, p. 57 – 61, 2007.

Bond, L. J., et al. *Ultrasonic Technologies for Advanced Process Monitoring, Measurement, and Control*. Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vail, CO, p. 1288-1293, 2003.

Carvalho, R. D. M., et al. *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, doi 10.1016, 2009.

Carvalho, R. D. M. Técnicas de medida em mecânica de fluidos e transferência de calor. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Chakrabarti, D. P., Das, G. Das, P. K. *Identification of stratified liquid–liquid flowthrough horizontal pipes by a non-intrusive optical probe*. Chemical Engineering Science, v. 62, p. 1861–1876, 2007.

Cheeke, J. David. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. 1. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2002. 480p.

Dukler, A., Hubbard, M. *A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes*. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, v. 14, n. 4, p. 337 - 347, 1975.

Falcone, G., Hewitt, G. F., Alimonti, C. *Multiphase flow metering – Principles and Applications*.1. ed. London: Elsevier. 2009, 329 p. 54 v.

França, F., et al. *Mechanistic Modeling of the Convective Heat Transfer Coefficient in Gas-Liquid Intermittent Flows*. Heat Transfer Engineering. v. 29, n. 12, p. 984 - 998, 2008.

Gonçalves, M. A. L. A aplicação de ultrassom na determinação de vazão em escoamento gás líquido vertical. 1991. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Curso de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

Grangeiro, F. A., et al. Determinação experimental de propriedades do escoamento gás-líquido intermitente horizontal através de técnicas de visualização e tratamento de imagens. 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, Fortaleza, 18 – 22 outubro, 2009.

Gurau, B., Vassallo, P. Keller, K., *Measurement of gas and liquid velocities in an air-water two-phase flow using cross-correlation of signals from a double sensor hot-film probe*. Experimental Thermal and Fluid Science. V. 28, p. 495-504, 2004.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 228 p. 2 v.

Hill, T. J., Wood D. G. *A new approach to the prediction of the slug frequency*. 65th Annual Technical Conference and Exhibition of SPE. p. 141 – 147, 1990.

Kadri, U. *Long Liquid Slugs*. Netherlands, 2009.

Kordyban, E. S. *A Flow Model for Two-Phase. Slug Flow in Horizontal Tubes*. J. Basic Engineering, Trans. A. S. M. E., Ser. D, 83, 613 (1961).

Kordyban, E. S., Ranov, T. *Experimental study of the mechanism of two-phase slug flow in a horizontal tube*. Multiphase Flow Symposium, A. S. M. E. Winter Annual Meeting, Philadelphia Pa., Nov. 1963, Proc. P. 1, American Society of Mechanical Engineers, New York.

Krautkramer, J., Krautkramer, H. *Ultrasonic testing of materials*. 2. Ed. Berlim: Springer-Verlag, 1977.

Kinsler, L. E., *Fundamentals of acoustics*. 3 ed. New York: Jon Wiley. 1982.

Lima, I. N. Estudo Experimental da Transferência de Calor no Escoamento Bifásico Intermitente Horizontal. 2009. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de

Petróleo) – Curso de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

Ma, Y. et al. *Application of electrical resistance tomography system to monitor gas/liquid two-phase flow in a horizontal pipe*. Flow Measurement and Instrumentation, v. 12, p. 259-265, 2001.

Macchi, A., Grace, J. R., Bi, H. Use of ultrasound for phase holdup measurements in multiphase systems. The Canadian Journal of Chemical Engineering v. 79, p. 570 – 578, 2001.

Mandhane, J. M., Gregory, C. A., Aziz, K. A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. International Journal of Multiphase Flow, v. 1, n. 4, p. 537 - 554, 1974.

Masala, T., Harvel, G., Chang, J. Separated two-phase flow regime parameter measurement by a high speed ultrasonic pulse-echo system. Scientific Instruments v. 78, 114901, 2007.

Nakamura, H., Kondo, M., Kukita, Yutaka. Simultaneous measurement of liquid velocity and interface profiles of horizontal duct wavy flow by ultrasonic velocity profile meter. Nuclear Engineering and Design v. 184, p. 339 – 348, 1998.

Panametrics. *Ultrasonic Transducers*. Panametrics Inc, NDT Division, Waltham, 2001.

Powell, R. *Experimental techniques for multiphase flows*. Physics of Fluids v. 78, 040605, 2008.

Santos, G. R. Desenvolvimento de Técnicas de Ultrassom para Medida de Espessura de Filme de Líquido em Escoamento Gás-Líquido e Líquido-Líquido. 2006. 204 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Curso de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

Shohan, O. *Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes*. 1. Ed. Richardson, Tx (USA): SPE, 2006. 396 p.

Soong, Y. et al. Ultrasonic characterizations of gas holdup in a bubble column reactor. Chemical Engineering Community, v. 158, p. 181 – 192, 1997.

Stolojanu, V., Prakash, A. *Hydrodynamic measurements in a slurry bubble column using ultrasonic techniques*. Chemical Engineering Science, v. 52, n. 21, p. 4225 – 4230.

Taitel, Y., Barnea, D. *A consistent approach for calculating pressure drop in inclined slug flow*. Chemical Engineering Science, v. 45, n. 5, p. 1199 – 1206, 1990.

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 – 54, 1976.

Tanahashi, E. et al. *Application of the Ultrasonic Technique for Monitoring Intermittent Liquid-Gas and Liquid-Solid Flows*. 7th North American Conference on Multiphase Technology (MPNA 2010). Banff, Canada. Proceedings of the 7th North American Conference on Multiphase Technology, 2010.

Tanahashi, E. Desenvolvimento da técnica de ultrassom para medição da fração de vazio e detecção do padrão de escoamentos água-ar. 2010. 81 f. Dissertação – Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

Van Hout, R. et al. *Evolution of statistical parameters of gas-liquid slug flow along vertical pipes*. International Journal of Multiphase Flow, v. 27, p. 1579 – 1602, 2001.

Vatanakul, M., Zheng, Y., Couturier, M. *Application of Ultrasonic Technique in Multiphase Flows*. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 43, p. 5681 – 5691, 2004.

Wallis, G. B. *One-dimensional Two-phase Flow*. McGraw-Hill Book Company. New York, 1969.

Zheng, Y. *Ultrasonic Measurement for Two/Three-Phase Flow Detection*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 81, 2003.

Zheng, Y., Zhang, Q. *Simultaneous measurement of gas and solid holdups in multiphase systems using ultrasonic technique*. Chemical Engineering Science, v. 59, p. 3505-3514, 2004.

ANEXO A – VELOCIDADE DA ONDA SONORA EM DIVERSOS MATERIAIS

Material	Velocidade longitudinal		Velocidade transversal		Impedância acústica
	(in/μs)*	(m/s)	(in/μs)*	(m/s)	($Kg/m^2s \times 10^6$)
Resina acrílica	0,107	2.730	0,056	1.430	3,22
Alumínio	0,249	6.320	0,123	3.130	17,06
Berílio	0,508	12.900	0,35	8.880	23,5
Latão	0,174	4.430	0,083	2.120	37,3
Cádmio	0,109	2.780	0,059	1.500	24,02
Columbium	0,194	4.920	0,083	2.100	42,16
Cobre	0,183	4.660	0,089	2.260	41,61
Glicerina	0,076	1.920	—	—	2,42
Ouro	0,128	3.240	0,047	1.200	62,6
Inconel®	0,29	5.820	0,119	3.020	49,47
Aço	0,232	5.900	0,127	3.230	45,43
Aço rápido	0,22	5.600	0,126	3.220	40
Chumbo	0,085	2.160	0,028	700	24,49
Magnésio	0,183	4.660	0,093	2.350	34,44
Mercúrio	0,057	1.450	—	—	19,66
Molibidênio	0,246	6.250	0,132	3.350	63,75
Óleo para motor (SAE 20 ou 30)	0,069	1.740	—	—	1,51
Níquel	0,222	5.630	0,117	2.960	49,99
Platina	0,156	3.960	0,066	1.670	84,74
Nylon	0,087	2.200	0,043	1.100	0,4
Poliestireno	0,092	2.340	—	—	2,47
PVC	0,094	2.395	0,042	1.060	3,35
Prata	0,142	3.600	0,063	1.590	37,76
Aço 1020	0,232	5.890	0,128	3.240	45,63
Aço 4340	0,230	5.850	0,128	3.240	45,63
Aço 302	0,223	5.660	0,123	3.120	45,45
Aço inoxidável	0,226	5.740	0,122	3.090	45,4
Titânio 150 A	0,24	6.100	0,123	3.120	27,69
Tungstênio	0,204	5.180	0,113	2.870	99,72
Urânio	0,133	3.370	0,078	1.980	63,02
Água (20°C)	0,058	1.480	—	—	1,48
Zinco	0,164	4.170	0,095	2.410	29,61
Zircônia	0,183	4.650	0,089	2.250	30,13

* Fator de conversão: 1 m/s = 3,937 x 110-3 in/μs

Fonte: Panametrics (2001)

ANEXO B – VALORES DA VARIÁVEL $t_{V,P}$ PARA SEREM USADOS NO CRITÉRIO DE *STUDENT*

Degrees of freedom ν	t_{50}	t_{80}	t_{90}	t_{95}	t_{98}	t_{99}	$t_{99.9}$
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941
4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405
8	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
∞	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

APÊNDICE A – ALGORITMO PARA CALCULAR O TEMPO DE TRÂNSITO DA ONDA

```
% ler o arquivo que contém os dados ultrassônicos
file1='0_1int1';
ext='.txt';
data1=textread([file1 ext]);

cont1 = 0;
% Calcula o tempo de trânsito de cada pulso encontrando
pequenas variações no sinal.
% Retorna o valor zero caso o pulso emitido não volte ao sensor
    for i1 = 1:12000
        j1 = 1200;
        aux1 = data1(i1,j1);
        while(aux1 < 0.12)
            j1 = j1 + 1;
            if(j1 > 3000)
                aux1 = 0.13;
                j1=0;
                cont1 = cont1+1; % Armazena a quantidade de
pulsos perdidos
            else
                aux1 = data1(i1,j1);
            end
        end
        tt1(i1) = j1 / 2; % Divide o tempo de trânsito por dois
pois o programa calcula o tempo de ida e volta da onda
    end

    tt1 = tt1/20e6; % Divide o tempo pela frequência de
aquisição
```

APÊNDICE B - ALGORITMO PARA DETECÇÃO DAS FASES E CÁLCULO DAS VAZÕES.

```
% Definição dos limites
lim_sup = 5.325e-5; % Limite superior da tubulação
lim_inf = 3.235e-5; % interface água-ar
pontos = 200; % Largura mínima entre pontos no limite superior
para caracterizar uma bolha alongada.
% d = vetor que vai receber o primeiro processo de filtragem
d = zeros(1,length(b));
d(1) = b(1);
d(end) = b(end);
% Retira do sinal os pontos que estão acima do limite superior
 for i = 2:length(b)-1
     if b(i) > lim_sup
         if b(i-1) < lim_sup && b(i+1) < lim_sup
             d(i) = lim_inf;
         else
             d(i) = lim_sup;
         end
     else
         d(i) = b(i);
     end
 end
% O tempo de trânsito é convertido em limite superior ou
inferior
for i = 1:length(b)
    if d(i) < 0.9*lim_sup
        c(i) = lim_inf;
    else
        c(i) = lim_sup;
    end
end

% verifica se o começo da aquisição é uma bolha alongada ou um
pistão de líquido
j = 1;
while c(j) == lim_inf
    e(j) = lim_inf;
    j = j + 1;
```

```
end

% Compara o vetor com um vetor contendo apenas valores de
limite inferior de tamanho igual a variável pontos
% Caso a comparação seja igual, todos os valores do vetor são
igualados ao limite inferior até encontrar um valor igual ao
limitante superior.
% Caso contrário, o limite superior é encontrado,
caracterizando a presença de um pistão de líquido.


while j < length(c)

    if j <= (length(c)-pontos)
        largura = lim_inf*ones(1,pontos);
        res = sum(c(1,j:j+pontos-1)==largura) ==
length(largura);
    elseif j > (length(c)-pontos)
        largura = lim_inf*ones(1,length(c)-j);
        res = sum(c(1,j+1:length(c))==largura) ==
length(largura);
    end

    if res == 0
        e(j) = lim_sup;
    elseif res == 1
        e(j) = lim_inf;
        ii = j;
        while (c(ii) == lim_inf) & (ii < length(c))
            e(ii) = lim_inf;
            ii = ii + 1;
        end
        e(ii) = lim_sup;
        j = ii;
    end
    j = j + 1;
end
e(length(c)) = e(length(c)-1);

% As posições onde as trocas de nível ocorreram são armazenadas
no vetor vet.
f = e;
vet(1)=1;
j=2;
for i=2:length(e)
    if e(i) ~= e(i-1)
        vet(j) = i;
```

```
        j = j+1;
    end
end
% O tempo de duração de cada estrutura é calculado.
if e(1) == lim_inf
    for i=1:fix(length(vet)/2)
        med(i) = mean(b(vet(2*i-1):vet(2*i)));
        f(vet(2*i-1):vet(2*i)) = mean(b(vet(2*i-1):vet(2*i)));
        tem(i) = vet(2*i) - vet(2*i-1);
    end
else
    for i=1:fix(length(vet)/2)
        med(i) = mean(b(vet(2*i):vet(2*i+1)));
        f(vet(2*i):vet(2*i+1)) = mean(b(vet(2*i):vet(2*i+1)));
        tem(i) = vet(2*i+1) - vet(2*i);
    end
end

% Alimentação do vetor de velocidade
vel = [2.96 3.05 3.02 3.02 2.99 3.02 3.08 3.08 3.02 2.99 3.05
3.02 3.14 3.08 3.08];
clc
raio = .0508/2; % Raio da tubulação
med = med * 617.0447; % Conversão do tempo de trânsito em
comprimento
tem = tem / 2000; %(em seg)

% Cálculo da área transversal conforme passo 4 do filtro
for i = 1:length(med)
    if med(i) < raio
        hTRI = raio - med(i);
        base = sqrt(raio^2-hTRI^2);
        ang = 2*acos(hTRI/raio)*360/(2*pi);
        areaTRI = base * hTRI;
        areaARCO = (360-ang)*pi*raio^2/360;
        areas(i) = areaTRI + areaARCO;
    else
        hTRI = med(i) - raio;
        base = sqrt(raio^2-hTRI^2);
        ang = 2*acos(hTRI/raio)*360/(2*pi);
        areaTRI = base * hTRI;
        areaARCO = (360-ang)*pi*raio^2/360;
        areas(i) = pi*raio^2 - areaTRI - areaARCO;
    end
    vg(i) = areas(i)*tem(i)*vel(i);
end
volg = sum(vg) % Cálculo do volume de gás
```

```
voll = (pi*raio^2)*6*mean(vel)-volg % Cálculo do volume de
líquido
fprintf('Vazão de gás:');
volg/6 % Cálculo da vazão de gás
fprintf('Vazão de líquido:');
voll/6 % Cálculo da vazão de líquido

% Gráficos dos passos de filtragem.
figure(6);
subplot(4,1,1);
    plot(a,b);
subplot(4,1,2);
    plot(a,d,a,e,'r');
subplot(4,1,3);
    plot(a,c,a,e,'r');
subplot(4,1,4);
    plot(a,b,a,f,'r');
```