

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**José Luiz Gonçalves**

**Desenvolvimento de uma Técnica Ultrassônica para Medição da  
Concentração das Fases Dispersas em Escoamentos Multifásicos  
Representativos da Indústria de Petróleo e Gás Natural**

**Itajubá  
2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**José Luiz Gonçalves**

**Desenvolvimento de uma Técnica Ultrassônica para Medição da  
Concentração das Fases Dispersas em Escoamentos Multifásicos  
Representativos da Indústria de Petróleo e Gás Natural**

**Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Conversão de Energia.**

**Orientador: Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho**

**Itajubá  
2013**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

G635d

Gonçalves, José Luiz

Desenvolvimento de um a técnica ultrassônica para medi\_  
ção da concentração das fases dispersas em escoamentos mul\_  
tifásicos representativos da indústria de petróleo e gás natural /  
José Luiz Gonçalves. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

161 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Escoamentos multifásicos. 2. Ultrassom. 3. Petróleo. 4.  
Gás. 5. Rede neural artificial. I. Carvalho, Ricardo Dias Mar\_  
tins, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**José Luiz Gonçalves**

**Desenvolvimento de uma Técnica Ultrassônica para Medição da  
Concentração das Fases Dispersas em Escoamentos Multifásicos  
Representativos da Indústria de Petróleo e Gás Natural**

**Tese aprovada por banca examinadora em 11 de  
dezembro de 2013, conferindo ao autor o título de  
Doutor em Engenharia Mecânica.**

**Banca Examinadora:**

Dr. Valdir Estevam – PETROBRAS

Dr. Antonio Carlos Bannwart – UNICAMP

Dr. Luiz Antonio Alcântara Pereira – UNIFEI

Dr. Osvaldo José Venturini – IEM/UNIFEI

Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho – UNIFEI

**Itajubá  
2013**

# DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha filha Luísa Parreira Gonçalves e a minha adorável  
esposa Nicole Parreira.*

*“O saber a gente aprende com os mestres e os livros. A sabedoria,  
se aprende é com a vida e com os humildes.”*

**Cora Coralina**

## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa, Nicole Parreira, pelo amor e compreensão durante esta importante fase da minha vida.

Aos meus pais por toda a educação, amor, conselhos e ensinamentos.

Ao Professor Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho pela orientação, discussões e ensinamentos.

À Petrobras e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) que por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor de Petróleo e Gás número 16 – PRH16/ANP/MCT auxiliaram neste projeto.

Aos Professores, Jamil Haddad, Luiz Augusto Horta Nogueira, Antonio Carlos Bannwart, Osvaldo José Venturini, Luiz Antônio Alcântara Pereira, Marcos Aurélio de Souza e Luiz Fernando Barca pelo apoio, ensinamentos, sugestões e discussões.

Ao Eng. Dr. Valdir Estevam(Petrobras) pelo acompanhamento nos experimentos e pelas valiosas dicas.

Aos colegas de trabalho Pedro Duarte Antunes, Roberto Akira, Jorge Biazussi, Cesar Ofuchi, Fábio Coutinho, pelos conselhos, informações e palavras amigas.

Aos amigos e companheiros da República Casa Amarela, Juvêncio, Roberta, Pedro, Cabeludo, Colômbia, Rafa, Santiago, Pedro, Vitim, Kebrado e Tosco pelos momentos de descontração, churrascos e alegrias.

## RESUMO

**GONCALVES, Jose L.** Desenvolvimento de uma Técnica Ultrassônica para Medição da Concentração das Fases Dispersas em Escoamentos Multifásicos Representativos da Indústria de Petróleo e Gás Natural. 2013. 137p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Conversão de Energia). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá.

Recentemente a indústria de petróleo e gás natural tem investido grandes esforços no desenvolvimento de medidores multifásicos, visando principalmente reduzir o peso e o espaço ocupado pelos equipamentos de separação e medição dos escoamentos provenientes dos reservatórios. Neste contexto, o principal objetivo desta tese é contribuir para o desenvolvimento de uma técnica ultrassônica de medição multifásica de baixo custo com possibilidade de aplicação em diversas situações na indústria de petróleo. Foram realizados testes experimentais em um circuito vertical, em um circuito horizontal e na entrada de uma bomba centrífuga de um conjunto BCS horizontal. Na maioria das montagens, a tubulação constituía-se em acrílico, permitindo a visualização direta do escoamento e a realização de filmagens ultrarrápidas para sincronização dos parâmetros hidrodinâmicos do escoamento com os sinais ultrassônicos. No circuito de testes vertical, foram obtidas correlações entre a FVG e a razão de energia e o desvio padrão para misturas bifásicas óleo-ar, óleo-sólidos e óleo-água; trifásicas óleo-água-ar e óleo-ar-sólidos e quadrifásicas óleo-ar-água-sólidos. Na montagem horizontal, foi medida a FVG em escoamentos intermitentes água-ar por um método que utiliza a combinação do tempo de trânsito e da razão de energia. Na região da bolha alongada, o tempo de trânsito da onda ultrassônica fornece a espessura do filme de líquido e a fração volumétrica de gás. Na região do pistão de líquido aerado, o parâmetro ‘razão de energia’ nos quatro sensores é calculado e usado em uma rede neural artificial que fornece a FVG nesta região. Os resultados obtidos com este método são condizentes com as imagens obtidas por filmagens rápidas sincronizadas com o ultrassom e também com modelos matemáticos encontrados na literatura. Por fim, a técnica ultrassônica é aplicada para a medição da FVG em uma geometria específica que simula a entrada de uma bomba centrífuga submersível.

**Palavras-chave:** Escoamentos multifásicos; ultrassom; petróleo; gás; rede neural artificial.

## ABSTRACT

**GONCALVES, Jose L.** Development of an ultrasonic technique for the measurement of the dispersed phases concentrations in multiphase flows representative of the oil and gas industry. 2013. 137 p. Thesis (Ph.D. in Mechanical Engineering – Energy Conversion). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.

In recent years, much effort has been devoted by the oil and gas industry to the development of multiphase flow meters that could help reduce weight and space requirements for equipment to separate and measure the flow of fluids from the reservoirs. In this regard, the main purpose of this thesis is contribute to the development of a low cost ultrasonic technique capable of measuring the dispersed phases concentrations of multiphase flows in different situations in the oil and gas industry. Experiments were conducted in a vertical rig, in a horizontal rig, and at the inlet of a centrifuge pump of a horizontal ESP skid. For most experimentation series, an acrylic pipe was used so that high-speed filming of the flows could be made. The visual data were synchronized with the ultrasonic signals, which allowed for direct comparisons between both. In the vertical rig, correlations between the gas volume fraction and the acoustic attenuation were obtained for two-phase oil-air, oil-water, oil-solids flows; three-phase oil-air-solids and oil-air-water flows; and four-phase oil-air-water-solids flows. In the horizontal rig, the gas volume fraction of water-air flows was measured by means of a combination of the transit time of the ultrasonic wave and acoustic attenuation. In the elongated bubble section, the transit time allowed for the measurement of liquid film thickness and the gas volume fraction. In the aerated liquid slug the acoustic attenuation measured by four transducers was used as input data to an artificial neural network to provide the gas volume fraction in this flow section. The results obtained by means of this method are consistent with the mathematical models found in the literature and with the high-speed flow images. Finally, the ultrasonic technique was applied for the measurement of gas fraction in an annular space that simulated the inlet of an electric submersible pump.

**Key-words:** Multiphase flow; ultrasound; oil; gas; artificial neural network.

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Revisão Bibliográfica	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Estrutura da Tese	5
<b>2. A Medição Multifásica na Indústria de Petróleo e Gás</b>	<b>7</b>
2.1. Os Escoamentos Multifásicos na Indústria Petrolífera	7
2.2. Aplicações de Medidores Multifásicos na Indústria Petrolífera	15
2.3. Descrição de Técnicas e Princípios Físicos de Medidores Multifásicos	22
<b>3. Avaliação da Técnica Ultrassônica em uma Montagem Vertical Simplificada</b>	<b>28</b>
3.1. Descrição da Montagem Vertical Simplificada	28
3.2. Instrumentação Ultrassônica e de Filmagem Rápida	30
3.3. Definição dos Principais Parâmetros Ultrassônicos Utilizados	34
3.4. Procedimentos de Medida	37
3.5. Análise de Misturas Bifásicas Óleo-Ar	38
3.5.1. Tubulação de Acrílico	38
3.5.2. Tubulação de Aço	41
3.6. Análise de Misturas Bifásicas Óleo-Água	43
3.7. Análise de Misturas Bifásicas Óleo-Sólidos	45
3.8. Análise de Misturas Trifásicas Óleo-Ar-Água	47
3.9. Análise de Misturas Trifásicas Óleo-Ar-Sólidos	51
3.10. Análise de Misturas Bifásicas Óleo-Ar em Tubos com Depósito de Parafina	53
<b>4. Desenvolvimento da Técnica Ultrassônica para a Medição de Baixa Fração Volumétrica de Gás</b>	<b>56</b>
4.1. Descrição do Circuito Vertical	56
4.2. Procedimentos de Medida	60
4.3. Análise dos Sinais Ultrassônicos	64
4.4. Análise dos Padrões de Escoamento	65
4.5. Correlação entre Parâmetros Ultrassônicos e Fração Volumétrica de Gás	66
<b>5. Desenvolvimento da Técnica Ultrassônica para a Medição da Fração Volumétrica de Gás em Escoamentos Intermitentes</b>	<b>75</b>
5.1. Descrição do Circuito Horizontal para Estudo de Escoamentos Intermitentes	75
5.2. Procedimentos de Medida	77
5.3. Aplicação do Método Proposto por Grangeiro (2010)	80
5.4. Descrição do Novo Método de Medição da Fração de Gás em Escoamentos Intermitentes	84
5.5. Análise dos Resultados	88
<b>6. Desenvolvimento da Técnica Ultrassônica para Monitoramento do Escoamento na Entrada de uma Bomba Centrífuga Submersível</b>	<b>95</b>
6.1. Descrição da Montagem Experimental	95
6.2. Procedimentos de Medida	98
6.3. Sincronização de Sinais Ultrassônicos com Filmagens Rápidas	100
6.4. Correlação entre os Sinais Acústicos e a Fração de Gás na Montagem Simplificada	102
6.5. Análise da Atenuação Acústica em Escoamentos Água-Ar em um Conjunto BCS Horizontal	104
<b>7. Conclusões e Sugestões</b>	<b>106</b>
7.1. Principais Resultados Obtidos	106

7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	107
<b>8. Referências</b>	<b>108</b>
<b>Apêndice A</b>	<b>114</b>
<b>A. Conceitos Básicos Sobre o Ultrassom</b>	<b>114</b>
<b>Apêndice B</b>	<b>123</b>
<b>B. Análise dos Sinais Ultrassônicos na Tubulação de Duas Polegadas</b>	<b>123</b>
B.1. Identificação das Janelas de Atividade na Tubulação de Acrílico	123
B.2. Identificação das Janelas de Atividade em Tubulação de Aço	126
<b>Apêndice C</b>	<b>130</b>
<b>C. Análise dos Sinais Ultrassônicos na Montagem Simplificada BCS</b>	<b>130</b>
<b>Apêndice D</b>	<b>134</b>
<b>D. Análise dos Sinais Ultrassônicos no Conjunto BCS Horizontal</b>	<b>134</b>
<b>Anexo A</b>	<b>137</b>
<b>A. Propriedades Acústicas de Materiais<sup>11</sup></b>	<b>137</b>
<b>Anexo B</b>	<b>138</b>
<b>B. Dedução da Equação para o Cálculo da Espessura do Filme de Líquido</b>	<b>138</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. a) Separadores de teste sendo instalados em uma plataforma marítima e b) separadores de teste instalados em um navio-sonda.	2
Figura 2.1. Mapa de padrões bifásico líquido-gás em tubulação horizontal.	9
Figura 2.2. Mapa de padrões bifásicos líquido-gás em tubulação vertical.	11
Figura 2.3. Mapa de padrão de escoamento bifásico óleo leve-água vertical.	12
Figura 2.4. Mapa de padrão de escoamento bifásico óleo leve-água horizontal.	12
Figura 2.5. Padrões de escoamento a) estratificado água-óleo-gás e b) gás intermitente com líquidos estratificados.	13
Figura 2.6. Mapa de padrão de escoamentos horizontais trifásicos líquido-líquido-gás indicando as transições previstas por Lee <i>et al.</i> (1993) e por Taitel e Dukler (1976).	14
Figura 2.7. Diagrama trifásico óleo-água-gás em tubulação horizontal.	14
Figura 2.8. Sistema de produção com (a) separador primário e (b) com MMFs.	16
Figura 2.9. Aplicação de MMFs no desenvolvimento de campos de pequeno porte.	17
Figura 2.10. Esquema representativo da rota #1.	19
Figura 2.11. Esquema representativo da rota #2.	19
Figura 2.12. Esquema representativo da rota #3.	19
Figura 2.13. Esquema representativo da rota #4.	20
Figura 2.14. Vista esquemática simplificada de uma planta de processamento primário de petróleo.	20
Figura 2.15. Proposição de um procedimento completo de medição multifásica com base na técnica ultrassônica e em redes neurais artificiais.	22
Figura 3.1. Vista esquemática do dispositivo experimental com injeção de água e ar.	29
Figura 3.2. Vista esquemática do dispositivo experimental com injeção de areia e ar.	29
Figura 3.3. Esquema da estação ultrassônica usada em escoamentos (a) verticais e (b) horizontais.	31
Figura 3.4. Fotografia dos transdutores ultrassônicos utilizados nos testes experimentais.	32
Figura 3.5. Sinais no domínio do tempo e espectros de frequências dos sensores de (a) 1 MHz e (b) 2,25 MHz.	32
Figura 3.6. PXI modelo 1062Q utilizado para aquisição dos dados.	33
Figura 3.7. Gerador de pulsos <i>Panametrics</i> , modelo 5077PR, utilizado para gerar os pulsos no sensor a 0°.	33

- Figura 3.8. Filmadora de alta velocidade IDT, modelo Motion Pro X3, utilizada para filmagens rápidas do escoamento sincronizadas com o ultrassom. 34
- Figura 3.9. Energia instantânea no sensor a  $0^\circ$  em escoamento bifásico óleo-ar vertical no padrão bolhas dispersas. 34
- Figura 3.10. Energia média nos quatro sensores para diferentes concentrações de fases dispersas em escoamento bifásico óleo-ar. 35
- Figura 3.11. Razão de energia média para os quatro sensores em escoamento bifásico óleo-ar. 36
- Figura 3.12. Razão de energia instantânea obtida no sensor a  $0^\circ$  em escoamento vertical no padrão bolhas dispersas. 36
- Figura 3.13. Padrões de escoamento típicos para misturas óleo-ar: (a) FVG =2%, 38
- Figura 3.14. (a) Sinais típicos de frequência nominal 2,25 MHz em misturas óleo-ar e tubulação de acrílico no sensor a  $180^\circ$ ; (b) janela de atividade correspondente ao sensor a  $180^\circ$ . 39
- Figura 3.15. Razão de energia em função da FVG em misturas bifásicas óleo-ar para sensores de 2,25 MHz a (a)  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  e (b)  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  em tubulação de acrílico. 40
- Figura 3.16. Razão de energia em função da fração volumétrica de gás em misturas bifásicas óleo-ar para sensores 1 MHz a (a)  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  e (b)  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  em tubulação de acrílico. 41
- Figura 3.17. Razão de energia em função da FVG em misturas bifásicas óleo-gás e sensores 2,25 MHz a sensores a (a)  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  e (b)  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  em tubo de aço 1020. 42
- Figura 3.18. Razão de energia em função da FVG em misturas bifásicas óleo-gás para sensores de 1 MHz a (a)  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  e (b)  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  usando tubulação de aço 1020. 42
- Figura 3.19. Padrões de escoamento típicos em misturas bifásicas óleo-água: (a) FVA =2%; (b) FVA =5% e (c) FVA = 10%. 43
- Figura 3.20. Razão de energia em função da FVA em misturas bifásicas óleo-água. 44
- Figura 3.21. Energia média dos pulsos em função da FVS em misturas bifásicas óleo-sólidos (série 1#). 46
- Figura 3.22. Razão de energia em função da FVS em misturas bifásicas óleo-sólidos para a (a) série 1# e (b) série 2#. 46
- Figura 3.23. Padrões de escoamento típicos para misturas trifásicas óleo-gás-água nas seguintes condições: (a) FVA=3~6% e FVG=2%, (b) FVA=6~9% e FVG=8% e 47
- Figura 3.24. Distribuição do diâmetro de gotas em duas misturas distintas correspondentes ao segundo e terceiro patamar de FVA. 48

Figura 3.25. Razão de energia em função da FVG para misturas trifásicas óleo-ar-água.	49
Figura 3.26. Desvio padrão da razão de energia em função da concentração da concentração da fase dispersa para misturas (a) bifásicas óleo-água, (b) bifásicas óleo-ar e (c), (d), (e) trifásicas óleo-ar-água.	50
Figura 3.27. Razão de energia em função da FVG para misturas trifásicas óleo-ar-sólidos.	51
Figura 3.28. Desvio padrão da razão de energia em função da concentração da fase dispersa para misturas (a) bifásicas óleo-sólidos, (b) bifásicas óleo-gás e (c), (d), (e) trifásicas óleo-ar-sólidos.	52
Figura 3.29. (a) Tubos de acrílico com depósitos de parafina e (b) montagem da estação ultrassônica simulando a posição usada para medir a fração volumétrica de gás e a espessura do depósito.	54
Figura 3.30. Razão de energia em função da fração volumétrica de gás para as seguintes situações: (a) sem depósito de parafina, (b) 0,7 cm de espessura e (c) 1,2 cm de espessura.	55
Figura 4.1. Circuito de teste de escoamentos multifásicos (LRF-UNIFEI).	56
Figura 4.2. (a) Reservatórios do circuito experimental, (b) tanque de suspensão e (c) tubulações de acrílico.	57
Figura 4.3. (a) Ponto de injeção de gás no escoamento e (b) seção de medição da fração volumétrica de gás na parte superior do circuito.	58
Figura 4.4. (a) Seção de testes entre as válvulas de fechamento rápido e (b) montagem da estação ultrassônica na seção de testes na tubulação de uma polegada.	58
Figura 4.5. (a) Sistema de controle e medição das vazões de líquido e (b) bombas de cavidade progressiva.	59
Figura 4.6. a) Sinal típico no sensor a 180° e b) média dos pulsos individuais na janela de atividade para três frações volumétricas de gás em escoamentos bifásicos óleo-ar.	64
Figura 4.7. Evolução dos padrões de escoamentos bifásicos óleo-ar na tubulação de uma polegada: (a) bolhas dispersas; (b) calotas; (c) pistão estável; (d) pistão instável; (e) agitado e (f) anular.	65
Figura 4.8. Evolução dos padrões de escoamentos bifásicos óleo-ar na tubulação de duas polegadas: (a) calotas médias; (b) calotas grandes; (c) pistão estável e (d) pistão estável.	66
Figura 4.9. Razão de energia média em função da FVG na tubulação de duas polegadas.	67
Figura 4.10. Desvio padrão da razão de energia instantânea na tubulação de duas polegadas.	69

Figura 4.11. Razão de energia média em função da FVG na tubulação de uma polegada.	71
Figura 4.12. Desvio padrão da razão de energia instantânea na tubulação de uma polegada.	72
Figura 4.13. (a) Razão de energia média e (b) desvio padrão da razão de energia instantânea nos quatro sensores em tubulação de uma e de duas polegadas.	73
Figura 5.1. Circuito multifásico horizontal com trocador de calor localizado no LABPETRO-UNICAMP.	76
Figura 5.2. Vista esquemática do posicionamento das estações de ultrassom na seção de visualização do escoamento.	77
Figura 5.3. Fotografia da seção de testes indicando o posicionamento dos sensores de ultrassom.	77
Figura 5.4. Velocidades superficiais medidas pelos medidores monofásicos superpostas no mapa de padrões de Taitel (1976).	78
Figura 5.5. Painel virtual de visualização de dados de pressão e vazão dos escoamentos.	80
Figura 5.6. Fluxograma para o cálculo da espessura do filme de líquido na região da bolha alongada.	81
Figura 5.7. Identificação das bolhas de gás pelo parâmetro tempo de trânsito na amostra #5 da Tabela 5.1.	82
Figura 5.8. Aplicação do método proposto por Grangeiro (2010) para o cálculo da espessura do filme de líquido: (a) exclusão dos pontos espúrios, (b) criação de uma onda quadrada, (c) identificação das bolhas alongadas e dos pistões de líquido e (d) cálculo da espessura do filme de líquido.	83
Figura 5.9. Superposição do tempo de trânsito e do sinal filtrado pelo método de Grangeiro (2010) referentes à amostra #5.	84
Figura 5.10. Bolhas alongadas com superfícies irregulares típicas das amostras estudadas.	84
Figura 5.11. Arquiteturas da RNA utilizada para medir a FVG na região do pistão de líquido aerado.	86
Figura 5.12. Funções de ativação dos neurônios na primeira camada e na camada oculta da RNA.	86
Figura 5.13. Dados de razão de energia em função da fração volumétrica de gás utilizados para o treinamento e validação da RNA.	87
Figura 5.14. Valores de FVG previstos pela RNA durante o processo de validação e teste.	88
Figura 5.15. Esquema indicando o procedimento de cálculo da FVG no escoamento.	88

Figura 5.16. Pulsos superpostos indicando o limiar de voltagem usado pelo algoritmo.	89
Figura 5.17. Tempo de trânsito e razão de energia para o escoamento na transição entre o padrão estratificado e o tamponado, referente à amostra #1.	90
Figura 5.18. Tempo de trânsito e razão de energia para escoamento no padrão intermitente pistonado referente à amostra #3.	90
Figura 5.19. Tempo de trânsito e razão de energia para escoamento no padrão intermitente pistonado, referente à amostra #5.	92
Figura 5.20. Tempo de trânsito e razão de energia para escoamento na transição entre o padrão intermitente pistonado e o bolhas dispersas, amostra #9.	92
Figura 5.21. Comparação entre as frações de gás obtidas por correlações de modelos matemáticos e pela técnica ultrassônica.	94
Figura 6.1. (a) Vista esquemática e (b) fotografia da montagem simplificada vertical utilizada para simular a geometria na entrada da bomba do conjunto BCS (LABPETRO-UNICAMP).	96
Figura 6.2. Esquema simplificado do conjunto BCS horizontal instalado no LABPETRO-UNICAMP indicando a seção de montagem dos sensores ultrassônicos.	97
Figura 6.3. Fotografia da estação ultrassônica montada sobre o prolongador na entrada da bomba.	98
Figura 6.4. Padrões de escoamento em mistura água-ar para FVG igual a: (a) 4%; (b) 10% e (c) 18%.	100
Figura 6.5. Razão de energia em função do tempo de aquisição nos transdutores a 0° e 180° com FVG =2%.	101
Figura 6.6. Razão de energia em função do tempo de aquisição nos transdutores a 0° e 180° com FVG =12%.	101
Figura 6.7. Vista esquemática das reflexões e transmissões nas várias interfaces do dispositivo experimental.	103
Figura 6.8. Razão de energia média em função da FVG para duas misturas água-ar nos transdutores a (a) 0°, (b) 45°, (c) 135° e (d) 180°.	103
Figura 6.9. Razão de energia em função da fração volumétrica de gás nos sensores a (a) 0° e 45° e (b) 135° e 180°.	104
Figura 6.10. Esquema mostrando o acúmulo de gás na parte superior em frente ao sensor emissor 0°.	104
Figura A.1. Espectro de frequência do ultrassom e suas aplicações mais comuns.	114
Figura A.2. Reflexão e transmissão de uma onda plana oblíqua ao plano da interface entre dois fluidos com impedâncias acústicas diferentes.	117

Figura A.3. Principais elementos de um transdutor ultrassônico típico (a) monocristal e (b) duplo elemento.	119
Figura A.4. Campos acústicos gerados por transdutores ultrassônicos.	120
Figura A.5. Diagrama em blocos de um sistema eletrônico típico para aquisição de sinais ultrassônicos em ensaios não destrutivos.	121
Figura B.1. Caminhos possíveis para a propagação das ondas acústicas na montagem simplificada vertical.	123
Figura B.2. Sinais típicos nos quatro transdutores de 2,25 MHz a (a) 0°, (b) 45°, (c) 135° e (d) 180° em meio contínuo óleo.	125
Figura B.3. Definição das janelas de atividade nos transdutores de 2,25 MHz em tubulação de aço contendo óleo USP como fase contínua.	128
Figura B.4. Definição das janelas de atividade nos transdutores de 1 MHz a em tubulação de aço contendo óleo USP.	129
Figura C.1. Dimensões e trajetórias de propagação da onda ultrassônica usadas para calcular o tempo de trânsito na montagem auxiliar vertical de BCS.	130
Figura C.2. Identificação das janelas de atividade nos sinais ultrassônicos referentes ao sensor a 0° (a) sem a barra central de aço e (b) com a barra.	131
Figura C.3. Identificação das janelas de atividade nos sinais ultrassônicos referentes aos sensores a 45° (a) sem a barra central de aço e (b) com a barra.	132
Figura C.4. Identificação das janelas de atividade nos sinais ultrassônicos referentes aos sensores a 135° (a) sem a barra central de aço e (b) com a barra.	132
Figura C.5. Identificação das janelas de atividade nos sinais ultrassônicos referentes aos sensores a 180° (a) sem a barra central de aço e (b) com a barra.	133
Figura D.1. Sinal típico no sensor a 45° instalado diretamente na carcaça metálica da bomba: (a) 2,25 MHz e (b) 1 MHz.	134
Figura D.2. Dimensões e trajetórias de propagação da onda ultrassônica no prolongador do conjunto BCS horizontal.	135
Figura D.3. Sinais típicos e identificação das janelas de atividades nos quatro sensores posicionados a (a) 0°, (b) 45°, (c) 135° e (d) 180° em volta do prolongador de polipropileno na entrada da bomba.	136
Figura B.1. Representação das variáveis do modelo considerando (a) espessura do filme de líquido menor do que o raio da tubulação e (b) espessura do filme de líquido maior ou igual ao raio da tubulação.	138

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Resumo comparativo dos padrões definidos na literatura para tubulações horizontais.	8
Tabela 2.2. Identificação e descrição dos padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos verticais.	10
Tabela 2.3. Requisitos e vantagens dos MMFs em diversas aplicações na indústria de petróleo e gás.	18
Tabela 2.4. Parâmetros medidos e não medidos por instrumentos da rota #1.	21
Tabela 2.5. Princípios operacionais e técnicas de medição multifásica.	23
Tabela 2.6. Resumo dos princípios físicos de funcionamento e características dos principais medidores comerciais trifásicos (óleo-gás-água) atuais.	25
Tabela 3.1. Condições e testes realizados na montagem experimental simplificada.	38
Tabela 3.2. Distribuição do tamanho de partículas e parâmetros de atenuação no óleo.	45
Tabela 3.3. Coeficiente de determinação $R^2$ entre os parâmetros ultrassônicos e a FVG na montagem simplificada.	50
Tabela 3.4. Coeficiente de determinação $R^2$ entre os parâmetros ultrassônicos e a fração volumétrica de gás na montagem simplificada.	53
Tabela 4.1. Tabela de variáveis primárias correspondentes às linhas de líquido e de gás.	61
Tabela 4.2. Tabela de variáveis secundárias correspondentes às seções de injeção de ar de testes.	61
Tabela 4.3. Tabela de valores absolutos de pressão e temperatura do ar.	62
Tabela 4.4. Parâmetros primários calculados referentes às vazões volumétricas de líquido e de gás.	62
Tabela 4.5. Parâmetros secundários calculados na seção de testes.	63
Tabela 4.6. Variáveis e parâmetros adicionais para utilização no processamento dos sinais ultrassônicos.	63
Tabela 4.7. Coeficiente de determinação $R^2$ entre os parâmetros ultrassônicos e a FGV para escoamentos bifásicos, trifásicos e quadrifásicos em tubulação de uma e de duas polegadas.	73
Tabela 5.1. Velocidades e padrões de escoamentos horizontais na seção de medição.	79
Tabela 5.2. Parâmetros ultrassônicos utilizados para aquisição das amostras de escoamento.	80
Tabela 5.3. Resultados obtidos para o cálculo da fração volumétrica de gás em diferentes padrões de escoamento.	93

Tabela 6.1. Descrição dos parâmetros ultrassônicos para aquisição dos dados nas montagens experimentais.	99
Tabela A.1. Propriedades acústicas dos materiais e fluidos utilizados nesta tese.	118
Tabela A.2. Índices de reflexão e transmissão do feixe ultrassônico nas interfaces dos principais materiais utilizados nesta tese, considerando a interface plana.	118
Tabela B.1. Propriedades dos materiais atravessados pelo feixe ultrassônico.	124
Tabela B.2. Principais caminhos seguidos pela onda e o respectivo tempo de trânsito para tubulação de acrílico e fase contínua óleo USP.	124
Tabela B.3. Principais caminhos seguidos pela onda e o respectivo tempo de trânsito para tubulação em aço 1020 e fase contínua óleo USP.	127
Tabela C.1. Principais caminhos seguidos pela onda e o respectivo tempo de trânsito considerando a barra de aço central, tubulação de acrílico e fase contínua óleo USP descritos na Figura C.1.	131
Tabela D.1. Principais caminhos seguidos pela onda e o respectivo tempo de trânsito..	135

## SIMBOLOGIA

### Letras Latinas

<i>A</i>	Amplitude da onda	m ou V
A	Área da seção transversal do duto	m <sup>2</sup>
a	Raio da partícula	m
AG	Área transversal ocupada pelo gás	m <sup>2</sup>
areaARCO	Área do arco AOCD	m <sup>2</sup>
areaTRI	Área do triângulo AOC	m <sup>2</sup>
AT	Área total transversal da tubulação	m <sup>2</sup>
B	Padrão de escoamento bolhas	
BA	Subpadrão de escoamento bolhas agrupadas	
BCS	Bomba centrífuga submersa (electric submersible pump)	
BCP	Bomba de cavidade progressiva	
BD	Subpadrão de escoamento bolhas dispersas	
BMH	Bombeio mecânico com hastes	
c	Velocidade de propagação da onda acústica	m·s <sup>-1</sup>
cp	Calor específico a pressão constante	J·(kg·K) <sup>-1</sup>
D	Diâmetro	m
E	Energia do pulso ultrassônico	V <sup>2</sup> ·s
efl	Espessura do filme de líquido	m
END	Ensaio não destrutivo	-
E <sub>OD</sub>	Número de Eötvös.	-
F	Foco do feixe acústico	m
FVG	Fração volumétrica de gás	%
FVA	Fração volumétrica de água	%
FVO	Fração volumétrica de óleo	%
FVS	Fração volumétrica de sólidos	%
g	Fase gasosa	-
GL	Gas lift	-
GLC	Gas lift contínuo	-
GLI	Gas lift intermitente	-
I	Intensidade acústica	W·m <sup>-2</sup>
K	Constante de mola	N·m <sup>-1</sup>
k	Número de onda	m <sup>-1</sup>
L	Comprimento	m
l	Fase líquida	-
m	Vazão mássica do fluido	kg·s <sup>-1</sup>
MMF	Medidor multifásico	
MTBF	Tempo médio entre falhas (mean time between failure)	-
<i>N</i>	Distância linear do campo acústico próximo	m
P	Pressão média	Pa
p	Pressão instantânea	Pa
PE	Subpadrão de escoamento pistão estável	

PI	Subpadrão de escoamento pistão instável	
$P_0$	Pressão média de equilíbrio	Pa
Q	Vazão volumétrica	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
R	Índice de reflexão	-
r	Raio interno da tubulação	m
RAO	Razão água-óleo	-
RE	Razão de energia dos pulsos ultrassônicos	-
Re	Número de Reynolds	-
RGO	Razão gás-óleo	-
RNA	Rede neural artificial	
S	Fator de escorregamento entre as fases	-
T	Índice de transmissão	-
tt	Tempo de trânsito	$\mu\text{s}$
U	Velocidade superficial da fase no escoamento	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
u	Velocidade média da fase no escoamento	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
UCT	Tomografia Computadorizada de Ultrassom (UCT)	
VFR	Válvula de fechamento rápido	-
X	Parâmetro proposto Lockhart-Martinelli	-
x	Posição no eixo das abcissas ou distância linear percorrida pela onda	m
Z	Impedância acústica	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$
ZF	Zona focal	m
ZFN	Zona focal normalizada	m

### Letras Gregas

$\alpha$	Atenuação acústica por absorção	$\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$
$\gamma$	coeficiente isentrópico	-
$\delta$	Espessura da camada limite	m
$\theta_1$	Ângulo AOB	°
$\theta_2$	Ângulo AOC	°
$\lambda$	Comprimento de onda	m
$\mu$	Viscosidade dinâmica	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\nu$	Velocidade instantânea da partícula de fluido	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\xi$	Densidade de energia	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$
$\nu$	Viscosidade cinemática	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\rho$	Densidade instantânea	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho$	Massa específica	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_0$	Densidade no ponto de equilíbrio	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\sigma$	Desvio padrão	-
$\tau$	Período de cada ciclo	s
$\phi$	Fase ou meio contínuo onde a onda ultrassônica propaga-se	
$\Phi$	Ângulo defase	rad
$\omega$	Frequência angular	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

**Subscritos**

a	Água	-
b	Bolhas	-
BA	Bolhas alongadas	-
BD	Bolhas dispersas	-
e	Externo	-
fin	Final	-
g	Gás	-
ge	Gás na entrada da bomba	-
gu	Gás úmido	-
i	Interno ou incidente	-
ini	Inicial	-
ins	Instantânea	-
l	Líquido	-
lg	Líquido gasoso	-
LM	Lockhart-Martinelli	-
max	Máximo (a)	-
N	Normalizado (a) ou Número de pulsos ultrassônicos disparados	-
o	Óleo	-
p	Pistão de líquido	-
R	Refletido	-
T	Transmitido	-
0	Posição de equilíbrio	-

**Siglas**

IEM	Instituto de Engenharia mecânica
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
LRF	Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado
LABPETRO	Laboratório Experimental de Petróleo "Kelsen Valente"
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
CENPES	Centro de Pesquisas da Petrobras
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O controle e o monitoramento da concentração de fases dispersas se fazem necessários em diversos processos da indústria de petróleo e gás. De forma geral, os medidores multifásicos (MMFs) podem ser usados para substituir os separadores de teste, reduzir o custo com vasos de pressão, tubulações, válvulas e outros equipamentos, além de permitir a monitoração de poços individuais, sistemas de elevação artificial e a produção total de um campo de petróleo. Particularmente nos testes de poços marítimos, há a necessidade de reduzir o tamanho e peso dos equipamentos de separação e medição (Figura 1.1), o que tem viabilizado o desenvolvimento de diversos MMFs comerciais capazes de operar em linha ou sem requerer a separação total das fases.

Diversas técnicas têm sido usadas por estes medidores para identificar padrões de escoamento e concentrações de fases dispersas. Segundo Falcone *et al.* (2002), aquelas mais usadas são densitometria de radiação gama de dois sensores, impedância elétrica, micro-ondas, pressão diferencial e correlação cruzada. Por outro lado, a técnica ultrassônica tem apresentado resultados promissores na medição multifásica, sendo já bem estabelecida em outras áreas da engenharia como, por exemplo, na medição da vazão de escoamentos monofásicos, ensaios não destrutivos para detecção de falhas e ultrassonografia médica. No que tange às vantagens da técnica ultrassônica na medição multifásica, pode-se citar: não-radiativa, não-intrusiva, de baixo preço, utilização de sensores robustos disponíveis comercialmente e possibilidade de operação em ambientes hostis como, por exemplo, em águas profundas e fluidos corrosivos. Com relação às desvantagens da técnica, podem ser citadas a forte atenuação da onda acústica em tubulações de aço e a necessidade de aferição para situações diversas. Todavia, o desenvolvimento da técnica para aplicação na medição multifásica tem sido alvo de diversas pesquisas na literatura (Kyotōmaa 1995; Xu 1997; Bamberger 2004; Zheng 2004; Carvalho 2009; Falcone *et al.* 2009; Carvalho 2010; Panetta 2010). Os princípios físicos adotados por estes trabalhos estão relacionados ao efeito Doppler, atenuação acústica e velocidade de propagação.



Figura 1.1. a) Separadores de teste sendo instalados em uma plataforma marítima e b) separadores de teste instalados em um navio-sonda.

Fonte: a) Alderley, (2012) e b) Expro Group, (2013).

Com relação ao ‘método Doppler’, sua aplicação na medição multifásica tem sido mais intensa na medição da velocidade das fases. Esta técnica se baseia no efeito Doppler, pelo qual o eco das ondas ultrassônicas tem sua frequência alterada pela reflexão em interfaces suspensas como bolhas ou particulados que se movem juntamente com o fluido. Murakawa *et al.* (2005) propuseram um método para determinar a velocidade de cada fase em escoamentos bifásicos água-ar por meio do método Doppler. Foram usados dois transdutores concêntricos: o interno com 3 mm de diâmetro e frequência de 8 MHz, empregado para medição da vazão do líquido, e o externo com 8 mm de diâmetro e frequência de 2 MHz, usado para a medição da vazão da fase gasosa. Murai *et al.* (2010) usaram o efeito Doppler para detectar a interface gasosa em escoamentos bifásicos água-ar horizontais. Estes autores observaram que superfícies lisas, como bolhas esféricas, fornecem resultados satisfatórios e mais precisos do que interfaces rugosas como bolhas alongadas de ar (bolhas de Taylor ou pistões de gás). Este método pode ser desenvolvido para outras condições experimentais para fornecer a velocidade de uma dada fase. Esta medida de velocidade pode ser acoplada à concentração, que pode ser obtida por outra técnica, resultando na vazão total da fase em questão.

Carvalho *et al.* (2009) e Tanahashi *et al.* (2010a) relacionaram a atenuação acústica de sinais ultrassônicos com a fração de vazio e com o padrão de escoamento em escoamentos bifásicos água-ar verticais ascendentes. O aparato experimental foi composto por um tubo de oito metros de comprimento e duas polegadas de diâmetro por onde escoava água a uma vazão fixa, enquanto a vazão de ar variava. Foi observada uma correlação clara entre a atenuação acústica dos sensores e a fração de vazio. Zheng e Zhang (2004) estudaram os escoamentos bifásicos óleo-gás e óleo-sólidos e trifásicos óleo-sólidos-gás, onde foram

identificadas as concentrações de sólidos e de gás de maneira independente. Soong *et al.* (1995) desenvolveram uma técnica ultrassônica para medir a concentração de sólidos em um reator químico trifásico, onde a atenuação acústica e a velocidade da onda se mostraram funções bem definidas da concentração de gás e de sólidos na mistura. Kyotömaa (1995) apresentou uma discussão sobre os mecanismos de atenuação acústica e espalhamento em suspensões de partículas sólidas em líquidos. O autor identificou três regimes diferentes de dissipação acústica que dependem da distribuição do raio das partículas,  $a$ , do comprimento da onda ultrassônica no meio líquido,  $k$ , e do número de Reynolds associado à partícula sólida. Os regimes identificados são: regime de espalhamento múltiplo ( $ka \gg 1$ ); regime viscoso ( $Re \ll 1$ ); e regime inercial ( $Re \gg 1$ ). A atenuação acústica é um parâmetro de medição que pode ser correlacionado com a concentração das fases dispersas para aplicação em diversos tipos de escoamentos. Todavia, na literatura há poucos trabalhos aplicados a escoamentos trifásicos e quadrifásicos representativos da indústria de petróleo e gás.

Com relação ao parâmetro tempo de trânsito, que tem como base a velocidade de propagação da onda em um dado meio, observa-se um grande potencial na aplicação em medição de FVG e velocidade das fases em escoamentos intermitentes. Grangeiro (2010) usou o tempo de trânsito para medir a velocidade das fases e a FVG em escoamentos bifásicos intermitentes horizontais água-ar. Foram usados transdutores de cristal duplo (pulso-eco) em duas estações separadas, tendo sido obtidos resultados satisfatórios na medição da vazão das fases líquida e gasosa. Paiva (2011) estudou os parâmetros tempo de trânsito e atenuação acústica em escoamentos trifásicos água-ar-sólidos verticais; as correlações entre os parâmetros acústicos e a concentração de gás mostrou-se satisfatória. Masala e Chang (2007) mediram a espessura do filme de líquido e a FVG de escoamentos bifásicos nos padrões estratificado e anular. O experimento consistiu em quatro transdutores ultrassônicos funcionando no modo pulso-eco que permitiam a detecção da interface líquido-gás após o processamento dos sinais. Murai *et al.* (2010) também usaram o tempo de trânsito para detectar as interfaces gasosas em escoamentos horizontais água-ar. Estes dois últimos autores usaram um único transdutor no modo pulso-eco e o escoamento foi intermitente pistonado. Em suas teses de doutorado, Faccini (2008) e Cunha Filho (2010) usaram o parâmetro tempo de trânsito para detectar as interfaces das bolhas e calcular a FVG e a velocidade destas bolhas em escoamentos bifásicos água-ar horizontais e inclinados. Estes resultados foram usados em um modelo teórico-numérico a fim de se desenvolver um medidor multifásico (MMF). Uma combinação de tempo de trânsito e atenuação acústica foi proposta por Bond *et al.* (2003) para medir a concentração de sal em uma solução por meio da correlação destes

parâmetros com a densidade da solução. Estes autores observaram que o aumento da densidade da solução associada ao aumento da concentração de sal promove uma redução do tempo de trânsito e um aumento da amplitude da onda transmitida, ambos de forma linear.

Outras técnicas ultrassônicas encontradas na literatura também foram aplicadas a escoamentos multifásicos. McClements (1994) e Hibberd (1997) estudaram o potencial da técnica ultrassônica para medir a concentração, a distribuição de tamanho e a floculação de gotas de água em óleo por meio do espalhamento do feixe acústico. Foram apresentados modelos empíricos de espalhamento acústico nestas emulsões. Surpadan *et al.* (2007) usaram a técnica de tomografia computadorizada de ultrassom (UCT) para medir a área interfacial em escoamentos bifásicos líquido-gás. Os autores usaram 12 sensores de 2 MHz em uma coluna de bolhas dispersas tendo como fase contínua água ou solução de glicerol 10% m/m. Cong *et al.* (2008) desenvolveram um método para medir a concentração de gás em escoamentos gás-líquido por meio de ressonância acústica (frequência e amplitude da onda acústica), onde foram testados óleo e água como fase contínua. A técnica ultrassônica foi também estudada para medir a densidade de suspensões e lamas (Bond *et al.* 2003), propriedades reológicas de materiais fundidos (Prasad *et al.* 2008) e distribuição do tamanho de partículas e suas concentrações (Panetta 2010).

Esta tese visou contribuir para o desenvolvimento da técnica ultrassônica para a medição de fases dispersas com base no tempo de trânsito e na atenuação acústica. Buscou-se simular alguns dos padrões representativos da indústria de petróleo e gás usando um circuito de testes horizontal e um circuito de testes vertical. No circuito horizontal, buscou-se aprimorar a técnica desenvolvida por Grangeiro (2010) para escoamentos intermitentes água-ar. No circuito vertical, os testes foram realizados em escoamentos bifásicos a quadrifásicos com óleo como fase contínua, tendo-se focado no desenvolvimento da técnica para a medição da concentração de gás mesmo na presença de outras fases dispersas. Além disso, a fim de averiguar a possibilidade de aplicação da técnica em outras geometrias, foi feito um estudo preliminar visando medir a fração de gás de escoamentos água-ar na entrada de um conjunto de bombeio centrífugo submersível (BCS).

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta tese é contribuir para o desenvolvimento da técnica ultrassônica para a medição da concentração das fases dispersas em escoamentos multifásicos presentes em diversas situações da indústria de petróleo e gás natural. Prioridade será dada à medição da fração volumétrica de gás (FVG) destes escoamentos.

Este objetivo geral pode ser desdobrado nos seguintes objetivos específicos:

- Aprimoramento do código computacional desenvolvido por Tanahashi (2010b), Grangeiro (2010) e Paiva (2011) de modo a abarcar as novas situações tratadas nesta tese;
- Desenvolvimento da técnica para a medição da FVG em escoamentos bifásicos, trifásicos e quadrifásicos tendo óleo como fase contínua;
- Aprimoramento do método desenvolvido por Grangeiro (2010) para medição da FVG de escoamentos intermitentes horizontais água-ar;
- Estudo preliminar da aplicação de uma rede neural artificial (RNA) para medição da FVG e identificação do padrão de escoamentos verticais água-ar visando reduzir a necessidade de aferição da técnica ultrassônica;
- Estudo preliminar da medição ultrassônica da FVG em um experimento simplificado simulando a entrada de uma bomba de um conjunto BCS horizontal;
- Averiguação da possibilidade de aplicação da técnica ultrassônica para medição da FVG e monitoramento do escoamento na entrada de uma bomba BCS real.

### **1.3. ESTRUTURA DA TESE**

Esta tese é composta por oito capítulos descritos a seguir:

O **Capítulo 1** descreveu o estágio atual de desenvolvimento da técnica ultrassônica aplicada a escoamentos multifásicos, contextualizando os objetivos e a contribuição desta tese.

O **Capítulo 2** apresenta uma revisão bibliográfica da medição multifásica no contexto da indústria petrolífera, abrangendo os escoamentos representativos desta indústria, os tipos de medidores comerciais e as configurações (“rotas”) de sistemas de medição multifásica.

O **Capítulo 3** apresenta os trabalhos iniciais de caracterização dos sinais ultrassônicos em diversas situações, identificando assim o potencial do ultrassom para a medição de parâmetros importantes de escoamentos multifásicos.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados do desenvolvimento da técnica ultrassônica para medição da FVG em escoamentos verticais bifásicos, trifásicos e quadrifásicos verticais no padrão bolhas dispersas tendo óleo como fase contínua.

O **Capítulo 5** apresenta o desenvolvimento da técnica ultrassônica para a medição da FVG e identificação das estruturas de escoamento intermitentes horizontais água-ar com base na combinação do tempo de trânsito, razão de energia e uma rede neural artificial.

O **Capítulo 6** apresentam os resultados iniciais para o desenvolvimento da técnica ultrassônica para medição da FVG na entrada de uma bomba centrífuga submersível (BCS).

O **Capítulo 7** apresenta as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

O **Capítulo 8** apresenta as referências bibliográficas.

O **Apêndice A** trata dos princípios básicos de acústica e de fenômenos acústicos em interfaces entre diferentes meios. Informações deste apêndice são mencionadas diversas vezes ao longo da tese a fim de explicar comportamentos de curvas e resultados experimentais.

O **Apêndice B** trata das trajetórias acústicas, da instrumentação ultrassônica e dos procedimentos de cálculo do tempo de trânsito no caso de tubulações de duas polegadas e de uma polegada, delimitando as porções dos sinais que trazem informações sobre os escoamentos estudados.

O **Apêndice C** mostra as trajetórias acústicas e as janelas de atividade na geometria que simula a entrada de uma bomba de um conjunto BCS.

O **Apêndice D** apresenta os sinais ultrassônicos obtidos diretamente na entrada da bomba do conjunto BCS, discutindo o problema de atenuação pela interface aço/fluido e a necessidade da montagem dos transdutores em um material plástico. São discutidas também as trajetórias acústicas e as janelas de atividade dos sinais.

O **Anexo A** relaciona densidades, velocidades longitudinais e transversais de ondas acústicas em diversos materiais.

O **Anexo B** apresenta a dedução da equação utilizada para o cálculo da espessura do filme de líquido desenvolvida por Grangeiro (2010) para a medição da concentração de gás em escoamentos intermitentes.

## CAPÍTULO 2

### 2. A MEDIÇÃO MULTIFÁSICA NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

#### 2.1. OS ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

O escoamento multifásico é definido como sendo duas ou mais fases com propriedades diferentes e imiscíveis que escoam simultaneamente em um duto ou canal. Quando as fases líquida e gasosa escoam juntas dentro de um duto fechado, distribuem-se segundo configurações interfaciais próprias. Existe uma distribuição espacial das fases na mistura dentro do duto que, de acordo com Salgado (2010), depende das seguintes variáveis:

- Condições operacionais: vazão, pressão, temperatura, velocidade e outros;
- Geometria da tubulação: dimensão, inclinação, forma e outros;
- Propriedades das fases: densidade, viscosidade, tensão superficial e outros.

Na indústria de petróleo e gás natural, os escoamentos multifásicos se fazem presentes em diversas situações, como por exemplo, em meios porosos (reservatórios), canais abertos (separadores) e dutos fechados (tubulações). Nos processos de refino e perfuração, podem ocorrer escoamentos bifásicos líquido-gás, líquido-líquido e líquido-sólido. Já nos processos de separação primária de fluidos e nos processos de perfuração podem ocorrer escoamentos trifásicos líquido-líquido-gás e líquido-sólido-gás, além de escoamentos quadrifásicos líquido-líquido-gás-sólidos provenientes diretamente dos reservatórios. Estes escoamentos podem se apresentar em diversas configurações interfaciais, identificadas em mapas de padrões de escoamentos multifásicos. Entre as possíveis combinações de fases nos escoamentos multifásicos, os escoamentos líquido-gás são aqueles para os quais há o maior número de modelos matemáticos e dados experimentais disponíveis na literatura.

A classificação destes padrões de escoamento pode apresentar algumas variações na literatura (Tabela 2.1). Por exemplo, Carey (2007) divide estes padrões em bolhas, tamponado, pistonado, estratificado liso, estratificado ondulado, anular ondulado e anular. Falcone *et al.* (2009) os dividem em bolhas, tamponado, pistonado, semi-pistonado, estratificado, ondulado e anular. Thomas (2004) divide os padrões em segregado estratificado, segregado ondulado, segregado anular, intermitente tamponado, intermitente em golfadas, distribuído em bolhas e distribuído em nevoeiro.

Tabela 2.1. Resumo comparativo dos padrões definidos na literatura para tubulações horizontais.

Padrão	Descrição	Presente estudo Petrobras, (2013)	Correspondência na Literatura		
			Falcone <i>et al.</i> , (2009)	Shoham, (2006)	Thomas, (2004)
<b>Bolhas dispersas</b>	A fase gasosa encontra-se na forma de bolhas discretas distribuídas na parte superior da tubulação ou, para vazões de líquido mais altas, distribuídas mais uniformemente por toda a seção transversal.	<b>Bolhas dispersas</b>	Bolhas	Bolhas dispersas	Bolhas
<b>Estratificado liso</b>	O líquido escoar na parte inferior da tubulação e o gás na parte superior, sendo a interface entre eles relativamente lisa.	<b>Estratificado</b>	Estratificado	Estratificado suave ( <i>stratified smooth</i> )	Estratificado
<b>Estratificado ondulado</b>	A interface do escoamento estratificado liso é perturbada por instabilidades de Helmholtz, tornando-se então ondulada.		Estratificado ondulado	Estratificado ondulado	Ondulado
<b>Estratificado rugoso</b>	As ondulações da interface tornam-se maiores e mais agitadas, muitas vezes aeradas, mas não tocam a superfície superior da tubulação.		Semi - pistonado	-	-
<b>Anular ondulado</b>	Ocorre para as vazões de gás mais baixas, na transição entre os padrões estratificado ondulado, pistonado e anular. A maior parte do líquido escoar na porção inferior da tubulação enquanto ondas aeradas varrem a periferia desta, chegando às vezes ao topo.		-	Anular ondulado	-
<b>Escoamento tamponado</b>	A coalescência de pequenas bolhas leva à formação de bolhas maiores com formato de tampões que escoam na porção superior da tubulação.	<b>Intermitente</b>	Pistonado		Tampão
<b>Pistonado</b>	Pistões de líquido aerados, preenchendo toda a seção transversal, são intercalados por bolhas alongadas de gás que escoam na porção superior da tubulação, acima de uma camada de líquido.		Pistonado	Pistonado	Golfada
<b>Bolhas alongadas</b>	Considerado um caso limite do escoamento pistonado no qual os pistões de líquido estão isentos de bolhas de gás.		-	Bolhas alongadas	-
<b>Anular</b>	Um núcleo de gás à alta velocidade é circundado por um filme de líquido; gotículas de líquido são carregadas em meio à massa gasosa	<b>Anular</b>	Anular	Anular	Anular

Shoham (2006) descreve os padrões em bolhas dispersas, intermitente com bolhas alongadas, intermitente pistonado, anular ondulado e anular. É importante destacar que Falcone *et al.* (2009), Shoham (2006) e Thomas (2004) tratam de aplicações específicas da indústria de petróleo enquanto Carey (2007) foca em aplicações de fluidos com mudança de fase líquido-vapor (refrigeração). Com base nestes trabalhos, os padrões identificados como mais importantes para a indústria de petróleo são aqueles descritos na Tabela 2.1, quais sejam: bolhas, intermitente, estratificado e anular (Petrobras 2013). Estes padrões são ilustrados no mapa de padrões da Figura 2.1.

Com relação aos padrões de escoamentos verticais, a diferença básica dos padrões com relação aos escoamentos horizontais é a tendência à estratificação destes últimos. A Tabela 2.2 mostra que a classificação de escoamentos bifásicos verticais ascendentes utilizada por Falcone *et al.* (2009) são bolhas, pistonado, agitado, anular delgado (*wispy annular*) e anular. Shoham (2006) classifica os padrões verticais em bolhas, bolhas dispersas, pistonado, agitado e anular. Thomas (2004) considera os padrões bolhas, golfadas, transição e nevoeiro. Rosa *et al.* (2010) classificam estes padrões em bolhas dispersas, calotas esféricas, pistonado estável, pistonado instável, semi-anular e anular. Manabe *et al.* (2001) classificaram os padrões em bolhas, bolhas dispersas, pistonado, agitado e anular.

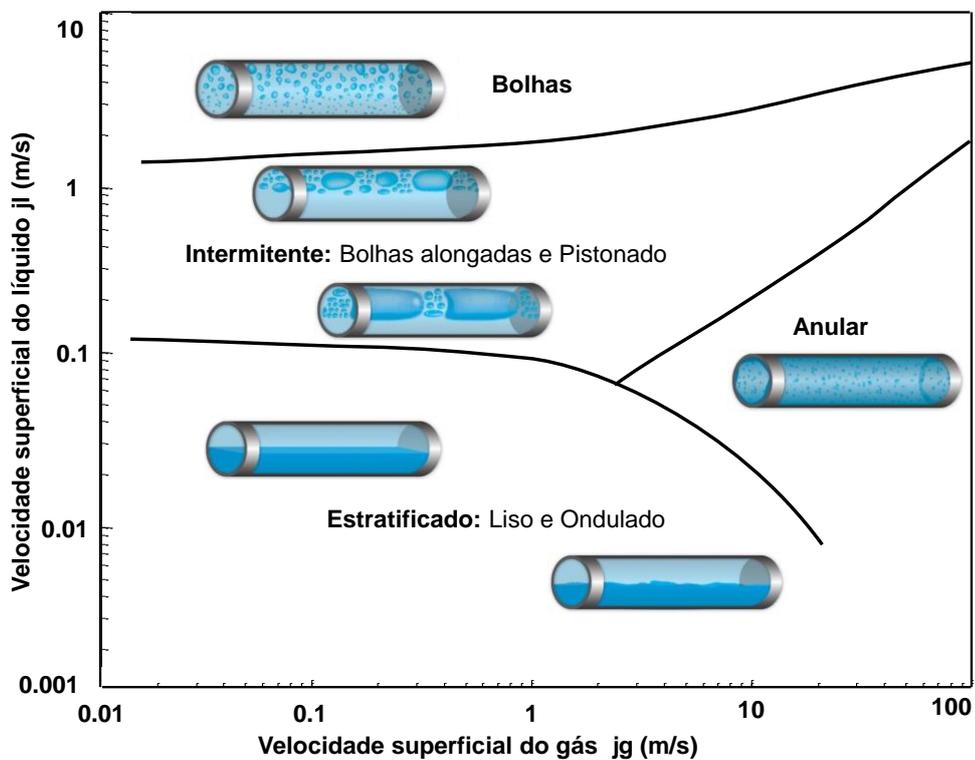


Figura 2.1. Mapa de padrões bifásico líquido-gás em tubulação horizontal.  
Fonte: Adaptado de Bratland (2010).

Tabela 2.2. Identificação e descrição dos padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos verticais.

Padrão	Descrição	Presente estudo Petrobras, (2013)	Denominação na Literatura				
			Rosa <i>et al.</i> (2010)	Shoham, (2006)	Carey, (2007)	Falcone <i>et al.</i> (2009)	Thomas, (2004)
<b>Bolhas</b>	Pequenas bolhas distribuídas de maneira aproximadamente uniforme pela seção transversal. Há deslizamento entre as bolhas de gás e a fase contínua líquida.	<b>Bolhas dispersas</b>	-	Bolhas	-	-	Bolhas
<b>Bolhas dispersas</b>	Bolhas discretas arrastadas pelo líquido. Não há deslizamento entre as fases.		Bolhas	Bolhas dispersas	Bolhas	Bolhas	-
<b>Calotas esféricas</b>	Calotas gasosas que preenchem grande parte da seção transversal.		Calotas esféricas	-	-	-	-
<b>Pistonado</b>	Pistões de líquido aerado intercalados por bolhas de Taylor que ascendem circundadas por um filme de líquido.	<b>Intermitente</b>	Pistão estável	Pistonado	Pistonado	Pistonado	Golfadas
<b>Agitado</b>	Semelhante ao pistonado, porém mais caótico e sem uma distinção clara entre as duas fases.		-	Agitado	Agitado	Agitado	-
<b>Pistonado instável</b>	Pistões de líquido altamente aerados seguidos por bolhas de gás circundadas por um filme de líquido aerado.		Pistão instável	-	-	-	-
<b>Semi-anular</b>	Uma forma degenerada do escoamento anular, com grandes ondas na interface gás-líquido.	<b>Anular</b>	Semi-anular	-	-	-	-
<b>Transição</b>	Os pistões de líquido tendem a desaparecer e uma quantidade significativa de líquido fica dispersa na fase gasosa.		-	-	-	-	Transição
<b>Anular wispy</b>	Um tipo de escoamento anular em que “fiapos” de líquido são arrastados pelo núcleo gasoso.		-	-	Wispy anular	Wispy anular	-
<b>Anular</b>	Um núcleo à alta velocidade de uma mistura de gás e gotículas de líquido, circundada por um filme de líquido co-corrente ao núcleo.		Anular	Anular	Anular	Anular	Nevoeiro

Destes trabalhos, Falcone *et al.* (2009), Shoham (2006), Thomas (2004) e Manabe *et al.* (2001) consideram os escoamentos tendo óleo como parte da fase contínua ou constituindo toda ela. Os padrões de escoamento identificados como os mais importantes para a indústria de petróleo são indicados na Tabela 2.2 (Petrobras 2013). A Figura 2.2 ilustra estes padrões no mapa de padrões verticais de Mishima e Ishii (1984).

Com relação aos escoamentos líquido-líquido, sua presença se dá principalmente nos processos petroquímicos e de produção, nos quais podem-se atingir patamares próximos a 90% de fração de água ao longo da vida de um poço (Kunert 2007). Segundo Bratland (2010), o escoamento de óleo e água não é totalmente diferente do escoamento líquido-gás, mas as diferenças de densidade, viscosidade e tensões superficiais dos líquidos promovem misturas e padrões diferentes, frequentemente colocando estes escoamentos fora dos limites dos modelos matemáticos válidos para escoamentos líquido-gás já bem estabelecidos na literatura. Por exemplo, quando dois líquidos possuem a mesma densidade, não haverá a formação do padrão de escoamento estratificado. Em escoamentos água-óleo, observa-se uma clara dependência do padrão de escoamento com relação às propriedades reológicas da fase óleo; quando a viscosidade diminui, existe uma tendência à quebra e formação de gotas menores (Figura 2.3).

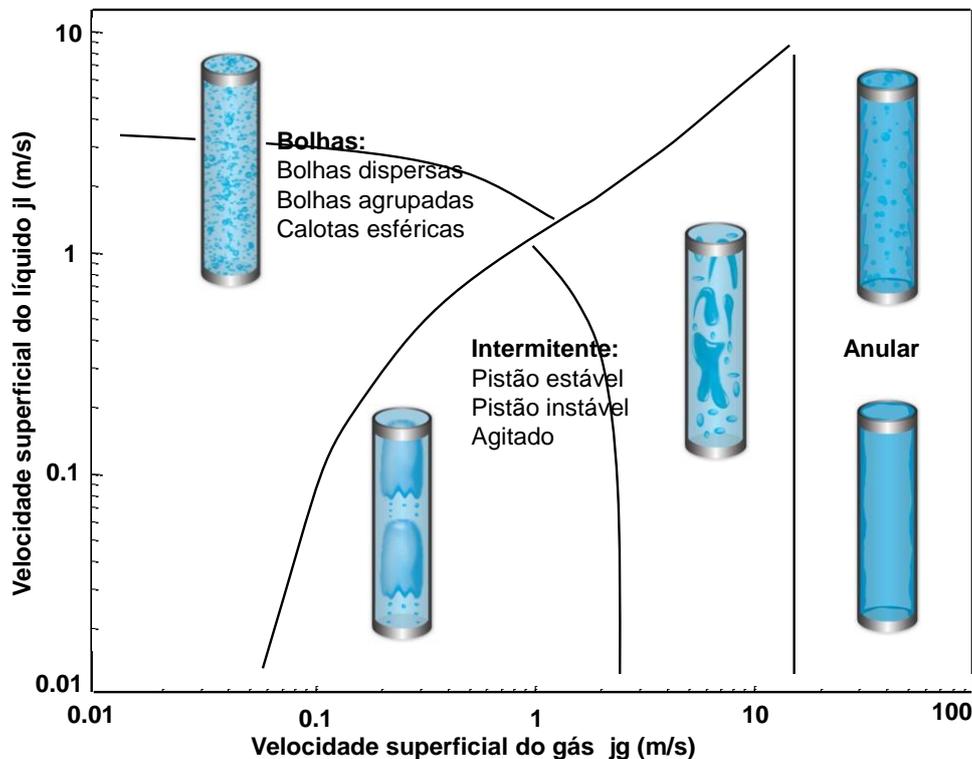


Figura 2.2. Mapa de padrões bifásicos líquido-gás em tubulação vertical.  
Fonte: Adaptado de Mishima e Ishii (1984) e de Bratland (2010).

Por outro lado, quando a viscosidade do óleo aumenta, existe uma tendência à formação de padrões intermitentes e anulares (Figura 2.4), considerando as mesmas vazões da situação anterior. O entendimento destes padrões de escoamento é importante para se determinar o “ponto de inversão de fases”, onde ocorre uma mudança abrupta na viscosidade da emulsão. Isto frequentemente afeta o desempenho de medidores multifásicos (MMFs), principalmente aqueles que operam com base em medidas de propriedades dielétricas e/ou condutivas.

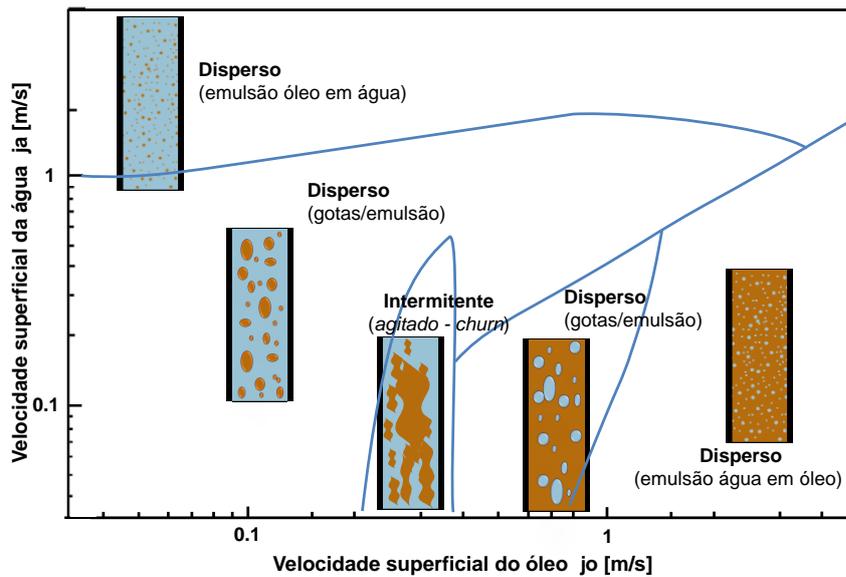


Figura 2.3. Mapa de padrão de escoamento bifásico óleo leve-água vertical.  
Fonte: Adaptado de Brauner (2004).

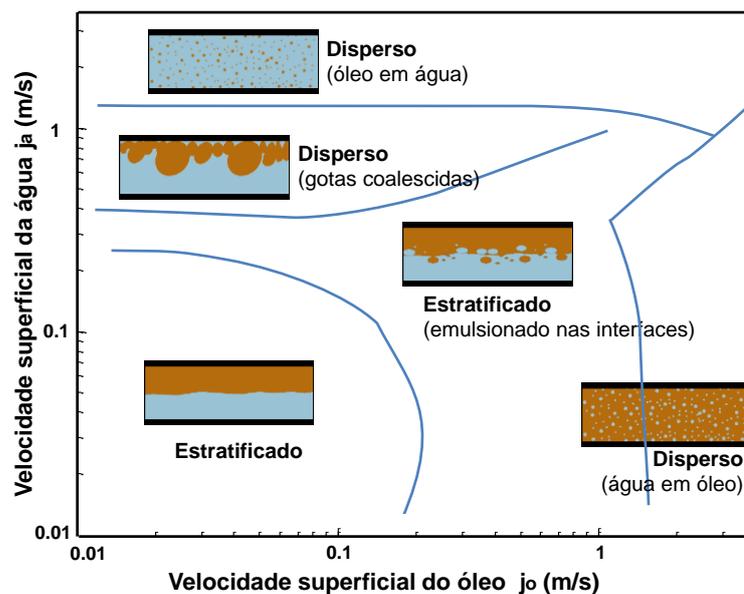


Figura 2.4. Mapa de padrão de escoamento bifásico óleo leve-água horizontal.  
Fonte: Adaptado de Brauner (2004).

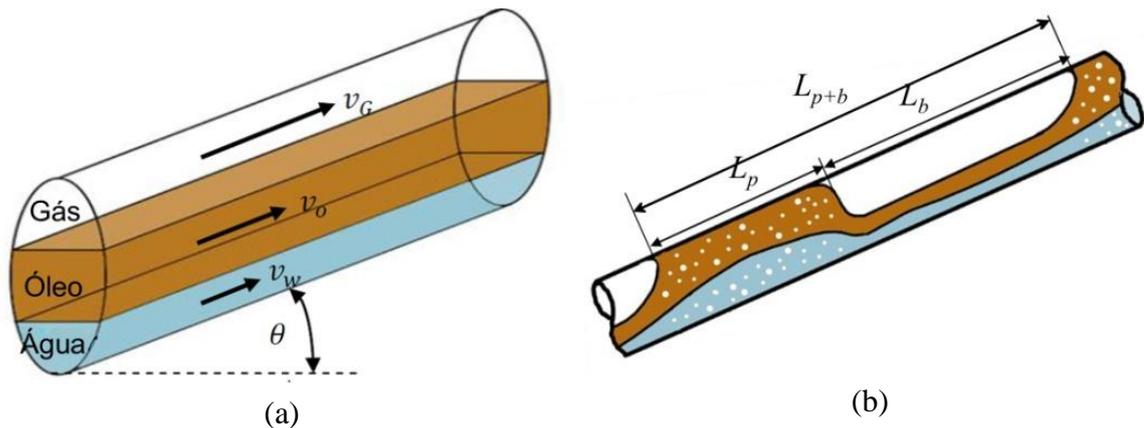


Figura 2.5. Padrões de escoamento a) estratificado água-óleo-gás e b) gás intermitente com líquidos estratificados.

Fonte: Adaptado de Bratland (2010).

Com relação aos escoamentos trifásicos líquido-líquido-gás, sua maior ocorrência se dá nos processos de separação primária e de elevação artificial. Os modelos matemáticos usados para calcular parâmetros como perda de carga, transições entre padrões e velocidades das fases, para uso em projetos de instalações, tornam-se extremamente complexos devido ao grande número de variáveis envolvidas (propriedades físico-químicas dos fluidos, diâmetro da tubulação, inclinação, vazões, pressão e temperatura). Alguns mapas de padrão de escoamento líquido-líquido-gás foram encontrados na literatura (Lee 1993; Bratland 2010). Entretanto, estes padrões tornam-se limitados e de difícil generalização devido, principalmente, à influência do ângulo de inclinação da tubulação (Figura 2.5). Por outro lado, alguns modelos matemáticos apresentam resultados satisfatórios considerando a fase líquida como uma emulsão homogênea de água e óleo, como aqueles propostos por Paladino (2005) e Bratland (2010).

De forma geral, mesmo havendo a presença de três fases e havendo a possibilidade de diversos padrões nestes escoamentos, os padrões trifásicos na indústria petrolífera se aproximam dos padrões bifásicos líquido-gás (Figura 2.6). Entre estes padrões, o padrão intermitente é o mais comum em tubulações verticais e horizontais (Marcano 1998; Corneliussen 2005; Paladino 2005; Ersoy 2011). Os padrões de escoamento também dependem da concentração das fases no escoamento, como mostra a Figura 2.7. Este mapa triangular é bastante usado pelos fabricantes de MMFs para a medição de escoamentos trifásicos líquido-líquido-gás (API 2004; Corneliussen 2005; Ersoy 2011).

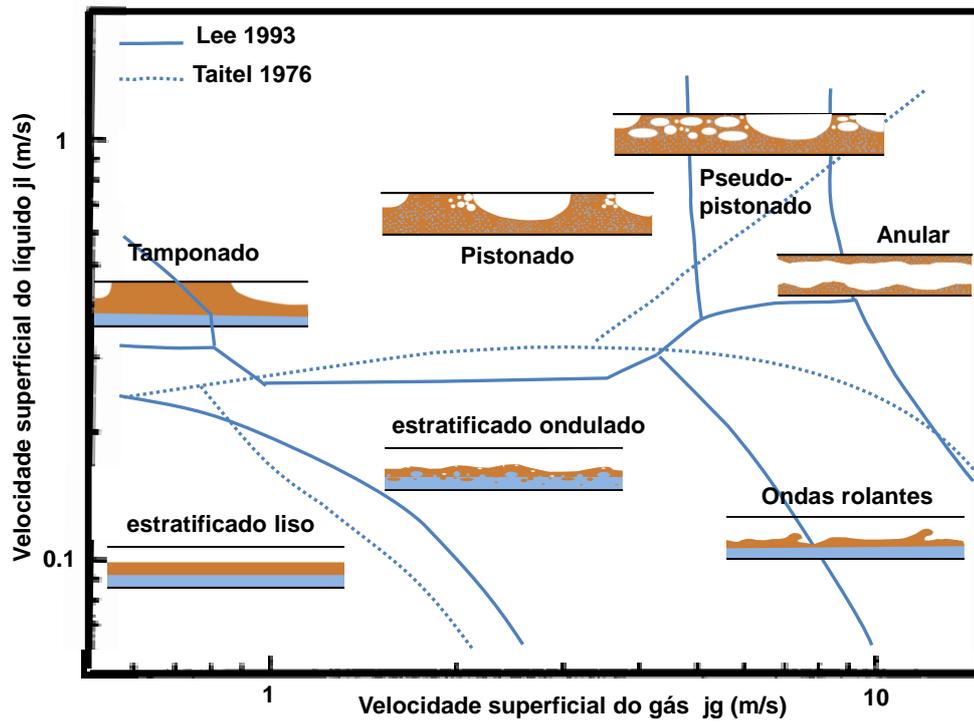


Figura 2.6. Mapa de padrão de escoamentos horizontais trifásicos líquido-líquido-gás indicando as transições previstas por Lee *et al.* (1993) e por Taitel e Dukler (1976).

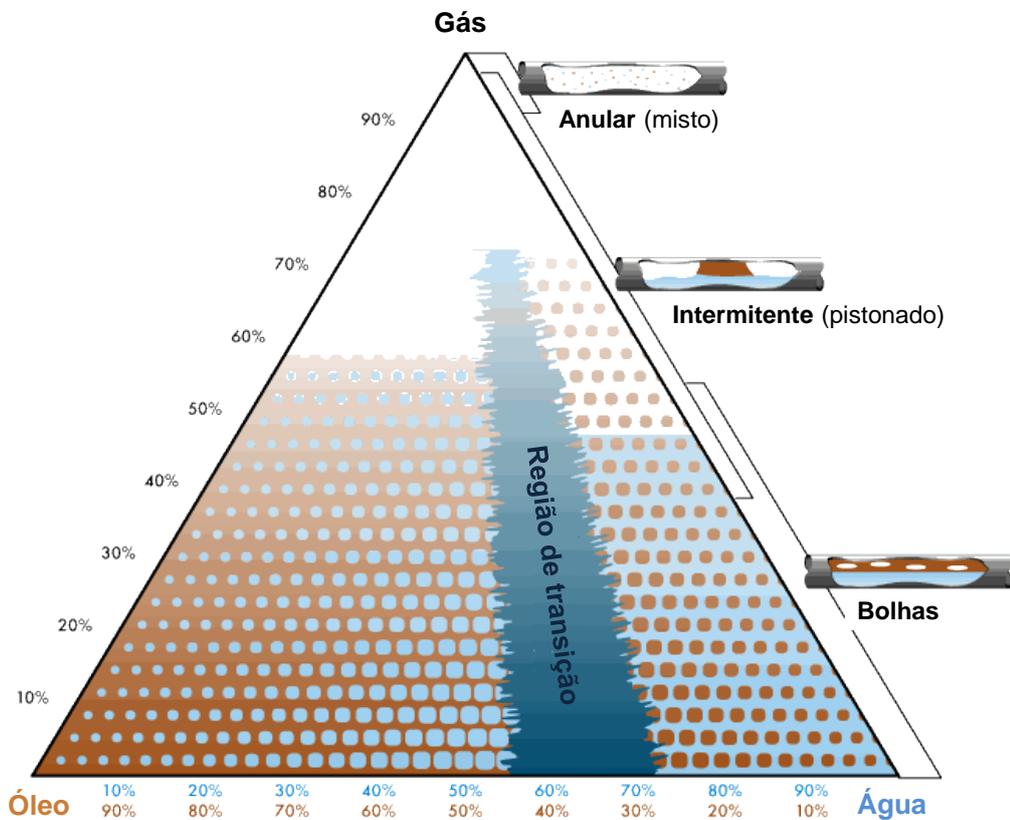


Figura 2.7. Diagrama trifásico óleo-água-gás em tubulação horizontal. Fonte: ICEweb (2012).

Com relação aos escoamentos trifásicos líquido-sólido-gás e quadrifásicos líquido-líquido-sólidos-gás, na literatura existem modelos matemáticos que estimam a velocidade mínima de deposição de sólidos e a perda de carga em tubulações, como por exemplo (Danielson 2007; Bello 2008; Bratland 2010); outras técnicas medem diretamente a concentração das fases gás e sólidos nestes escoamentos como (Vatanakul 2004; Zheng 2004; Paiva 2011). Nas condições experimentais desta tese, foi verificado que os padrões de escoamento trifásicos e quadrifásicos se mantiveram próximos dos padrões bifásicos óleo-gás, não sendo observada a separação nem de água nem dos sólidos nos escoamentos.

## **2.2. APLICAÇÕES DE MEDIDORES MULTIFÁSICOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA**

A seguir são discutidas as principais aplicações dos medidores multifásicos na indústria de petróleo.

### *a) Teste de poços (well testing)*

Muitas operadoras buscam reduzir o tamanho dos equipamentos de perfuração e produção devido ao espaço limitado nas plataformas, especialmente no desenvolvimento de campos pequenos (Berge 2011). Em especial nos testes de poços, os separadores de teste são pesados, ocupam grande espaço e requerem altos investimentos iniciais (Figura 1.1) quando comparados aos MMFs. A Figura 2.8a mostra um sistema convencional para testes de poços que usa a separação parcial do escoamento. O uso de MMFs nas cabeças dos poços possibilita a eliminação dos separadores de teste, válvulas e instrumentação (Figura 2.8b) além de reduzir os intervalos entre medições. A incerteza na medição dos separadores de teste está na faixa de 5% a 10% devido aos longos intervalos entre os testes e às flutuações nas vazões dos escoamentos. Este mesmo intervalo de incerteza hoje é facilmente alcançado pelos MMFs (Falcone *et al.*, 2002).

### *b) Monitoramento de poços individuais*

Devido ao alto custo de projeto e desenvolvimento de plataformas de produção marítima, é comum existirem vários poços ligados a uma única plataforma. A obtenção de informações sobre a vazão dos poços individuais requer que a produção de outros poços seja interrompida e que os fluidos de um dado poço sejam direcionados para o separador de testes. Podem ainda ocorrer fenômenos difíceis de serem monitorados por meio de separadores de testes como, por exemplo, o assim chamado *fingering*. Trata-se de cones de água ou gás, onde um único poço pode interferir em todo o processo de separação. Estes problemas se tornam comuns durante a produção e trazem perdas significativas (Hatzignatiou e Mohamed 1994).

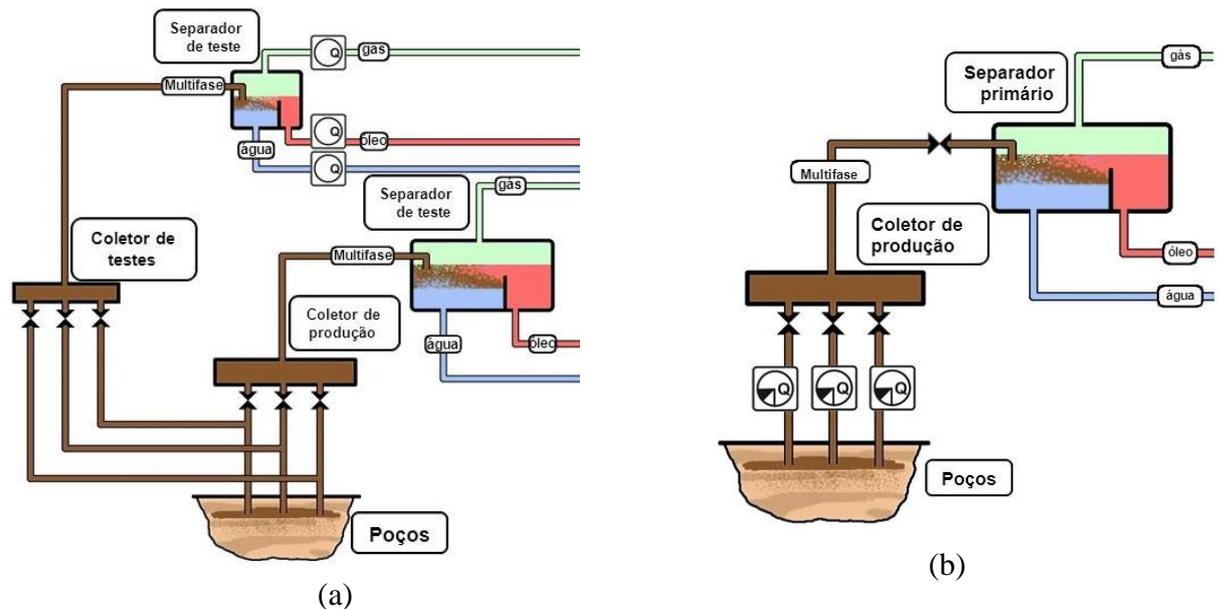


Figura 2.8. Sistema de produção com (a) separador primário e (b) com MMFs.

Fonte: Adaptado de Corneliussen *et al.* (2005).

#### c) Otimização da Produção

Em poços com sistemas de elevação artificial, os MMFs podem fornecer informações em tempo real, permitindo a otimização de sistemas como bombas centrífugas submersíveis, sistemas de elevação gasosa (*gas lift*) e sistemas de injeção de gás, vapor d'água, CO<sub>2</sub> e outros. Os MMFs podem ainda detectar o avanço precoce de água (*water breakthrough*), que são informações de grande valia para o engenheiro de produção e de reservatório operarem com eficiência o processo produtivo (Arora 2009). Os MMFs também podem informar o operador sobre situações adversas como golfadas severas em tubulações de subida para a plataforma (*risers*) que podem danificar ou “afogar” os separadores e causar a parada do fluxo do poço. Em casos extremos, este problema pode reduzir o fator de recuperação do reservatório.

#### d) Medição Fiscal

Devido às incertezas associadas às medições, geralmente não é possível substituir os medidores monofásicos, de alta precisão e já estabelecidos na indústria, por MMFs. Os MMFs não conseguem atingir a precisão requerida para cumprir a exigência de normas e de contratos de compra e venda. Devido aos altos montantes associados à produção, existem casos onde precisão de 0,1% chega a ser requerida (Silva Filho 2010).

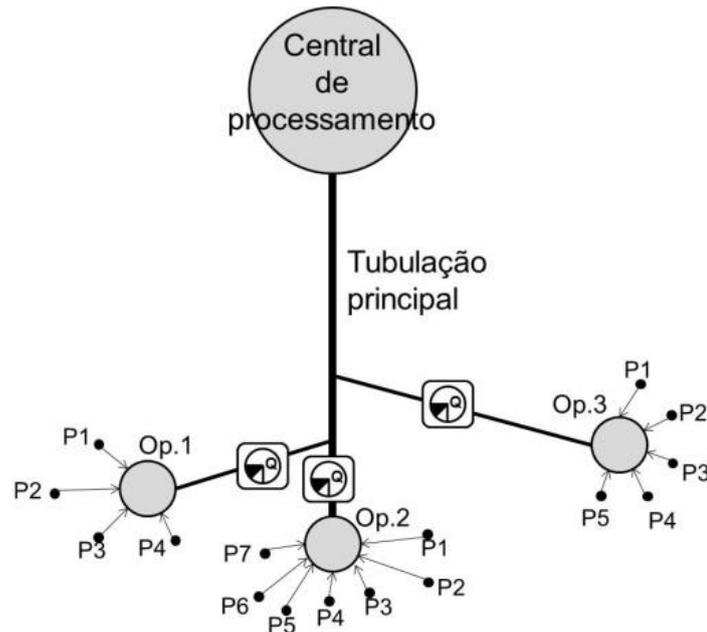


Figura 2.9. Aplicação de MMFs no desenvolvimento de campos de pequeno porte.  
Fonte: Adaptado de Corneliussen *et al.* (2005).

No entanto, os MMFs estão sendo utilizados no desenvolvimento de campos de pequeno porte, onde a produção seria economicamente inviável caso fosse necessária a construção de estações de processamento (Corneliussen 2005; Scheers 2008); a Figura 2.9 mostra esquematicamente esta aplicação. Neste caso, deve haver um acordo prévio entre os órgãos fiscalizadores e as empresas produtoras sobre a precisão dos equipamentos utilizados e os procedimentos de medição.

A Tabela 2.3 resume os quesitos necessários para a medição multifásica na indústria de petróleo e as principais vantagens dos MMFs em relação aos separadores de teste em diversas aplicações. Em suma, a escolha de um MMF para uma destas aplicações deve considerar principalmente as vazões das fases envolvidas, os tipos de fluidos e o ambiente a que o MMF ficará exposto.

Dependendo da maneira como os MMFs são instalados e como os escoamentos multifásicos são condicionados para a medição, são definidas “rotas” de medição (Falcone *et al.*, 2009), isto é, configurações específicas de medição multifásica. A Figura 2.10 mostra a configuração referente à rota #1, onde três instrumentos são necessários à jusante do separador. Os dois primeiros medidores podem fornecer qualquer uma das combinações  $(\rho + v)$ ,  $(\rho v + \rho)$ ,  $(\rho v + v)$ ,  $(\rho v^2 + \rho)$ ,  $(\rho v^2 + v)$  ou  $(\rho v^2 + \rho v)$ , onde  $\rho$  e  $v$  são a densidade e a velocidade média do fluido e, assim, fornecer a vazão volumétrica total; o terceiro medidor é necessário para se obter uma das frações volumétricas.

Tabela 2.3. Requisitos e vantagens dos MMFs em diversas aplicações na indústria de petróleo e gás.

Requisitos	Vantagens sobre os separadores
<b>Teste de poço (<i>well testing</i>)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incertezas entre <math>\pm 5</math> e <math>\pm 10\%</math>;</li> <li>• Pressões e temperaturas até 10 kpsi e 120 °C;</li> <li>• Diversos regimes de escoamento (bolhas discretas, anular, agitante, e outros);</li> <li>• Ampla escala de FVG (0 – 95%);</li> <li>• FVA completa (0 – 100%);</li> <li>• Salinidade entre 0 e 5%;</li> <li>• FVS entre 0 e 3% com diâm. sólidos &lt; 1 mm;</li> <li>• Vazões entre 70 e 10.000 bpd;</li> <li>• °API entre 19 e 35;</li> <li>• “Diâmetro de tubulação entre 2 e 12”;</li> <li>• Compacto e de fácil instalação (<i>skid</i>);</li> <li>• Resistência ao CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminação de separadores de teste, linhas de teste, válvulas, flanges, instrumentação e outros;</li> <li>• Redução no custo de projeto e de desenvolvimento das estações de produção;</li> <li>• Podem tornar o desenvolvimento de campos de pequeno porte (marginais e satélites) economicamente viáveis;</li> <li>• Redução do intervalo de tempo entre as medições (tempo real);</li> <li>• Incertezas totais menores do que os separadores de teste.</li> </ul>
<b>Monitoramento de poços individuais</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resposta rápida;</li> <li>• Pouca manutenção;</li> <li>• Baixo consumo de energia;</li> <li>• Outros requisitos (os mesmos para teste de poços).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhor tempo de resposta;</li> <li>• Informações sobre as vazões instantâneas de poços individuais;</li> <li>• Redução dos intervalos de teste, reduzindo assim, as paradas de produção;</li> <li>• Não requer fechamento de todos poços para testes.</li> </ul>
<b>Otimização da produção</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolerante aos depósitos de parafina;</li> <li>• Temperaturas elevadas (120 °C);</li> <li>• Resposta rápida;</li> <li>• Outros requisitos (os mesmos para teste de poços).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operação remota;</li> <li>• Monitoramento em tempo real dos métodos de elevação artificial (BCS e <i>gas lift</i>) e garantia de escoamento (produção de areia, deposição de parafina e golfada severa).</li> </ul>
<b>Medição fiscal</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguir os requisitos e padrões estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores;</li> <li>• Incertezas de <math>\pm 0,3\%</math> e <math>\pm 1,5\%</math> para óleo e gás, respectivamente (podendo variar);</li> <li>• Calibração em intervalos de 60 dias;</li> <li>• A referência para os resultados devem ser de 101,325 kPa e 20 °C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode viabilizar o desenvolvimento de campos de pequeno porte (marginais e satélites);</li> <li>• Monitoramento contínuo;</li> <li>• Operação remota com envio de dados diretamente aos órgãos fiscalizadores.</li> </ul>

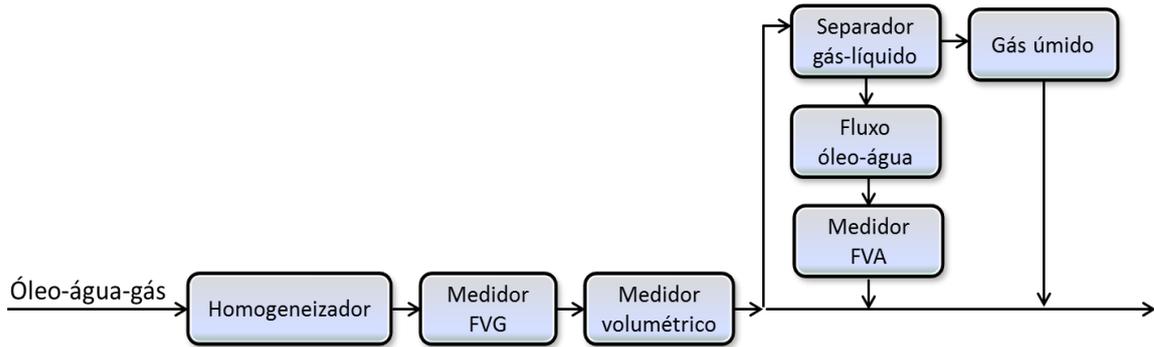


Figura 2.10. Esquema representativo da rota #1.

Com relação à rota #2, representada pela Figura 2.11, são necessários três instrumentos, sendo dois em série à jusante do homogeneizador e um na linha de amostragem. O medidor na linha de amostragem determina a razão água-líquido (RAL) ao passo que os outros medidores fornecem pelo menos duas das medidas descritas na rota #1 (velocidade, densidade, fluxo ou momento).



Figura 2.11. Esquema representativo da rota #2.

A rota #3 corresponde à configuração mais complexa e é mostrada na Figura 2.12. Neste caso, para medir a vazão das fases são necessárias cinco medidas: uma de velocidade para cada fase e uma medida da concentração de uma das fases; uma quinta medida fornece a vazão mássica total.

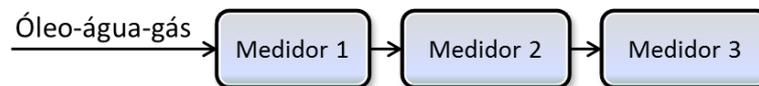


Figura 2.12. Esquema representativo da rota #3.

Por fim, quando o fluxo multifásico é dividido nas fases individuais e estas medidas separadamente – rota #4 (Figura 2.13) –, os medidores multifásicos não são mais necessários.

A Figura 2.14 mostra uma vista esquemática de uma planta de processamento primário de petróleo, onde existem diversos pontos passíveis de medição multifásica. Os escoamentos das cabeças de poços à esquerda são direcionados para um conjunto de válvulas (*manifold*) que seguem para os separadores primários e secundários.

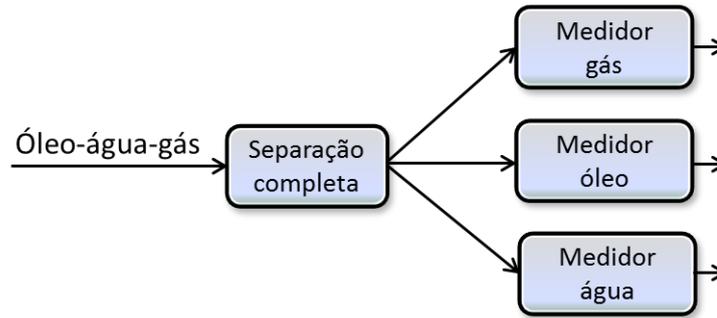


Figura 2.13. Esquema representativo da rota #4.

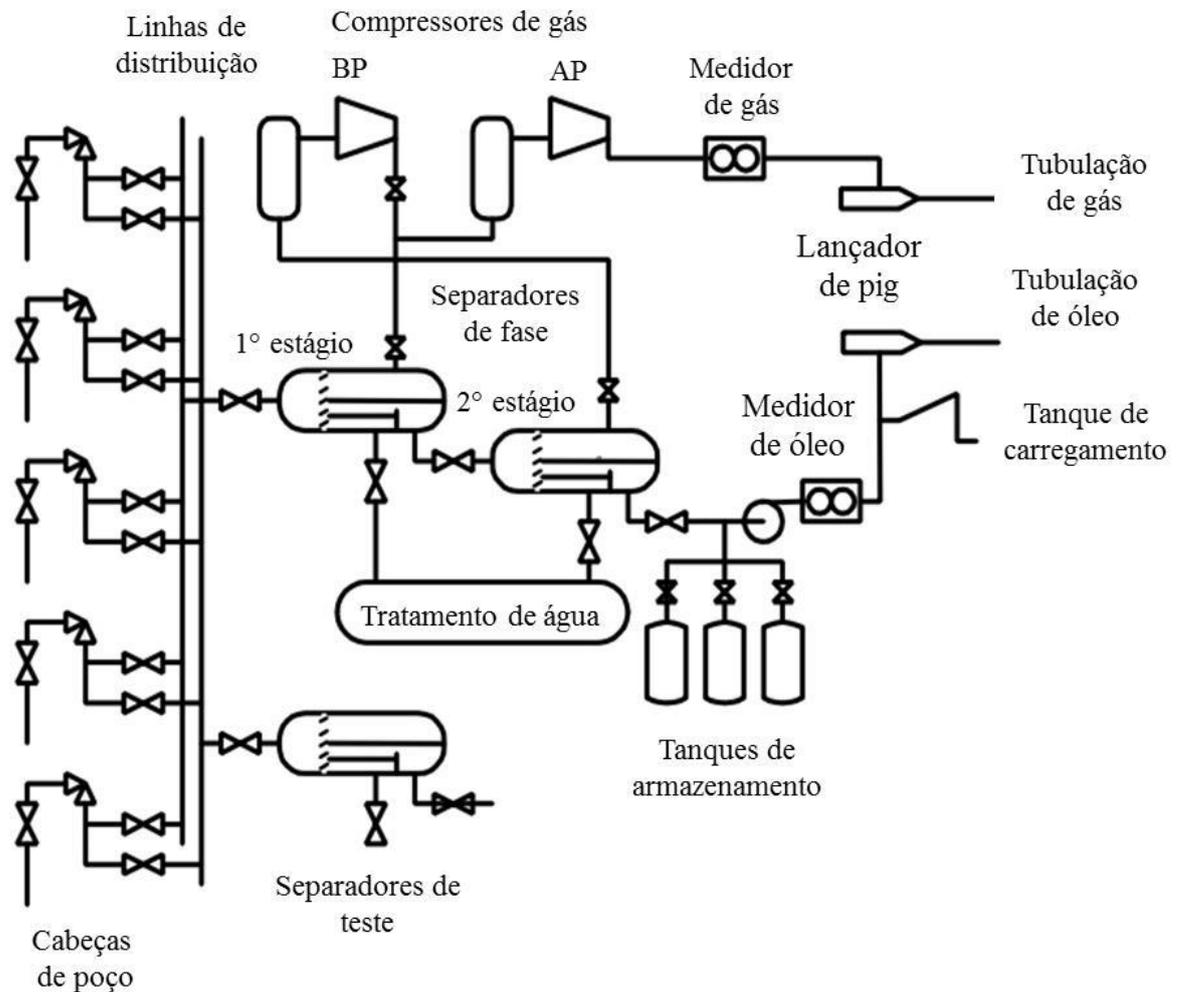


Figura 2.14. Vista esquemática simplificada de uma planta de processamento primário de petróleo.

Fonte: Adaptado de Corneliussen *et al.* (2005).

Os separadores separam o fluxo nas três fases principais, óleo, água e gás, que são medidas por medidores monofásicos de alta precisão. Um medidor multifásico poderia ser aplicado á montante da separação total das fases. Entretanto, deve-se enfatizar que um único

instrumento dificilmente seria capaz de fornecer todas as variáveis necessárias à obtenção das vazões das fases individuais. Esta dificuldade se reflete no sistema de equações algébricas referentes à rota #1, representado pelas Equações (2.1) a (2.5). As variáveis deste sistema de equações são relacionadas na Tabela 2.4.

O parâmetro FVA poderia ser obtido por medidores do tipo resistivo, condutivo, microondas ou radiativo. As densidades de cada fase podem ser obtidas em laboratório ao passo que a vazão total (Q) poderia ser obtida por meio de um medidor de deslocamento positivo. Com relação ao parâmetro FVG, destaca-se que o a técnica ultrassônica possui grande potencial para a medição deste parâmetro.

$$FVG + FVO + FVA = 1 \quad (2.1)$$

$$\dot{m}_g = FVG \cdot Q \cdot \rho_g \quad (2.2)$$

$$\dot{m}_o = FVO \cdot Q \cdot \rho_o \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_a = FVA \cdot Q \cdot \rho_a \quad (2.4)$$

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_g + \dot{m}_o + \dot{m}_a \quad (2.5)$$

Tabela 2.4. Parâmetros medidos e não medidos por instrumentos da rota #1.

<b>Conhecidos</b>	<b>Desconhecidos</b>
<i>FVG (ultrassom)</i>	<i>FVO</i>
<i>FVA</i>	<i>m<sub>g</sub></i>
<i>ρ<sub>g</sub></i>	<i>m<sub>o</sub></i>
<i>ρ<sub>o</sub></i>	<i>m<sub>a</sub></i>
<i>ρ<sub>a</sub></i>	<i>m<sub>total</sub></i>
<i>Q</i>	

O método de medida das variáveis da Tabela 2.4 são ainda dependentes de parâmetros do escoamento e da instalação como, por exemplo, diâmetro e inclinação da tubulação, concentração das fases dispersas, presença de sólidos, padrão de escoamento, variação das propriedades físicas dos fluidos ao longo da vida de um poço e outros. As variáveis que poderiam mudar elas próprias em função destes parâmetros são apenas a FVG e a FVO. Isto torna a aferição das técnicas de medição extremamente difícil ou impossível para todas as

condições operacionais da indústria (Corneliussen *et al.*, 2005). Neste contexto, as redes neurais artificiais têm apresentado boas perspectivas para aplicação em escoamentos multifásicos (Shaikh e Al-Dahhan 2003; Falcone *et al.* 2009; Rosa *et al.* 2010; Petrobras 2013).

A Figura 2.15 mostra um exemplo de procedimento de medição multifásica completa empregando a técnica ultrassônica e redes neurais artificiais. Neste procedimento, são combinados resultados de grupos adimensionais referentes aos escoamentos, dados de geometrias específicas de instalações e medições de parâmetros acústicos. Estes dados são usados na entrada de uma rede neural que fornece o padrão do escoamento. Uma segunda rede neural fornece a concentração das fases individuais. Por fim, utilizando dados adicionais de outros medidores, é possível resolver o sistema de equações algébricas para obtenção das vazões das fases individuais. Neste contexto, esta tese focou na obtenção dos parâmetros acústicos em diversos tipos de escoamentos, de bifásicos a quadrifásicos, tendo óleo como fase contínua.

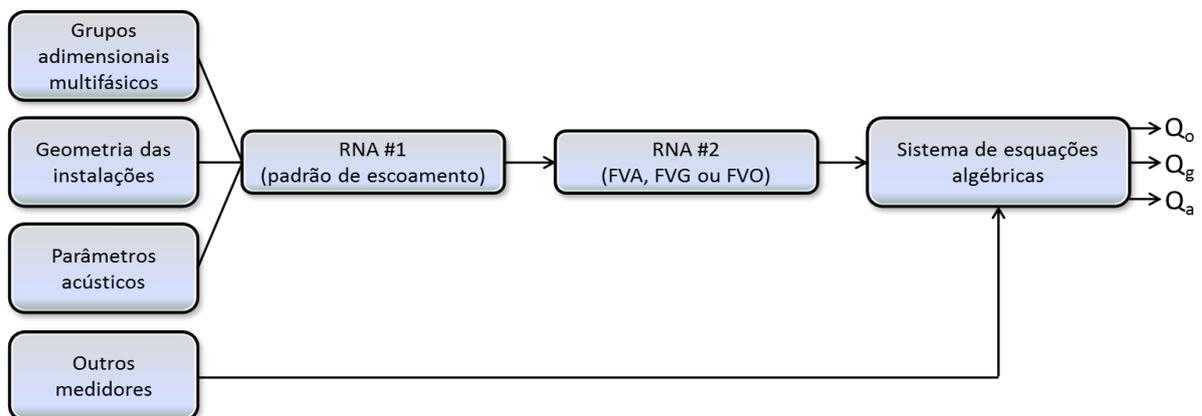


Figura 2.15. Proposição de um procedimento completo de medição multifásica com base na técnica ultrassônica e em redes neurais artificiais.

Fonte: Adaptado de Petrobras (2013)

### 2.3. DESCRIÇÃO DE TÉCNICAS E PRINCÍPIOS FÍSICOS DE MEDIDORES MULTIFÁSICOS

No que tange às técnicas e aos princípios físicos adotados por MMFs, segundo Jones Jr. e Delhaye (1976) *apud* Faccini (2008), o sucesso de uma determinada técnica depende de sua capacidade para lidar com problemas de deformação de interfaces multifásicas, flutuações temporais das propriedades físicas e complexidades geométricas dos sistemas e processos envolvidos.

Tabela 2.5. Princípios operacionais e técnicas de medição multifásica.

<b>Técnica</b>	<b>Observações</b>
<b>Medição da densidade média do fluido</b>	
Vibração do tubo	Técnicas ainda não muito estabelecidas; dificuldades de aplicação em escoamentos bifásicos.
Pesagem do tubo	
<b>Medição da fração das fases dispersas</b>	
Infravermelha	Usada principalmente na medição da concentração de água; pouca sensibilidade às mudanças de salinidade, densidade, temperatura e pressão; apresenta problemas em altos valores de FVG (> 20%).
Impedância elétrica	Deve-se saber a configuração das fases de antemão; apresenta problemas de inversão de fase em escoamentos óleo-água; problemas com mudança de salinidade.
Densitometria gama de único sensor	Sensível ao regime do escoamento; indicado para medição de gás em líquido (óleo + água); possui restrições de segurança.
Densitometria gama de múltiplos sensores	Bastante estabelecido na medição da FVG e padrões de escoamento; erros devido à distribuição das fases; conhecida como a mais precisa das técnicas adotadas pelos MMFs comerciais. Indicada para medição de gás em líquido (óleo + água); possui restrições de segurança.
Micro-ondas	Usada para medir concentração de água; apresenta pouca sensibilidade ao gás.
Espalhamento gama	Muitas medidas para obter a FVG; improvável encontrar aplicações fora do laboratório.
Absorção de nêutrons	Nenhuma das técnicas apresenta vantagens significativas sobre a medição com radiação gama.
Espalhamento de nêutrons	
<b>Medição da velocidade das fases</b>	
Deslocamento positivo	Consegue lidar com os problemas de escorregamento entre as fases líquidas e gasosas; não é recomendada em escoamentos com suspensões.
Coriolis	Excelente precisão em escoamentos monofásicos e bem estabelecido na indústria de óleo e gás; FVG máxima permitida de 5%.
Turbina	Requer medições independentes da FVG, condensado ou coeficiente de escorregamento; partículas sólidas podem danificar as palhetas da turbina.
Vórtices	Usado normalmente na medição de gás úmido, sendo necessária a correção com o coeficiente de Lockhart-Martinelli.
Acústica (tempo de trânsito)	Ainda precisa ser cuidadosamente estabelecida na medição de escoamentos multifásicos; é sensível à variação de pressão, temperatura e densidade das fases.
Correlação cruzada com sinais acústicos	A calibração do medidor no local da aplicação é essencial para garantir a precisão da medida da velocidade.
Ativação de nêutrons pulsada	Aplicável em escoamentos multifásicos desde que as frações das fases sejam conhecidas de antemão; as concentrações de oxigênio na água ou impurezas no óleo podem fornecer a velocidade do escoamento.
Eletromagnética	Possui algumas vantagens quando aplicada em escoamentos bifásicos do tipo água-gás; não pode ser usada em escoamento monofásico óleo ou de gás; apresenta problemas com a variação da salinidade.
Gama/nêutron, capacitância/condutância	Obtenção da velocidade do escoamento através da correlação cruzada destes sinais.
<b>Medição da quantidade de movimento do fluido</b>	
Venturi	Em escoamentos trifásicos, este requer a concentração de óleo em água previamente.
Diferencial de pressão	Dependente do padrão de escoamento; aplicações práticas requerem uma extensiva calibração no local.

Um resumo das principais técnicas usadas por MMFs é dado na Tabela 2.5. Observa-se que a maioria das técnicas precisa ainda ser aprimorada antes de ser efetivamente aplicada em escoamentos multifásicos. Quanto às usadas por MMFs comerciais, elas estão frequentemente associadas a limitações técnicas e de segurança, como por exemplo, restrições envolvendo sensores radiativos, acúmulo de parafina e mudanças nas propriedades físico-químicas dos fluidos (salinidade, viscosidade, densidade, etc.)

Falcone e Harrison (2011) observaram que as técnicas mais comuns usadas por MMFs são baseadas em densitometria de radiação gama de dois sensores, impedância elétrica, micro-ondas, pressão diferencial e correlação cruzada. As técnicas de *impedância elétrica* requerem que a configuração ou distribuição das fases sejam conhecidas previamente. Além disso, quando há a inversão de fase contínua óleo-água, os métodos de capacitância devem ser substituídos pelos de condutância. A técnica de *densitometria de radiação gama com dois sensores (receptores)* usa uma ou mais fontes radiativas que medem a concentração das fases dispersas. A técnica de *correlação cruzada* é então aplicada usando os sinais dos dois sensores e a velocidade de cada fase é obtida, de onde se obtém as vazões das fases. A técnica de *densitometria de radiação gama com um único sensor (receptor)* é bem estabelecida para medir a concentração de gás, porém, está sujeita a erros associados à distribuição das fases no escoamento, principalmente no padrão anular (Scheers 2008). Esta técnica ainda apresenta problemas envolvendo restrições de segurança para importação, instalação, transporte e armazenamento do material radiativo e necessidade de operação por pessoal qualificado (Arora 2009). Todos estes fatores contribuem para o aumento do custo do medidor.

As técnicas de *impedância elétrica e micro-ondas* apresentam alguns problemas de medição devido ao regime de escoamento. Inclusive em escoamentos bifásicos, onde a medição é mais simples, ainda pode haver variações na medição da FVG. A aplicação da técnica de *pressão diferencial* em escoamentos heterogêneos requer aferição prévia. As flutuações de pressão em um determinado padrão de escoamento podem ser usadas para medir a quantidade de movimento dos fluidos e, assim, a velocidade de cada fase. Aplicações práticas desta técnica requerem aferição extensiva nos locais de aplicação. A técnica de *correlação cruzada* tem a vantagem de medir diretamente a velocidade sem a necessidade de aferição; entretanto, é preciso haver uma característica marcante na estrutura do escoamento, que na maioria dos casos é uma golfada ou pistão (Falcone *et al.*, 2002).

Com relação a outras técnicas adotadas por MMFs comerciais, a técnica magnética mostrou-se pouco usual nas aplicações da indústria de óleo e gás devido principalmente às baixas condutividades do óleo e do gás quando comparadas à condutividade da água. Quanto

aos medidores do tipo Coriolis, suas aplicações na indústria são bem estabelecidas em diversos processos em virtude do alto desempenho obtido em escoamentos monofásicos. Observou-se sua aplicação inclusive na medição fiscal, onde são requeridas precisões inferiores a 0,5%. No que tange à medição multifásica, a presença do gás afeta expressivamente seu desempenho, sendo normalmente limitada a FVG 5% (Nesse 2012); no entanto, esse limite aumenta com o aumento da viscosidade do fluido (Emerson 2004).

Quanto ao medidor do tipo infravermelho, sua principal aplicação na medição multifásica tem sido na medição da concentração de água em óleo. Uma vez que os picos referentes às ligações O-H são bem definidos, variações de fatores como a salinidade, densidade, pressão e temperatura não afetam significativamente as medições. A incerteza na medição multifásica pode chegar a apenas  $\pm 2\%$  em misturas com até 20% de FVG (Weatherford 2012).

A seguir são discutidas informações sobre as características, princípios físicos e desempenho dos principais MMFs identificados na literatura. A Tabela 2.6 mostra um resumo das técnicas e dos parâmetros fornecidos pelos MMFs trifásicos líderes de mercado.

Tabela 2.6. Resumo dos princípios físicos de funcionamento e características dos principais medidores comerciais trifásicos (óleo-gás-água) atuais.

<b>Medidor/Empresa</b>	<b>Velocidade</b>	<b>FVG</b>	<b>FVA</b>	<b>Classificação</b>
AGAR série 50 (AGAR CORP.)	Deslocamento positivo	Coriolis	Micro-ondas	Em linha
AGAR série 300 (AGAR CORP.)	Deslocamento positivo	Coriolis	Micro-ondas	Separação parcial
Flowatch HS (Pietro Fiorentini)	Venturi	Gama (único)	Condutância / Capacitância	Em linha ou separação parcial
Flowatch 31 (Pietro Fiorentini)	Venturi	Condutância / Capacitância	Condutância / Capacitância	Em linha ou separação parcial
Fluenta Zector Technology (Roxar 2600)	Venturi	Gama (único)	Capacitância	Em linha
Haimo (Haimo Tech.)	Venturi	Gama (duplo)	Gama (duplo)	Separação parcial
MPM (FMC)	Venturi	Gama (único) e ondas electromag.	Gama (único) e ondas electromag.	Em linha
PhaseWatcher VX (Framo / Schlumberger VX)	Venturi	Gama (duplo)	Gama (duplo)	Em linha
Red Eye (Weatherford)	Coriolis	Vortex	Infravermelho próximo	Separação parcial

*AGAR (Série 50 e 300)* é um medidor não-radiativo e normalmente não é recomendado para aplicações envolvendo suspensões, pois os sólidos suspensos podem danificar as partes móveis do medidor de deslocamento positivo. Para aplicações em escoamentos com FVG maior que 5 % e FVA maior do que 85%, o fabricante fornece uma adaptação, onde o medidor Coriolis é substituído por dois do tipo Venturi acoplados em série.

*Flowatch 3I e Flowatch HS (Pietro Fiorentini)* é um medidor não-radiativo (modelo 3I), onde as vazões de óleo, água e gás são obtidas por meio de medidas de propriedades elétricas e de pressão diferencial em um tubo Venturi. No modelo radiativo *HS*, as medidas de densidade e concentração das fases são obtidas pela técnica de radiação gama, que resulta em diversas restrições de segurança. Abaixo de 92% de FVG, não é necessário o uso de separadores, homogeneizadores ou linhas de desvio. As velocidades das fases líquidas (óleo e água) são obtidas em três seções do Venturi que usam a técnica de correlação cruzada. Para FVG acima de 92%, o fabricante aconselha o uso de um separador parcial.

*Fluenta Zector Technology (Roxar)* possui uma versão básica não-radiativa, ideal para aplicações em escoamentos com FVG menores que 95%; sensores de capacitância e indutância são usados para medir as propriedades elétricas da mistura e o Venturi mede a FVG. Em escoamentos com FVG acima de 95%, o fabricante recomenda um modelo mais preciso (radiativo) no qual a FVO e FVG são obtidas por meio de um sensor de radiação gama e a FVA por sensores capacitivos. No entanto, em misturas com razão água-óleo (RAO) entre 60 e 70%, as flutuações de inversão de fase causam erros expressivos na medição. Estes medidores podem operar em uma faixa de RAO entre 0 e 100% e FVG entre 0 e 100% com diâmetros de tubo entre 2" e 6".

*Haimo* recomenda o uso de um separador parcial (*flow conditioner*) antes do medidor da concentração de água, obtida por um medidor radiativo. Isto garante a operação do medidor em todos os padrões de escoamento. Basicamente, este medidor é composto por um Venturi e dois medidores radiativos gama de dois sensores emissores (*dual gamma*). As medidas de velocidade e concentrações de fases dispersas são obtidas após o separador. Com esta configuração, este medidor pode operar com FVG de até 99,8%, sendo o gás separado medido por um medidor de gás úmido do tipo Vortex. Nesta configuração, a Haimo oferece medidores de grande porte para vazões de até 500.000 bpd e diâmetros de até 24".

*MPM (FMC)* é um medidor que combina um Venturi, um medidor radiativo gama, sensores de pressão e temperatura e um sistema de ondas eletromagnéticas que operam com base na medição de propriedades dielétricas da mistura, formando todos juntos, um sistema de tomografia multimodal. De acordo com o fabricante, este medidor pode operar tanto em

escoamentos multifásicos quanto em gás úmido, isto é, com FVG entre 0 e 100%. É informado ainda pelo fabricante que este medidor pode ser aplicado em condições severas, como por exemplo, pressões de até 1.000 bar, 3.500 m de profundidade e temperatura variando entre -50 e 250 °C.

*PhaseWatcher VX* é desenvolvido pela *Framo Engineering*, uma empresa do grupo *Schlumberger*. Este medidor usa sinais de pressão e temperatura em um medidor do tipo Venturi que fornece as velocidades das fases e um medidor radiativo de dois sensores emissores (*dual gamma*) para medir as concentrações das fases óleo, água e gás. O fabricante informa que a tecnologia *VX* funciona sem a necessidade de separadores ou homogeneizadores, o que reduz significativamente o tamanho e peso do equipamento. No entanto, mudanças nos padrões de escoamento a altas FVG podem aumentar as incertezas nas medições.

*Red Eye (Weatherford)* usa um medidor óptico do tipo infravermelho próximo para obter a FVA, apresentando boa tolerância ao gás – incertezas de  $\pm 2\%$  em FVG de até 20% – e um medidor Coriolis que fornece a vazão mássica do escoamento. Recomenda-se o uso de um separador parcial para FVG maior do que 20%. Uma vez que os picos de absorção das moléculas O-H são bem definidos, o medidor não apresenta sensibilidade às mudanças de salinidade, gás dissolvido, densidade e suspensão de sólidos na mistura.

Por fim, observou-se que a principal característica indesejável na maioria destes MMFs foi a radiatividade. Neste sentido, outras técnicas de medição que pudessem apresentar o mesmo desempenho que a técnica radiativa seria mais bem aceita no mercado. A técnica ultrassônica torna-se atraente para aplicação na medição multifásica, principalmente por ser não-invasiva, não-intrusiva, robusta, de resposta rápida e de baixo custo. Nas próximas seções, são apresentados resultados que mostram o alto desempenho da técnica ultrassônica na medição da fração de gás em diversos tipos de escoamentos bifásicos, trifásicos e quadrifásicos.

## **CAPÍTULO 3**

### **3. AVALIAÇÃO DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA EM UMA MONTAGEM VERTICAL SIMPLIFICADA**

Inicialmente foi desenvolvida uma montagem experimental simplificada a fim de se realizar um estudo preliminar dos sinais ultrassônicos. A característica marcante desta montagem é que a fase contínua se mantém em repouso, facilitando em grande medida a realização de experimentos para estudo dos sinais acústicos. O principal objetivo neste ponto era a caracterização e verificação da correlação dos sinais ultrassônicos com os parâmetros hidrodinâmicos das misturas como, por exemplo, a concentração e a distribuição das fases dispersas. Esta caracterização preliminar dos sinais serviu então de base para os estudos posteriores de escoamentos multifásicos em circuitos de testes mais complexos que possibilitavam um controle mais preciso da concentração das fases e condições operacionais. Neste capítulo são apresentados os resultados de medidas ultrassônicas em misturas bifásicas óleo-ar, óleo-areia, óleo-água e misturas trifásicas óleo-ar-água e óleo-ar-areia.

#### **3.1. DESCRIÇÃO DA MONTAGEM VERTICAL SIMPLIFICADA**

A Figura 3.1 e a Figura 3.2. mostram esquemas desta montagem simplificada, construída no Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado da Universidade Federal de Itajubá (LRF-UNIFEI). O dispositivo experimental consiste de uma tubulação em acrílico (Plexiglas®) ou aço (AISI 1020) com 2,5 m de comprimento e 54 mm de diâmetro interno, montada verticalmente em um tripé. A tubulação em acrílico permite a visualização do escoamento ao passo que a tubulação em aço representa uma tentativa de se avaliar a atenuação dos sinais acústicos causada por este material. Ar é injetado na fase contínua líquida por meio de um meio poroso na extremidade inferior da tubulação e é descarregado na atmosfera pelo topo. Areia é introduzida pela extremidade superior por meio de duas válvulas globo, uma controlava vazão de sólidos e a outra interrompia o fluxo. Foi adaptado um dispositivo vibrador às válvulas a fim de garantir a continuidade do fluxo de sólidos e melhorar o controle da quantidade de sólidos injetada. A descarga dos sólidos na base da tubulação foi ajustada por meio de uma válvula globo de modo a evitar acúmulo de areia no fundo. A água como fase dispersa era proveniente de um reservatório com nível constante e injetada pelo topo da tubulação; sua vazão era controlada por uma válvula globo.

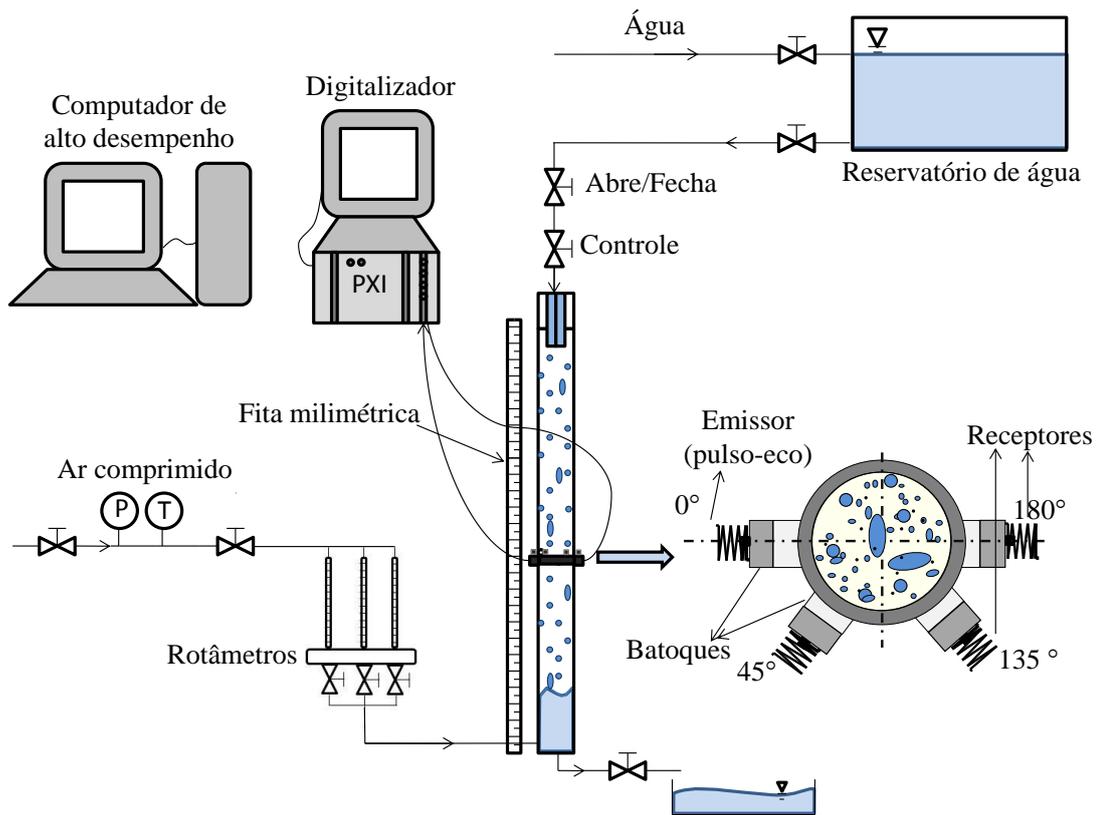


Figura 3.1. Vista esquemática do dispositivo experimental com injeção de água e ar.

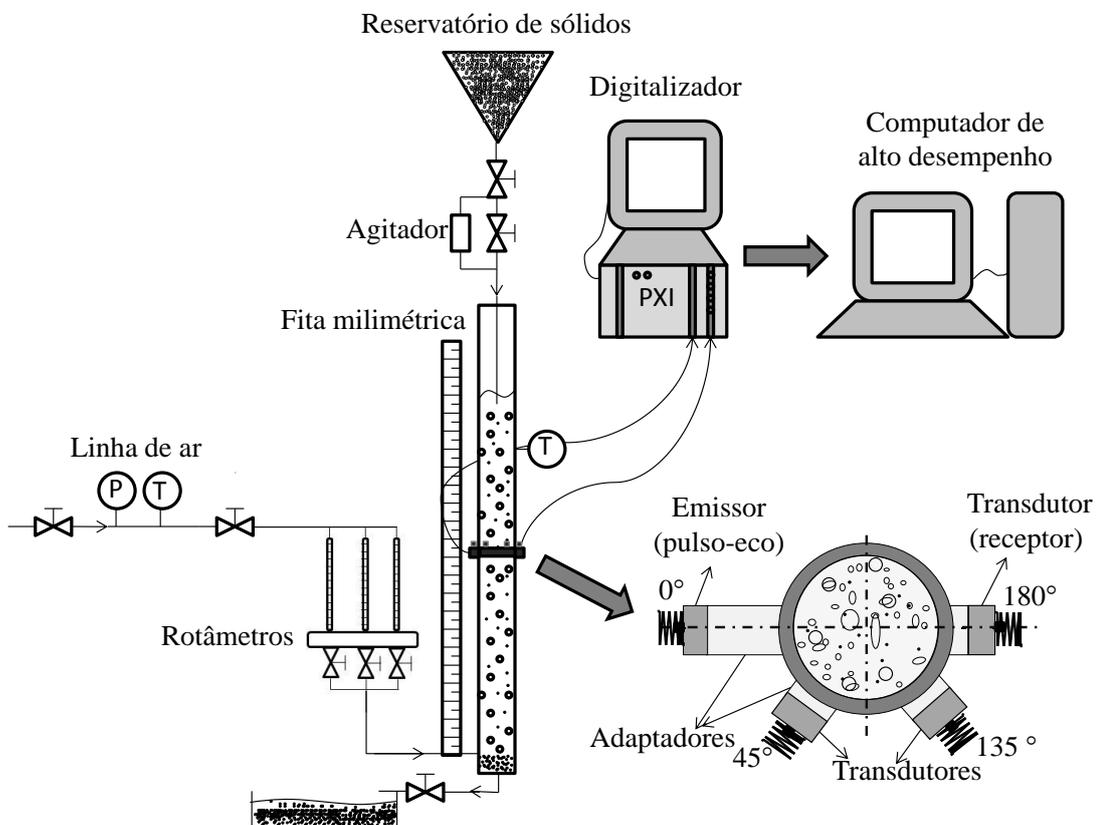


Figura 3.2. Vista esquemática do dispositivo experimental com injeção de areia e ar.

Tal como a areia, a descarga da água na base da tubulação foi ajustada por uma válvula globo de modo a manter constante sua vazão através do óleo. O ar provinha de uma linha de ar comprimido e passava por medidores de vazão do tipo rotâmetro com escala entre 0,1 e 30 lpm  $\pm$  0,1 (modelo Reotest Haake 513). A fase contínua utilizada foi óleo mineral USP derivado do petróleo, semitransparente, com  $\rho = 814,5 \text{ kg/m}^3$  e  $\mu = 33 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  (1 atm e 25 °C), medidas no Núcleo de Separadores Compactos da Universidade Federal de Itajubá (NUSEC-UNIFEI). Em relação aos sólidos, foram utilizadas microesferas de vidro com distribuição de tamanho de partículas entre 80  $\mu\text{m}$  e 600  $\mu\text{m}$ . A concentração das fases dispersas foi obtida pela medição do inchamento da coluna de líquido.

A estação ultrassônica foi posicionada aproximadamente 1 m abaixo da extremidade superior do tubo, onde a mistura era mais uniforme e menos turbulenta. Este procedimento visava aumentar a repetibilidade das medidas. A temperatura da mistura era medida por um termômetro digital com resolução de  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  localizado 0,5 m abaixo da extremidade superior do tubo.

### **3.2. INSTRUMENTAÇÃO ULTRASSÔNICA E DE FILMAGEM RÁPIDA**

Nesta seção são apresentados os principais instrumentos de aquisição e processamento dos sinais ultrassônicos e um resumo dos testes experimentais realizados nesta tese. No entanto, a descrição das diversas montagens e circuitos de escoamento será feita nos capítulos posteriores juntamente com as respectivas análises e resultados experimentais.

As estações ultrassônicas para aquisição de dados em escoamentos verticais e horizontais são mostradas na Figura 3.3. A simplicidade desta montagem foi proposital, pois o objetivo principal é possibilitar a aplicação da técnica em tempo real na indústria de petróleo e gás. A ideia que norteou essa configuração foi que deveria existir um sensor em cada quadrante da circunferência do tubo. No entanto, foi instrumentada somente metade da circunferência, pois foi considerada simetria radial do ponto de vista estatístico. Isto é, momentaneamente o escoamento pode ser assimétrico, mas durante um intervalo de tempo suficientemente longo os resultados médios em meia circunferência são representativos do escoamento como um todo. O sensor emissor de cristal duplo (0°) foi adotado como referência para posicionar os demais transdutores (45°, 135° e 180°). O sensor a 0° foi posicionado com o objetivo de adquirir os sinais refletidos para trás nas interfaces das fases dispersas ao passo que os sensores a 45° e 135° se destinavam a receber os sinais oriundos do espalhamento lateral do feixe acústico.

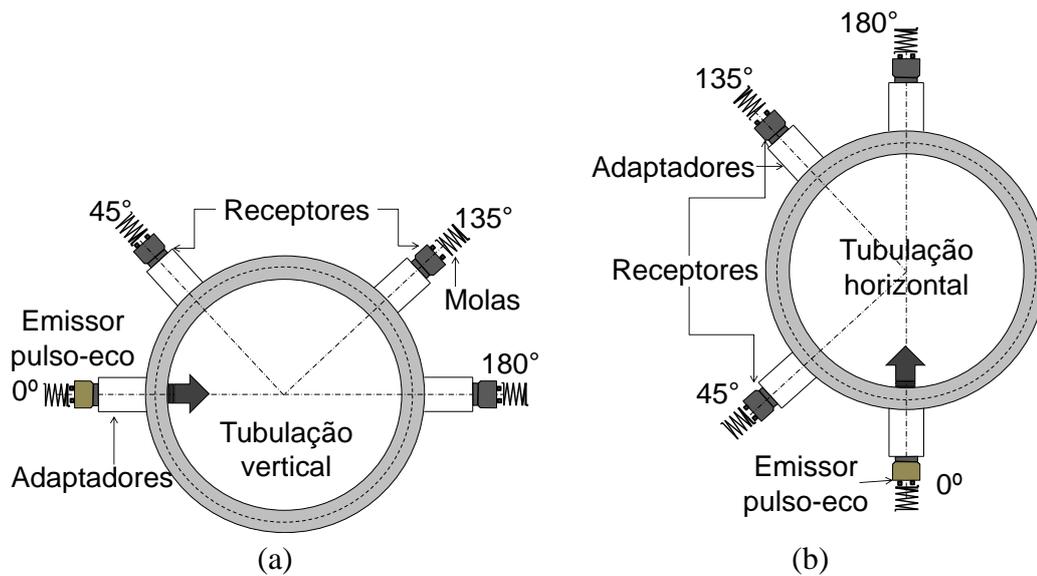


Figura 3.3. Esquema da estação ultrassônica usada em escoamentos (a) verticais e (b) horizontais.

O sensor a  $180^\circ$  foi posicionado de forma a adquirir os sinais acústicos que se propagavam pela fase contínua de um sensor ao outro diametralmente oposto (transmissão direta). Entre os transdutores e a parede da tubulação, foram colocados adaptadores do mesmo material da tubulação (acrílico ou aço) usinados de forma a melhorar o encaixe com a superfície curva desta última. Nas interfaces entre os adaptadores e a tubulação foi aplicada uma camada de vaselina para facilitar o acoplamento acústico. Para ajustar a pressão de fixação dos transdutores, na parte traseira dos transdutores foram inseridas molas helicoidais. A aquisição simultânea de todos estes sensores permite uma visão mais clara dos mecanismos físicos de dissipação acústica pelas fases dispersas presentes no escoamento. Mais ainda, com esses dados é possível fazer inferências acerca da distribuição da fase gasosa na seção transversal da tubulação. Ao longo dos experimentos, foram usados transdutores de frequência nominal 1,00 MHz e 2,25 MHz (Figura 3.4). O espectro de frequência destes transdutores pode ser visto na Figura 3.5.

Um digitalizador do fabricante *National Instruments*, modelo PXIe-8106 (Figura 3.6) com placa de oito canais de aquisição, processador Intel Core 2 Duo, foi usado para gravar os sinais ultrassônicos em memória de computador. O digitalizador é controlado por uma placa de aquisição também da *National Instruments*, modelo PXI-5105, operada por uma plataforma LabView®, versão 8.6, capaz de realizar amostragens a taxas de até 60 MHz usando os oito canais simultaneamente.



Figura 3.4. Fotografia dos transdutores ultrassônicos utilizados nos testes experimentais.

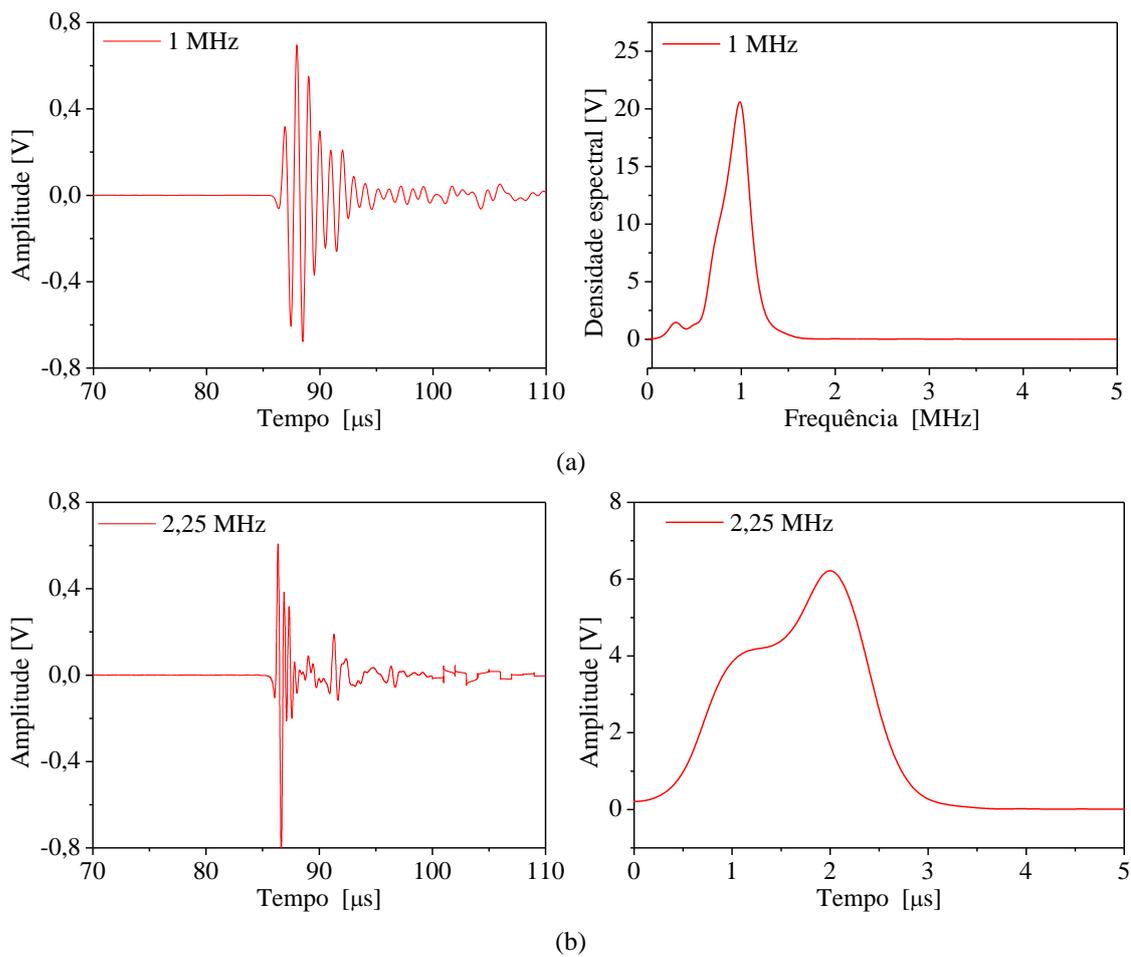


Figura 3.5. Sinais no domínio do tempo e espectros de frequências dos sensores de (a) 1 MHz e (b) 2,25 MHz.

Todavia, na maioria dos experimentos aqui realizados, adotou-se taxa de amostragem de 20 MHz, suficiente para evitar erros de *aliasing* e assim garantir uma boa representação dos sinais ultrassônicos. Para gerar os pulsos, foi utilizado um pulsador do fabricante *Panametrics Olympus*, modelo 5077PR (Figura 3.7), com voltagem de pulsação de até 400 V, taxa de pulsação máxima de 5 kHz e ganho de até 59 dB. Do ponto de vista da medição, quanto maior a taxa de pulsação e de aquisição, maior a resolução das estruturas do escoamento. Entretanto, existe um limite de voltagem a ser aplicada nos transdutores que, se excedido, pode danificar os cristais por aquecimento excessivo.

Filmagens ultrarrápidas foram feitas em sincronia com o ultrassom a fim de se poder correlacionar características particulares dos sinais ultrassônicos com aspectos instantâneos da topologia dos escoamentos. Foi utilizada uma filmadora marca IDT (Figura 3.8), modelo Motion Pro X3, com capacidade de aquisição de até 1000 quadros por segundo na resolução máxima de 1280 x 1024 pixels (1.3 Megapixels). A sincronia entre a filmadora e o PXI foi feita por meio de uma placa DAQmx Compact da *National Instruments*.



Figura 3.6. PXI modelo 1062Q utilizado para aquisição dos dados.



Figura 3.7. Gerador de pulsos *Panametrics*, modelo 5077PR, utilizado para gerar os pulsos no sensor a 0°.



Figura 3.8. Filmadora de alta velocidade IDT, modelo Motion Pro X3, utilizada para filmagens rápidas do escoamento sincronizadas com o ultrassom.

### 3.3. DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS UTILIZADOS

A fim de obter informações acerca da concentração e velocidade das fases, foram analisados os seguintes parâmetros ultrassônicos:

*Energia instantânea*: energia transportada por um pulso individualmente, dada por:

$$E_{ins} = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{A}^2 dt \quad (3.1)$$

onde  $\mathcal{A}$  é a amplitude instantânea do pulso ao longo de sua duração dada por  $t_2 - t_1$ . A Figura 3.9 mostra um gráfico da energia instantânea no sensor a  $0^\circ$  obtida em escoamento água-ar no padrão pistonado.

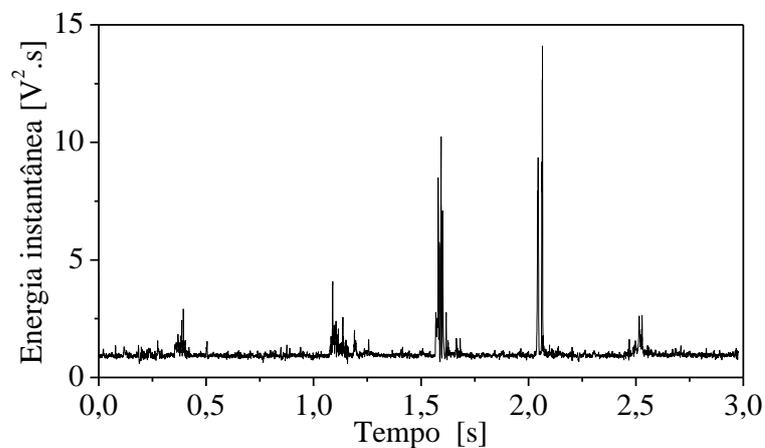


Figura 3.9. Energia instantânea no sensor a  $0^\circ$  em escoamento bifásico óleo-ar vertical no padrão bolhas dispersas.

*Energia média:* média aritmética das energias instantâneas correspondentes a N pulsos individuais, dada pela Equação (3.2). A Figura 3.10 mostra um gráfico da energia média nos quatro sensores em função da concentração de gás em uma mistura bifásica óleo-ar.

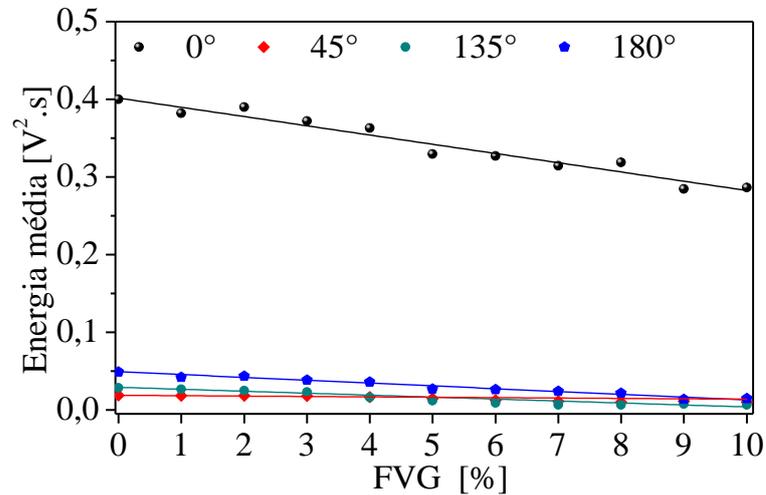


Figura 3.10. Energia média nos quatro sensores para diferentes concentrações de fases dispersas em escoamento bifásico óleo-ar.

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{ins_i}) \quad (3.2)$$

*Razão de energia média:* razão entre a energia média de N pulsos individuais e a energia média de N pulsos na condição de referência, dada pela Equação (3.3):

$$\overline{RE} = \frac{\overline{E_{2\phi}}}{\overline{E_{1\phi}}} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{A}_{\phi 2i}^2 dt}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{A}_{\phi 1i}^2 dt}{N}} \quad (3.3)$$

A condição do escoamento usada como referência depende do sensor em questão. Para os sensores a 0° e 180°, esta condição se refere ao escoamento monofásico da fase contínua. Para os sensores a 45° e 135°, esta condição equivale à máxima concentração de fase dispersa, pois nesta condição estes transdutores recebem o máximo de energia. Assim na Equação (3.3),  $\overline{E_{\phi 2}}$  é a energia média no escoamento multifásico e  $E_{\phi 1}$  é a energia média na condição usada como referência. A Figura 3.11 mostra um gráfico da razão de energia média nos quatro transdutores em função da FVG.

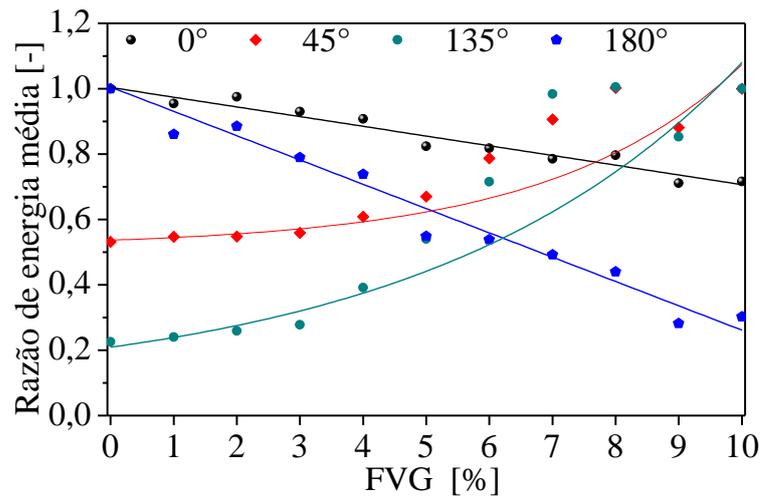


Figura 3.11. Razão de energia média para os quatro sensores em escoamento bifásico óleo-ar.

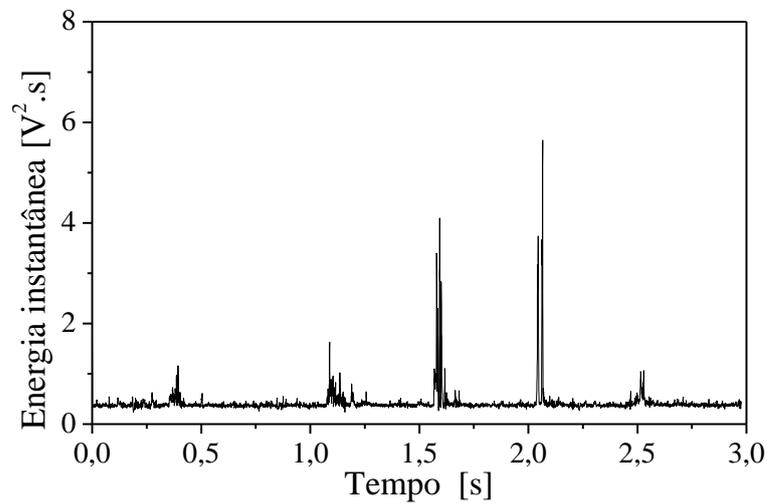


Figura 3.12. Razão de energia instantânea obtida no sensor a 0° em escoamento vertical no padrão bolhas dispersas.

*Razão de energia instantânea:* razão entre a energia instantânea e a energia média de N pulsos na condição de referência. A Figura 3.12 mostra um exemplo de razão de energia instantânea para o sensor a 0° em escoamento pistonado vertical água-ar.

$$RE_{ins} = \frac{E_{ins2\phi}}{\overline{E_{1\phi}}} \quad (3.4)$$

*Desvio padrão da razão de energia instantânea:* definido pela Equação (3.5), onde N é o número de pulsos individuais e  $\overline{E_{1\phi}}$  a energia média na condição de referência.

$$\sigma_{RE_{ins}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{E_{ins2\phi i}}{E_{1\phi}} - \overline{RE} \right)^2} \quad (3.5)$$

*Desvio padrão da razão de energia média:* definida pela Equação (3.6), onde  $M$  é o número de amostras do escoamento na mesma condição operacional.

$$\sigma_{RE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left( \frac{\overline{E_{2\phi i}}}{\overline{E_{1\phi}}} - \overline{RE} \right)^2} \quad (3.6)$$

*Tempo de trânsito:* é intervalo entre o disparo e o momento em que a frente da onda longitudinal começa a chegar ao transdutor receptor. O critério utilizado para determinar a chegada do pulso foi marcar o primeiro ponto onde o valor do sinal ultrapassa um limiar de voltagem determinado empiricamente; para o sensor a  $0^\circ$ , o valor determinado foi 0,3 V. Abaixo deste valor, o ruído se misturava com o sinal de interesse (Figura 5.16).

### 3.4. PROCEDIMENTOS DE MEDIDA

Nesta montagem, foram simulados escoamentos bifásicos e trifásicos tendo óleo como fase contínua. As frações das fases dispersas variaram conforme a descrição na Tabela 3.1. As concentrações das fases dispersas (água, ar ou sólidos) foram obtidas pelo inchamento da coluna contendo a mistura. Para as misturas bifásicas óleo-ar e óleo-água, a FVG e a FVA variaram em passos de  $1\% \pm 0,5$ , e para misturas bifásicas óleo-sólidos, a FVS variou em passos de  $0,5\% \pm 0,25$ . Para as amostras trifásicas óleo-ar-água, os testes foram realizados de forma que a FVA se mantivesse fixa em três patamares (1%, 3% e 6%) e a fração volumétrica de gás FVG variasse de 0% a 8% em cada patamar em passos de 1%. Para as amostras óleo-ar-sólidos, foram mantidas três FVS diferentes, 1%, 2% e 3%, com a FVG variando em passos de 1% em cada FVS. As faixas de concentração dos sólidos foram além das faixas usualmente encontradas na indústria de petróleo e gás ( $FVS < 1\%$ ), porém a FVG e FVA ficaram aquém das faixas usuais da indústria ( $FVG \sim 40\%$  e  $FVA \sim 20\%$  segundo comunicação pessoal com um profissional do setor). Isto ocorreu devido às limitações da montagem experimental simplificada. Com relação às imagens das misturas, foram obtidas fotografias dos escoamentos por meio de uma máquina fotográfica convencional (modelo Samsung 12 MPixels) para comparação com os sinais ultrassônicos.

Tabela 3.1. Condições e testes realizados na montagem experimental simplificada.

Tipo de Escoamento	Mistura	FVG [%]	FVA [%]	FVS [%]	Material tubulação	Transdutor
Bifásico	Óleo-ar	0 – 13	-	-	Aço 1020	1,00 MHz
		0 – 13	-	-	Aço 1020	2,25 MHz
		0 – 10	-	-	Acrílico	1,00 MHz
		0 – 10	-	-	Acrílico	2,25 MHz
		0 – 8	-	-	Acrílico + Parafina	2,25 MHz
	Óleo-água	-	0 – 12	-	Acrílico	2,25 MHz
Trifásico	Óleo-sólidos	-	-	0 – 4	Acrílico	2,25 MHz
	Óleo-ar-água	0 – 8	1 – 9	-	Acrílico	2,25 MHz
	Óleo-ar-sólidos	0 – 8	-	0 – 3	Acrílico	2,25 MHz

### 3.5. ANÁLISE DE MISTURAS BIFÁSICAS ÓLEO-AR

#### 3.5.1. Tubulação de Acrílico

Inicialmente, foram realizados experimentos com misturas bifásicas óleo-ar em tubos de acrílico (Plexiglas®) a fim de visualizar a evolução dos padrões de escoamento (Figura 3.13). Observou-se que abaixo de 3% de FVG bolhas com diâmetro de aproximadamente 10 mm se mostravam bem distribuídas pela seção transversal da tubulação (Figura 3.13a).

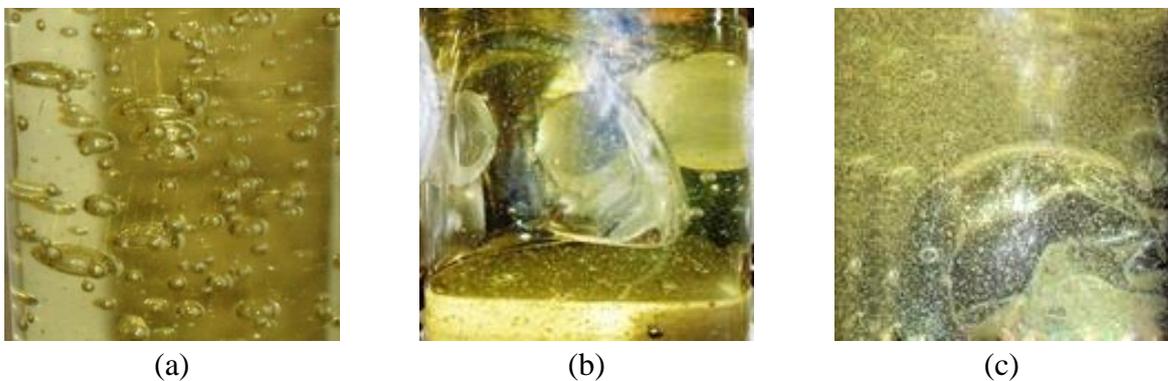


Figura 3.13. Padrões de escoamento típicos para misturas óleo-ar: (a) FVG =2%, (b) FVG =5% e (c) FVG =10%.

Ao aumentar a FVG para cerca de 4%, as bolhas coalesciam em calotas (“*cap bubbles*”) e escoavam acompanhadas de bolhas bem pequenas ( $0,1 < d < 2$  mm – visualizadas a olho nu) como mostrado na Figura 3.13*b*. Aumentando-se ainda mais a FVG, observou-se um aumento do número destas bolhas pequenas. Para FVG igual a 8%, apareceram os primeiros pistões de ar, acompanhados por uma quantidade de bolhas pequenas ( $0,1 < d < 2$  mm) bem maior do que aquela observada entre 4% e 8% (Figura 3.13*c*).

Os sinais acústicos correspondentes (Figura 3.14) mostraram que a amplitude e a forma da onda nas janelas de atividades se alteravam em função da FVG. Por exemplo, no sensor a  $180^\circ$  a amplitude do sinal diminuiu com o aumento da FVG na mistura, indicando que a energia recebida por este sensor correspondente a cada condição estava sendo reduzida.

Carvalho *et al.* (2009) também observaram uma alteração da forma da onda com o aumento da FVG em misturas água-ar embora o tempo de trânsito, conforme definido acima, tenha permanecido praticamente constante. Entretanto, no presente caso foi observada uma mudança significativa no tempo de trânsito, havendo um deslocamento para a direita (atraso) com o aumento da FVG conforme se pode ver na Figura 3.14*(b)*.

Nos próximos parágrafos, são apresentados os resultados para os sensores de 1 MHz e de 2,25 MHz. Esta análise teve por finalidade verificar se a influência da frequência do transdutor nos sinais obtidos na tubulação de aço. As correlações obtidas entre a atenuação acústica e a FVG utilizando sensores de 2,25 MHz são mostradas na Figura 3.15, observando-se uma clara correlação entre os parâmetros acústico e hidrodinâmico.

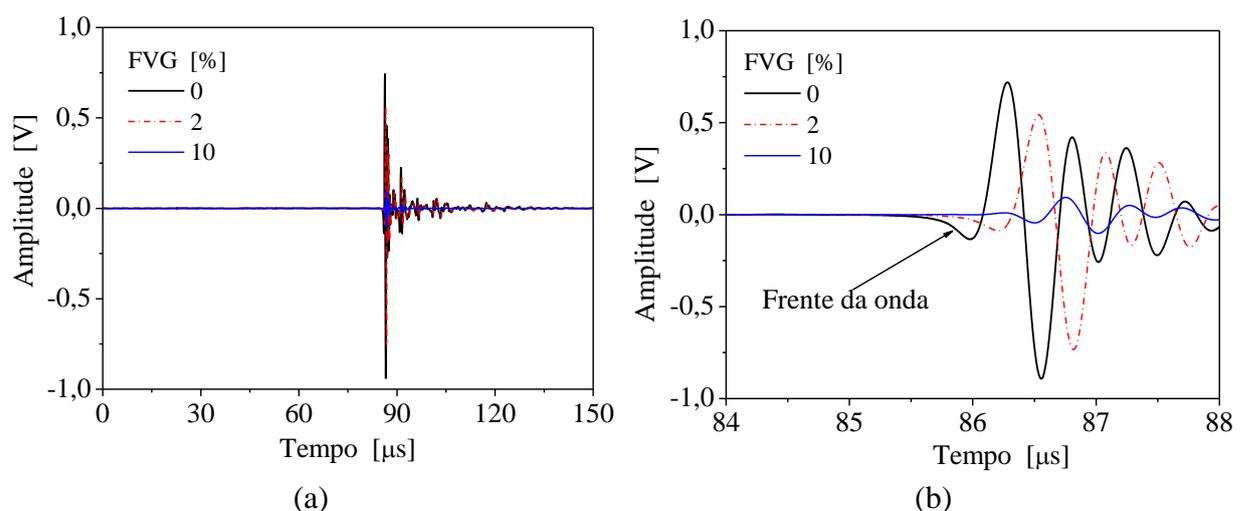


Figura 3.14. (a) Sinais típicos de frequência nominal 2,25 MHz em misturas óleo-ar e tubulação de acrílico no sensor a  $180^\circ$ ; (b) janela de atividade correspondente ao sensor a  $180^\circ$ .

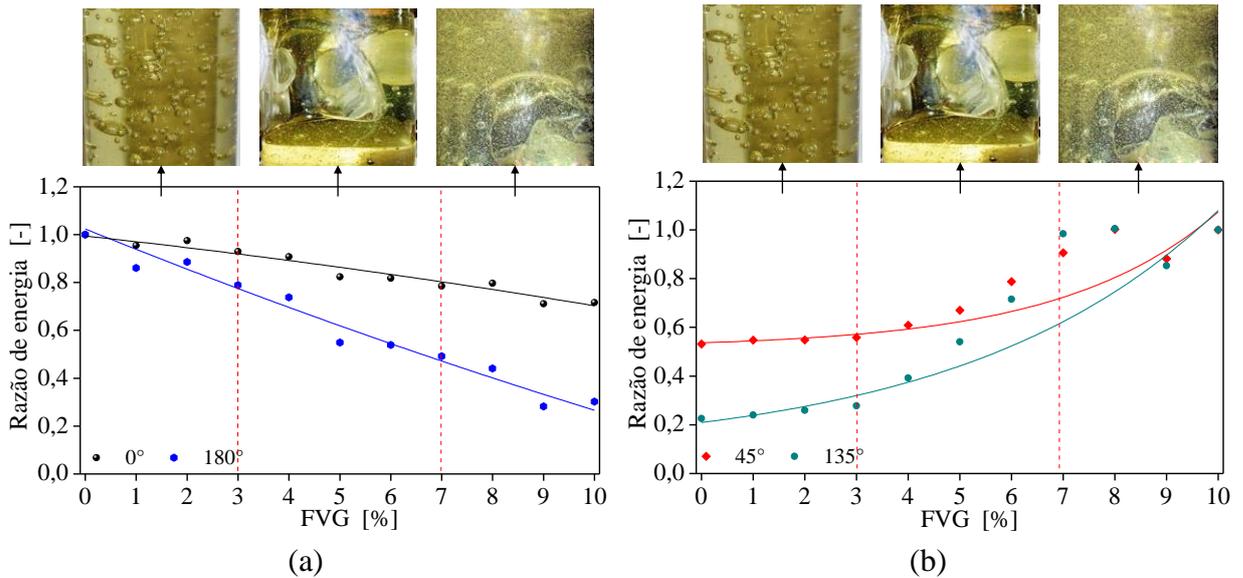


Figura 3.15. Razão de energia em função da FVG em misturas bifásicas óleo-ar para sensores de 2,25 MHz a (a) 0°, 180° e (b) 45°, 135° em tubulação de acrílico.

Para os sensores a 0° e a 180°, a razão de energia decai de forma linear à medida que a FVG aumenta. Isto se deve ao aumento do número de bolhas e pistões de gás na mistura, que bloqueiam e espalham o feixe acústico. No entanto, este efeito foi menos acentuado no sensor a 0° devido às múltiplas reflexões nas bolhas, aumentando a intensidade da energia refletida. Em relação aos sensores a 45° e 135°, o aumento da população de bolhas na mistura promoveu o espalhamento do feixe ultrassônico para as laterais, aumentando a energia nestes transdutores. Assim sendo, a FVG nestas misturas pode ser medida pela correlação da razão de energia nestes quatro transdutores.

Para os transdutores de 1 MHz, foram adotadas as mesmas condições experimentais utilizadas no caso dos sensores de 2,25 MHz. Os dados obtidos são apresentados na Figura 3.16, observando-se a existência de uma correlação entre a razão de energia e a FVG em todos os sensores. As tendências das curvas de ajuste neste caso se aproximam das tendências obtidas para os sensores de 2,25 MHz nas mesmas misturas com exceção do sensor a 0°. Neste transdutor, ocorre um decaimento acentuado e repentino da razão de energia quando a FVG passa de 3% para 4%. O comportamento das curvas de ajuste está associado ao fato do aumento da FVG promover uma atenuação do feixe acústico nos sensores a 0° e 180° por causa das múltiplas reflexões nas interfaces água-ar. Por outro lado, estas reflexões promovem o espalhamento para as laterais, aumentando a energia nos transdutores a 45° e 135°. Como conclusão, os transdutores de 1 MHz também podem ser usados para medir a FVG em misturas bifásicas líquido-gás.

Por fim, as tendências das curvas obtidas utilizando sensores de 2,25 MHz foram melhores do que aquelas obtidas com o sensor de 1 MHz. Os sensores de 2,25 MHz também apresentaram um bom desempenho nos trabalhos de Tanahashi (2010b), Grangeiro (2010) e Paiva (2011). Por estes motivos, nas condições de testes posteriores optou-se por utilizar somente o sensor de 2,25 MHz em tubulação de acrílico e óleo como fase contínua.

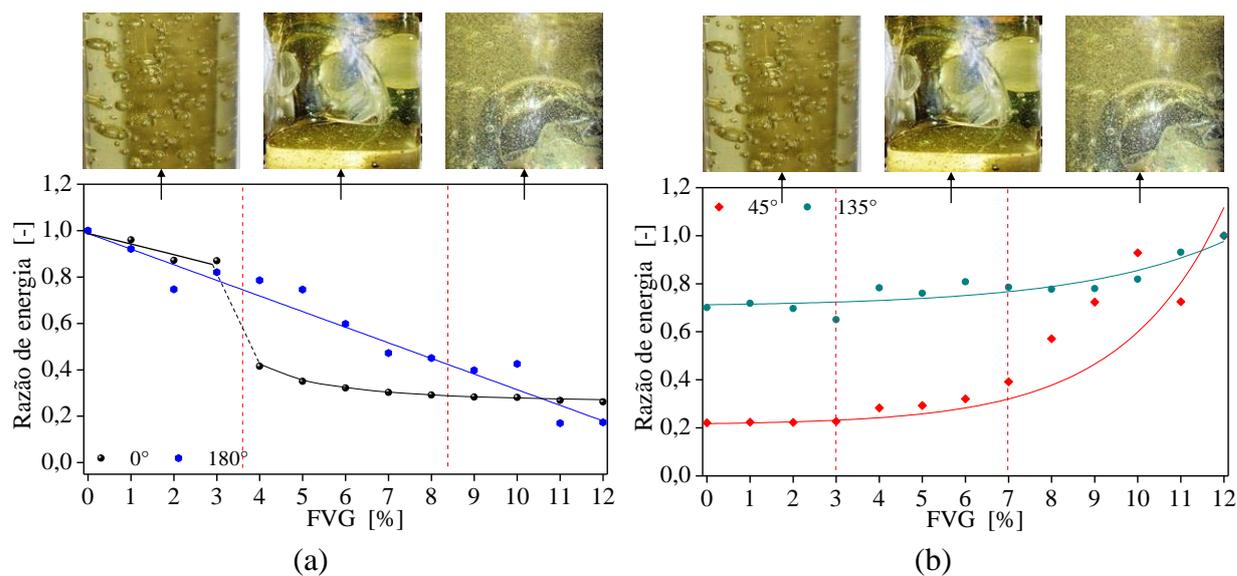


Figura 3.16. Razão de energia em função da fração volumétrica de gás em misturas bifásicas óleo-ar para sensores 1 MHz a (a) 0°, 180° e (b) 45°, 135° em tubulação de acrílico.

### 3.5.2. Tubulação de Aço

Neste caso, foi usada uma tubulação de aço 1020 de diâmetro nominal 2". A FVG na mistura foi novamente medida pelo inchamento da coluna de líquido. Para este fim, foi utilizada uma seção de visualização composta por um trecho em acrílico de 50 cm de comprimento rosqueado na parte superior da tubulação de aço. A Figura 3.17 mostra os dados obtidos para a razão de energia em função da FVG utilizando sensores de 2,25 MHz. Na faixa de FVG testada, a razão de energia nos sensores a 0° e 180° diminuiu com o aumento da FVG, ao passo que para os sensores a 45° e 135° houve um aumento da razão de energia. Todavia, as tendências específicas das curvas de ajuste para a tubulação de aço foram diferentes das tendências na tubulação de acrílico, notando-se sobretudo descontinuidades significativas nos gráficos para os sensores a 0° e 180° ao se passar de 3% para 4%. Os efeitos causadores destas descontinuidades não foram identificados e ainda estão sendo estudados.

Para os transdutores de 1 MHz em tubulação de aço, os resultados de atenuação acústica são mostrados na Figura 3.18. Observa-se um decréscimo aproximadamente linear da razão

de energia com o aumento da FVG no sensor a  $180^\circ$  (Figura 3.18a). Por outro lado, o sensor a  $45^\circ$  apresentou um aumento linear da razão de energia com o aumento da FVG. Em comparação com os resultados obtidos em tubulação de acrílico, as curvas de ajuste obtidas para aquele material proporcionaram uma medida mais confiável da FVG do que na tubulação de aço. Estes resultados mostraram que, de maneira geral, tanto em tubulação de aço quanto de acrílico, os sensores de 2,25 MHz apresentaram melhores curvas de ajuste e, portanto, revelaram-se mais adequados para a medição da FVG.

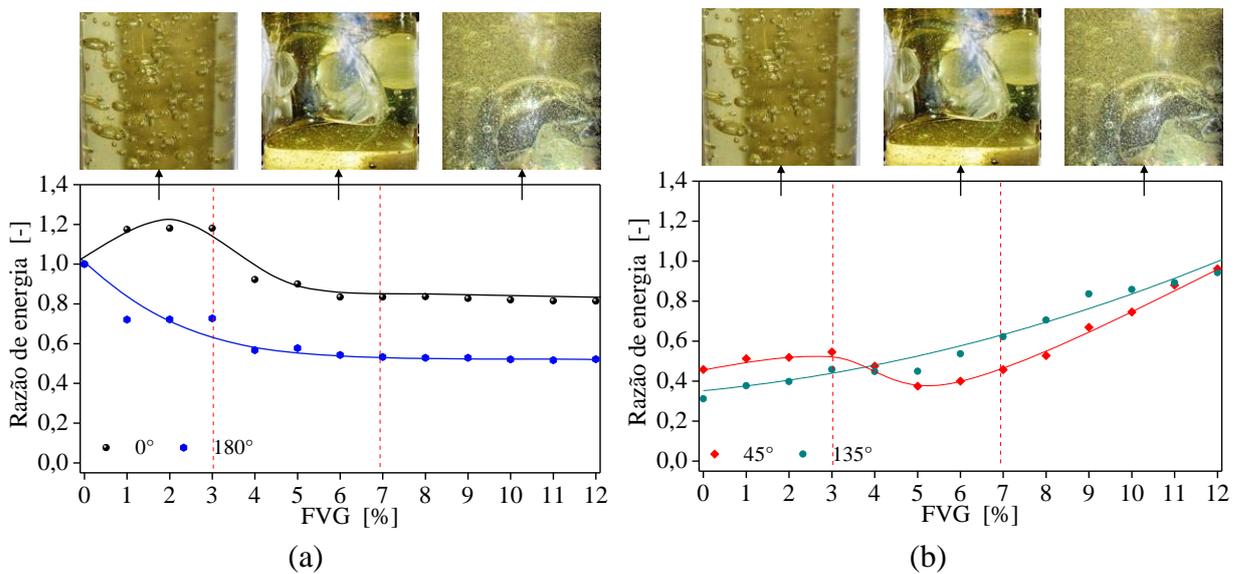


Figura 3.17. Razão de energia em função da FVG em misturas bifásicas óleo-gás e sensores 2,25 MHz a sensores a (a)  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  e (b)  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  em tubo de aço 1020.

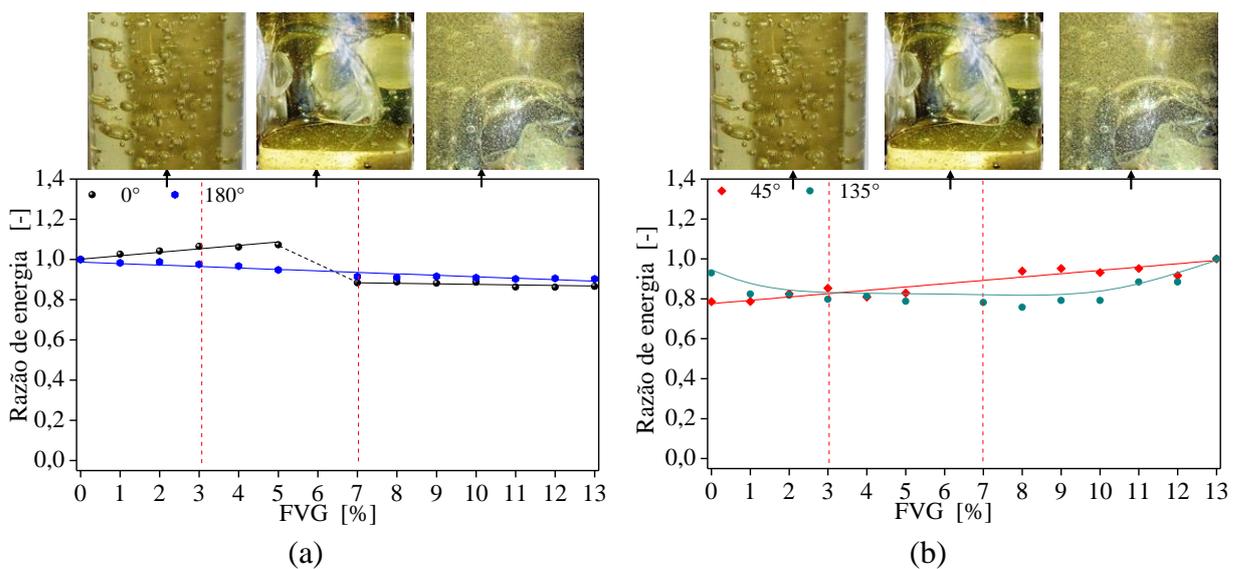


Figura 3.18. Razão de energia em função da FVG em misturas bifásicas óleo-gás para sensores de 1 MHz a (a)  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  e (b)  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  usando tubulação de aço 1020.

Por este motivo, os sensores de 2,25 MHz foram utilizados em todos os experimentos posteriores realizados no circuito multifásico vertical da UNIFEI, no circuito horizontal e na entrada da BCS horizontal no LABPETRO-UNICAMP. Por fim, como o objetivo principal era o desenvolvimento dos princípios da técnica ultrassônica, foram usadas tubulações de acrílico em todos estes experimentos por terem propiciado curvas de ajustes melhores do que no aço.

### 3.6. ANÁLISE DE MISTURAS BIFÁSICAS ÓLEO-ÁGUA

Com o objetivo de medir as concentrações de água em óleo, situação muito comum na indústria de petróleo, foi adotado um procedimento de injeção de água na parte superior da tubulação de forma que a fase água escoasse pelo efeito da gravidade. Esta metodologia simplificada foi usada porque o objetivo principal era apenas averiguar a sensibilidade do ultrassom para medidas da concentração de água em óleo.

Primeiramente foi feita uma avaliação visual do padrão do escoamento, como mostrado na Figura 3.19. Observou-se que, devido à turbulência crescente, o aumento da fração volumétrica de água (FVA) resultou em um aumento do número de gotas acompanhado de uma redução no seu diâmetro médio. Para FVA até 3%, as gotas apresentaram diâmetros entre 5 e 13 mm (a olho nu) e seguiam uma trajetória regular de queda (Figura 3.19a). Entre 3% e 10%, as gotas se quebravam mais frequentemente logo no ponto de injeção na extremidade superior da coluna de óleo, aumentando o número de gotas com diâmetros menores ( $d \sim 2$  mm). Verificava-se também a presença de gotas maiores, com diâmetros entre 5 e 13 mm (Figura 3.19b) de maneira uniforme ao longo do tubo.

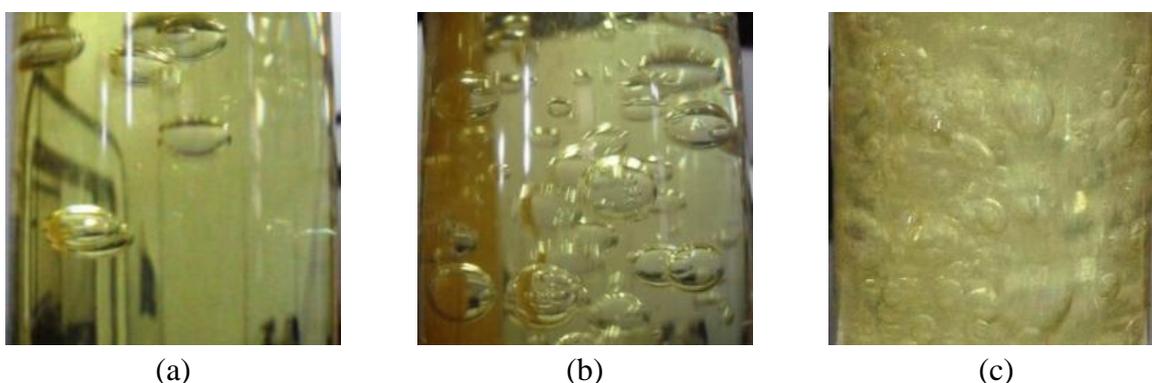


Figura 3.19. Padrões de escoamento típicos em misturas bifásicas óleo-água: (a) FVA = 2%; (b) FVA = 5% e (c) FVA = 10%.

Para FVA acima de 10%, observou-se a coalescência de gotas e a formação de pequenas calotas. Neste caso, observou-se também a predominância de gotas pequenas ( $d \sim 2$  mm), causada principalmente pela quebra das gotas no ponto de injeção de água na extremidade superior do tubo. A água escoava, portanto, na forma de uma mistura de gotas pequenas ( $d \sim 2$  mm), gotas médias ( $d \sim 8$  mm) e pequenas calotas ( $d \sim 25$  mm), como mostrado na Figura 3.19c.

Em relação à atenuação acústica nestas misturas, a Figura 3.20 mostra a razão de energia para FVA até 12%. De forma geral, observou-se que a fase dispersa água promoveu pouca variação da razão de energia quando comparada à fase dispersa ar. Uma explicação para esse efeito é o alto índice de transmissão do feixe acústico nas interfaces óleo-água ( $T \sim 97\%$  - Tabela A.2). Isto é, o baixo índice de reflexão, quando comparado com a fase dispersa gasosa, não promove um espalhamento significativo do feixe acústico, o que acarreta a pouca sensibilidade do ultrassom às variações de FVA.

Como conclusão, o ultrassom não apresentou um bom desempenho para medição da FVA nas condições testadas. Atualmente estão sendo feitos testes com água salgada para avaliação da sensibilidade dos processos de atenuação e espalhamento do feixe acústico na presença de íons de sal.

Vale ressaltar que existe um equipamento disponível comercialmente (Mastersizer 2000) que permite a quantificação da distribuição do tamanho de gotas por meio de uma técnica ultrassônica. Embora haja limitações quanto à faixa de concentração, tipos de fases e vazão, o ultrassom já vem sendo aplicada na indústria de petróleo e gás.

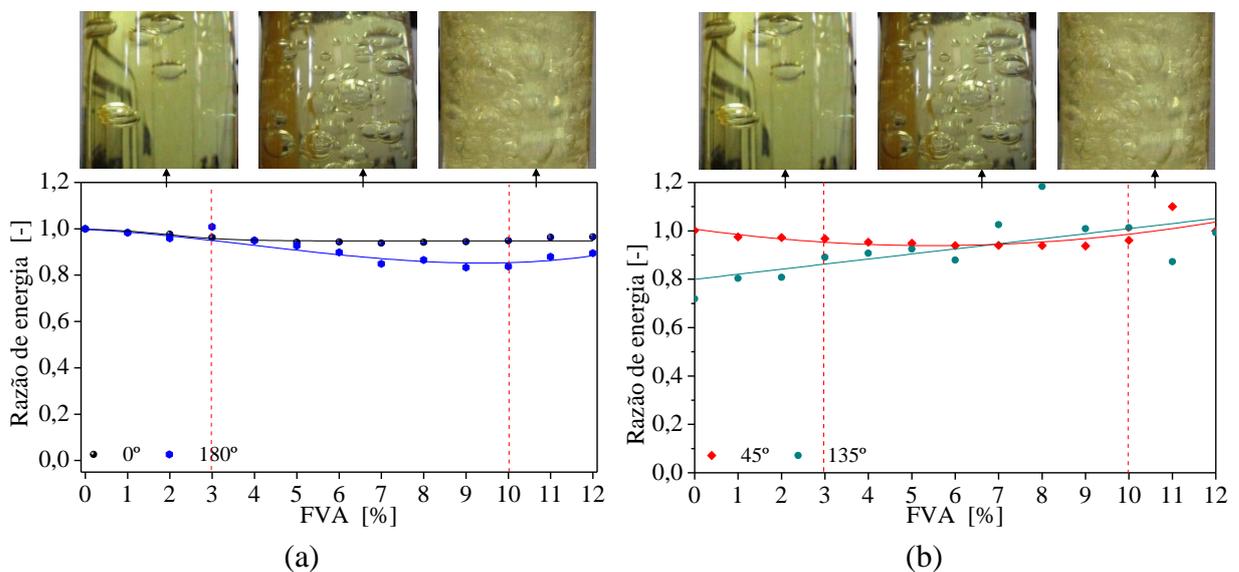


Figura 3.20. Razão de energia em função da FVA em misturas bifásicas óleo-água.

### 3.7. ANÁLISE DE MISTURAS BIFÁSICAS ÓLEO-SÓLIDOS

Visando avaliar a influência da concentração de particulados nos parâmetros acústicos, foram simuladas diversas suspensões utilizando-se microesferas de vidro e óleo USP para representar as fases sólida e líquida, respectivamente. Os testes foram feitos com fração volumétrica de sólidos (FVS) variando entre 0 % e 4 % vol. em passos de 0,5 % vol. em tubulação de acrílico usando transdutores de 2,25 MHz. Os particulados, doravante denominados simplesmente areia, apresentaram uma distribuição de tamanho conforme mostrado na Tabela 3.2 seguindo a norma NBR NM 248 da (ABNT 2003).

Na série #1, foram utilizadas microesferas com diâmetros exclusivamente 212 e 425  $\mu\text{m}$ . Por outro lado, na série #2, foram usadas microesferas com a distribuições percentuais de diâmetro conforme descrito na Tabela 3.2. A distribuição do tamanho de partículas correspondeu a valores do parâmetro  $ka$  entre 2,93 e 0,75, onde  $k$  é o número de onda e  $a$  é o raio da partícula e  $Re$  ( $Re = a/\delta$ ) variando entre 13 e 52, onde  $\delta$  é a espessura da camada limite em volta das partículas. Estes parâmetros foram calculados como base na nos modelos propostos por Kyotömaa (1995) e descrevem os mecanismos de atenuação acústica.

O gráfico para a energia média absoluta dos pulsos (Figura 3.21) mostra que pouquíssima energia chega aos sensores a 45°, 135° e 180°, quando comparados ao sensor a 0°, especialmente em concentrações acima de 1,0% de FVS. Na Figura 3.22, observa-se em ambos os gráficos que os sensores a 0° e 180° apresentam uma redução exponencial da razão de energia com o aumento da FVG, estabilizando-se em FVS ~ 1%.

Tabela 3.2. Distribuição do tamanho de partículas e parâmetros de atenuação no óleo.

<b>Série 1#</b>			
<b>Diâmetro [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Peso [%]</b>	<b>ka [-]</b>	<b>Re [-]</b>
212 - 425	100	2,1 - 1,1	37 - 19
<b>Série 2#</b>			
<b>Diâmetro [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Peso [%]</b>	<b>ka [-]</b>	<b>Re [-]</b>
> 590	0,6	> 2,9	> 52
425 - 590	54,3	2,9 - 2,1	52 - 37
212 - 425	38,2	2,1 - 1,1	37 - 19
150 - 212	6,0	1,1 - 0,8	19 - 13
< 150	0,9	< 0,8	< 13

Esta alta sensibilidade da técnica entre FVG 0 e 1% também foi observada por Tanahashi (2010a) para suspensões de areia em água usando tubulações de acrílico. Nas suspensões óleo-areia houve uma estabilização da razão de energia em valores mais altos do que nas suspensões água-areia. No presente caso, os parâmetros  $ka$  e  $Re$  permaneceram nas seguintes faixas 0,8 – 2,9 e 13 – 52, respectivamente, enquanto no trabalho de Tanahashi (2010a),  $ka$  e  $Re$  corresponderam a 0,7 – 2,8 e 203 – 803, respectivamente.

Apesar desta diferença nos patamares em um caso e outro, verificou-se a inter-relação do comportamento dos quatro sensores e a sensibilidade da técnica ultrassônica para a medição da concentração de areia na faixa de interesse na indústria do petróleo ( $FVS < 1\%$ ). Contudo, uma avaliação mais detalhada do potencial do ultrassom nesta faixa de concentrações só poderá ser feita futuramente em outra bancada experimental, visto que nenhuma das montagens disponíveis atualmente permite controle tão preciso da FVS.

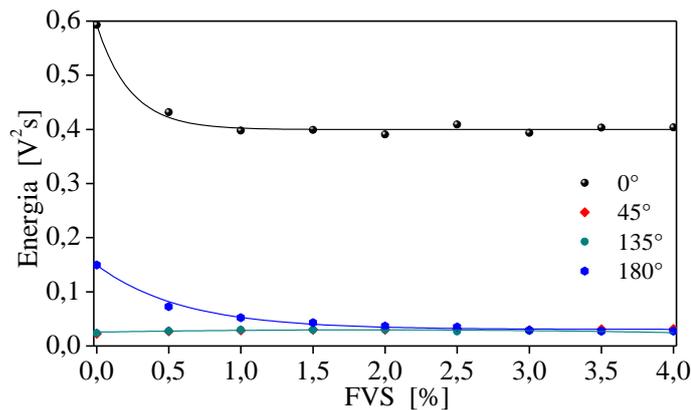


Figura 3.21. Energia média dos pulsos em função da FVS em misturas bifásicas óleo-sólidos (série 1#).

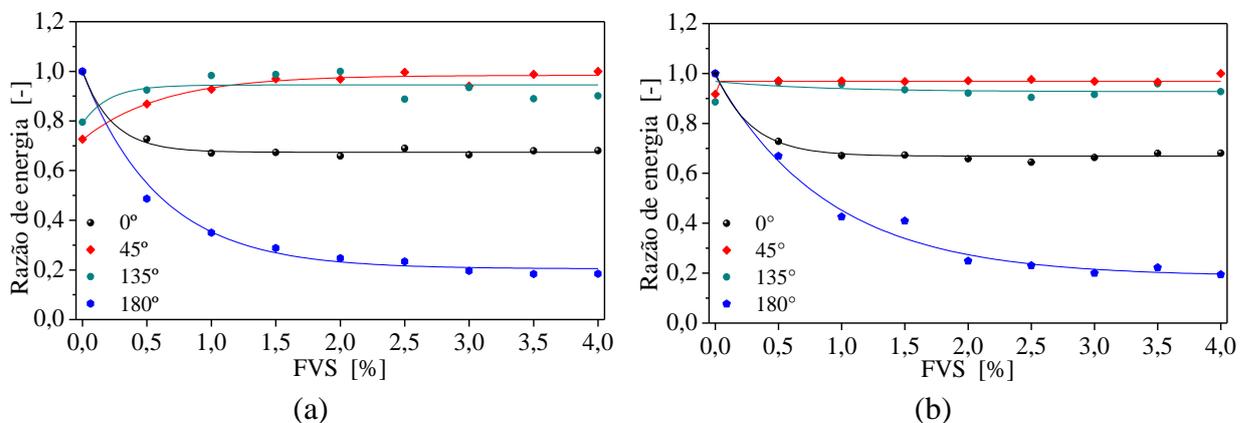


Figura 3.22. Razão de energia em função da FVS em misturas bifásicas óleo-sólidos para a (a) série 1# e (b) série 2#.

### 3.8. ANÁLISE DE MISTURAS TRIFÁSICAS ÓLEO-AR-ÁGUA

Esta seção descreve os principais resultados obtidos em misturas trifásicas óleo-ar-água na montagem simplificada. O ar era injetado por baixo e a água por cima de modo que as duas fases dispersas escoavam em contracorrente. Os testes foram realizados de forma que a fração volumétrica de água (FVA) se mantivesse fixa em três patamares (1%, 3% e 6%) enquanto a fração volumétrica de gás (FVG) variava de 0% a 8% em cada patamar. No entanto, o escoamento em contracorrente das fases dispersas promoveu a quebra das gotas de água em diâmetros menores do que aqueles nas misturas bifásicas óleo-água, chegando neste caso a diâmetros muito pequenos ( $d < 1$  mm – medido a olho nu). Estas pequenas gotas permaneciam então suspensas no óleo (Figura 3.23). Por esta razão, não foi possível manter a concentração de água fixa nos três patamares previstos inicialmente. A concentração de água durante as séries variou em três faixas distintas: 1 a 3%; 3 a 6% e, finalmente, 6 a 9% (Figura 3.23). A medição da concentração de água foi feita pelo inchamento a coluna de óleo no início de cada série de testes. Devido à dificuldade em visualizar o tamanho das gotas diretamente, foi usado um equipamento de medição de tamanho de gotas, Malvern Mastersizer 2000, para este propósito. A Figura 3.24 mostra a porcentagem volumétrica em função da distribuição do tamanho de gotas emulsionadas para duas misturas com FVA entre 3~6% e 6~9%, ambas correspondentes à mesma FVG de 2%. Embora estas medições tenham sido feitas cinco minutos após a coleta das amostras, favorecendo a coalescência das gotas, observa-se que o diâmetro médio das gotas foi menor do que 1 mm em ambos os casos (116  $\mu\text{m}$  e 108  $\mu\text{m}$ ), corroborando a existência de bolhas muito pequenas na mistura e difíceis de serem visualizadas a olho nu. Mais ainda, apesar do grande número de gotas minúsculas, foram obtidos sinais acústicos mensuráveis nestas misturas.

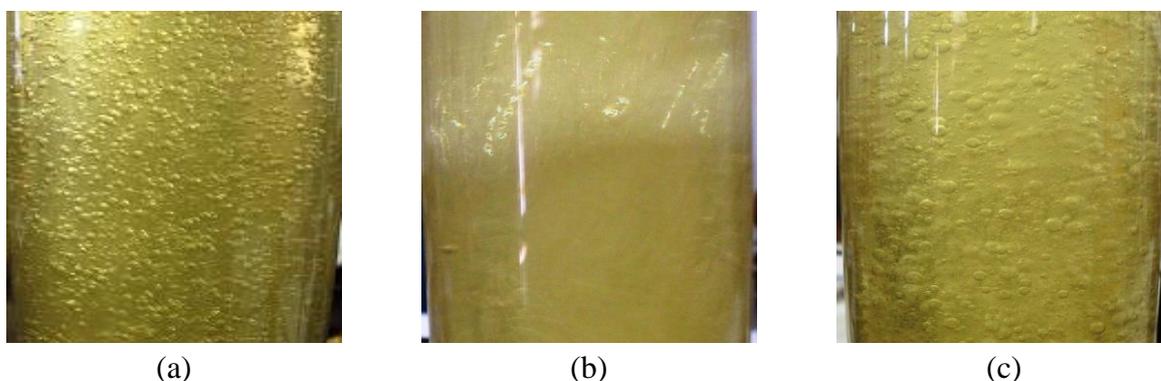


Figura 3.23. Padrões de escoamento típicos para misturas trifásicas óleo-gás-água nas seguintes condições: (a) FVA=3~6% e FVG=2%, (b) FVA=6~9% e FVG=8% e (c) FVA=6~9% e FVG=2%.

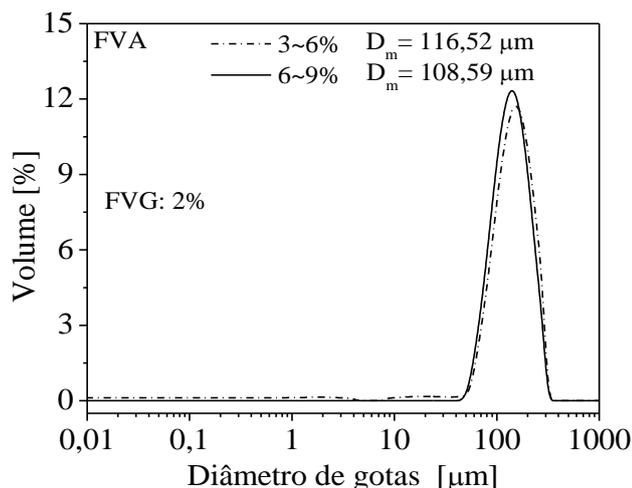
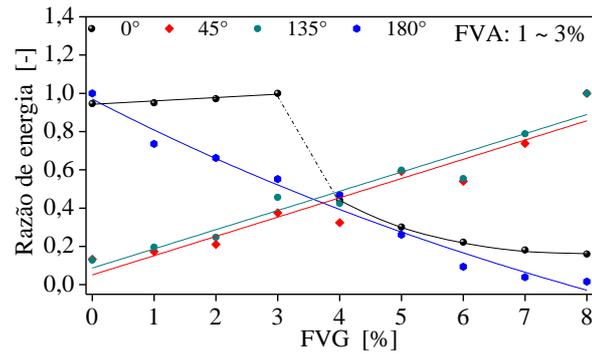


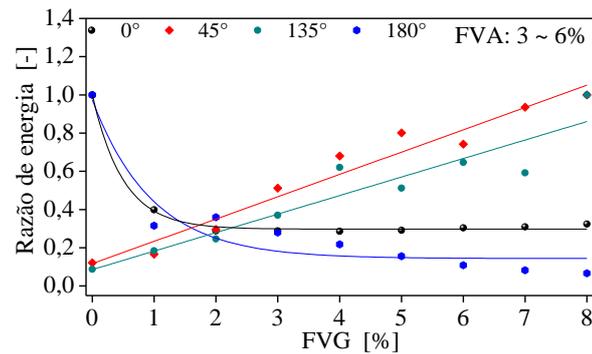
Figura 3.24. Distribuição do diâmetro de gotas em duas misturas distintas correspondentes ao segundo e terceiro patamar de FVA.

Os resultados para a razão de energia em função da FVG para os três patamares de FVA são mostrados na Figura 3.25. No sensor a  $180^\circ$  houve uma queda exponencial da razão de energia com o aumento da FVG nas três situações, exceto no primeiro caso em que a queda foi praticamente linear. Verificou-se a passagem progressiva da tendência linear à tendência exponencial à medida que se aumentou a FVA; entretanto, para os dois últimos patamares as curvas ficaram próximas (Figura 3.25b e Figura 3.25c). Com relação ao salto na curva de ajuste do sensor a  $0^\circ$  para o primeiro patamar (Figura 3.25a), ainda não se sabe qual a causa física deste comportamento. Por outro lado, para os sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$  as curvas de ajuste apresentaram um aumento linear com o aumento da FVG para as três situações. Estes resultados indicam que o ar é o fator controlador do processo de espalhamento, o que é compatível com o alto índice de reflexão nas interfaces óleo-ar ( $R_{ar} = 99,99\%$ ) comparado com o índice de reflexão nas interfaces óleo-água ( $R_{água} = 0,14\%$ ).

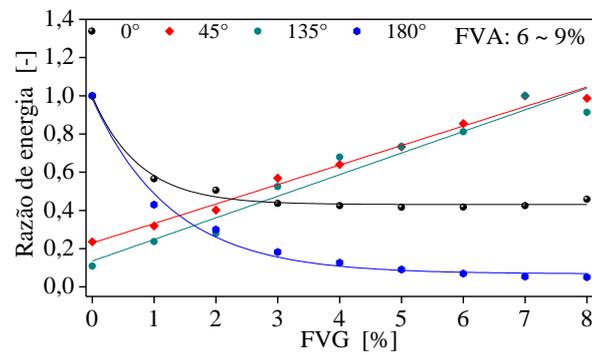
Foi também analisada a possibilidade do desvio padrão da razão de energia ser incluído no procedimento de medição das fases dispersas. A Figura 3.26 mostra este parâmetro em função da FVG para misturas bifásicas e trifásicas. A Figura 3.26a mostra o desvio padrão da razão de energia dos pulsos individuais de ultrassom em função da FVA em misturas bifásicas óleo-água. Observa-se que este desvio padrão foi bastante baixo para esta mistura, indicando que as gotas de água não causam grandes variações na razão de energia instantânea nestes quatro transdutores. Mais uma vez, isto é provavelmente devido ao alto índice de transmissão acústica nas interfaces óleo-água (Apêndice A).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.25. Razão de energia em função da FVG para misturas trifásicas óleo-ar-água.

Por outro lado, em misturas óleo-ar, a fase dispersa gás promoveu um aumento rápido e linear do desvio padrão nos transdutores a 45° e 135° à medida que aumentou a FVG (Figura 3.26*b*, *c*, *d* e *e*). Este comportamento se deve principalmente alto índice de reflexão nas interfaces líquido-gás ( $R = 99,9\%$ ) e à aleatoriedade do próprio fenômeno de espalhamento, de forma que sua intensidade do processo de espalhamento varia em função da distribuição instantânea da fase gasosa na seção transversal. Os coeficientes de determinação na Tabela 3.3 permaneceram relativamente altos para os sensores a 45° e 135° em misturas contendo gás, indicando que o desvio padrão pode, em princípio, ser usado de forma complementar à razão de energia para a medição da FVG. A utilização simultânea da razão de energia média e do desvio padrão da razão de energia instantânea tornaria a técnica ultrassônica mais robusta.

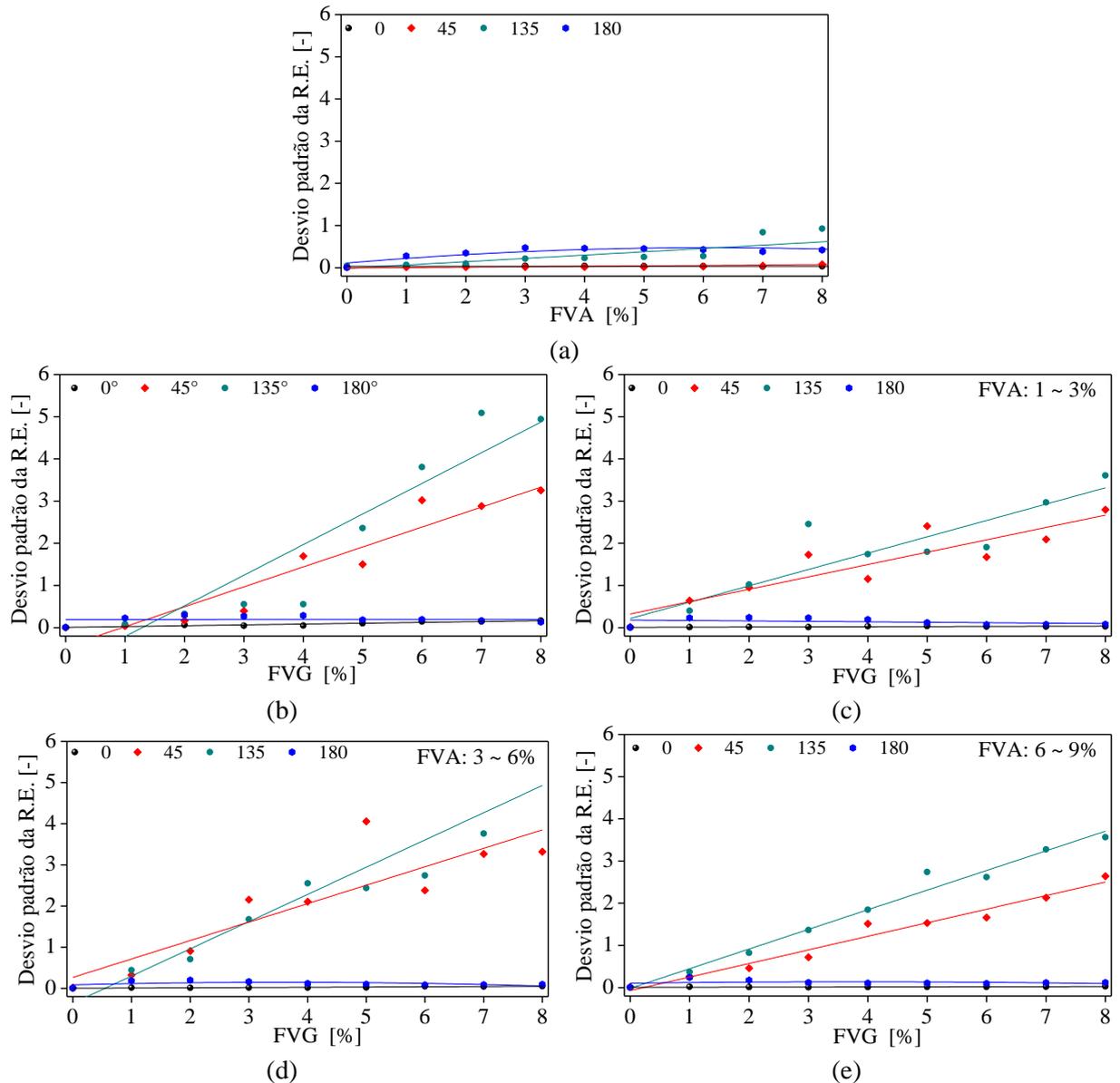


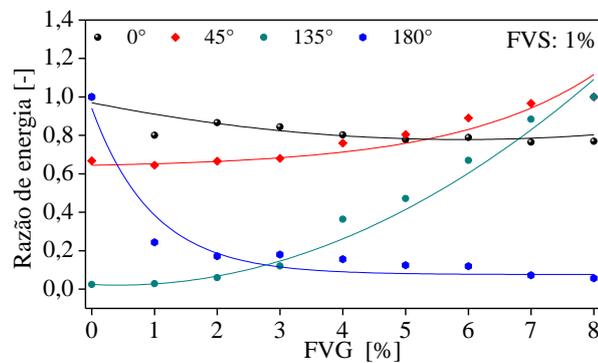
Figura 3.26. Desvio padrão da razão de energia em função da concentração da concentração da fase dispersa para misturas (a) bifásicas óleo-água, (b) bifásicas óleo-ar e (c), (d), (e) trifásicas óleo-ar-água.

Tabela 3.3. Coeficiente de determinação  $R^2$  entre os parâmetros ultrassônicos e a FVG na montagem simplificada.

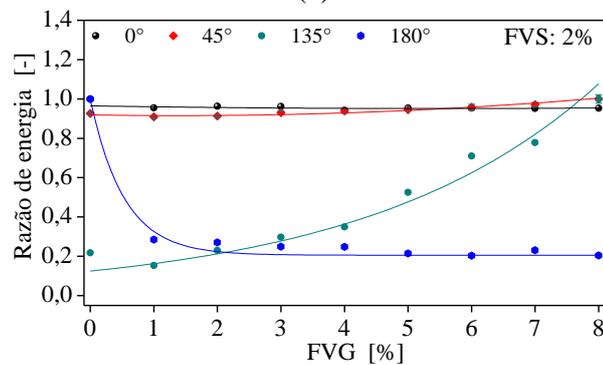
Parâmetros	Sensores	Óleo-ar	Óleo-água	Óleo-ar-água		
				FVA 1~3%	FVA 3~6%	FVA 6~9%
Razão de energia	0°	0,97	0,97	0,78	0,99	0,99
	45°	0,80	0,40	0,89	0,95	0,98
	135°	0,89	0,41	0,92	0,86	0,94
	180°	0,97	0,89	0,97	0,89	0,99
Desvio padrão da razão de energia	0°	0,68	0,81	0,52	0,82	0,47
	45°	0,89	0,43	0,79	0,74	0,96
	135°	0,85	0,63	0,80	0,87	0,98
	180°	0,51	0,70	0,69	0,70	0,26

### 3.9. ANÁLISE DE MISTURAS TRIFÁSICAS ÓLEO-AR-SÓLIDOS

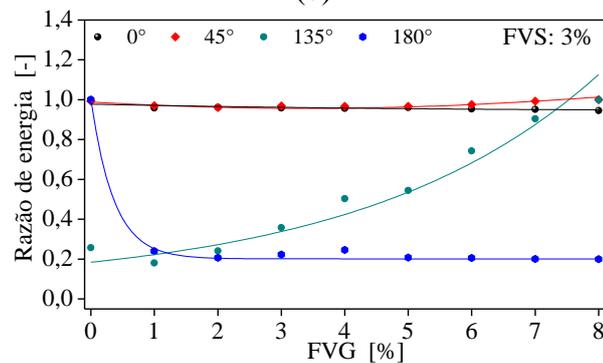
Foi feita uma avaliação da influência da fase dispersa areia nos sinais ultrassônicos e na medição da FVG, além de uma tentativa de medir a FVS. A Figura 3.27 mostra a razão de energia em função da FVG para três diferentes concentrações de sólidos. Os pontos referentes a 0% de FVG referem-se ao óleo monofásico, isto é, sem fase dispersa gás ou sólidos. Observa-se que a razão de energia no transdutor a 45° foi sensível à FVG apenas na primeira mistura, com 1% de FVS (Figura 3.27a). No sensor a 180°, observou-se uma redução brusca na razão de energia entre 0% e 1% de FVG nas três situações, sendo mais acentuada com o aumento da FVS. A partir de 1% de FVS houve pouca sensibilidade da razão de energia com o aumento da FVG neste transdutor.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.27. Razão de energia em função da FVG para misturas trifásicas óleo-ar-sólidos.

A alta sensibilidade da razão de energia à FVS no transdutor a  $180^\circ$  foi também observada por Tanahashi (2010a) em escoamentos bifásicos água-sólidos e por Paiva (2011) em escoamentos trifásicos água-gás-sólidos. O sensor a  $135^\circ$  não foi afetado significativamente pela FVS, apresentando tendências semelhantes das curvas de ajustes nas três situações. Além disso, o coeficiente de determinação das curvas de ajuste neste transdutor mantiveram-se acima de 0,84 (Tabela 3.4), indicando que este sensor pode ser usado para medir a FVG em misturas óleo-ar-sólidos. Como o desvio padrão da razão de energia havia mostrado resultados promissores para a medição da FVG em misturas trifásicas óleo-gás-água, este parâmetro também foi analisado nestas misturas óleo-gás-sólidos.

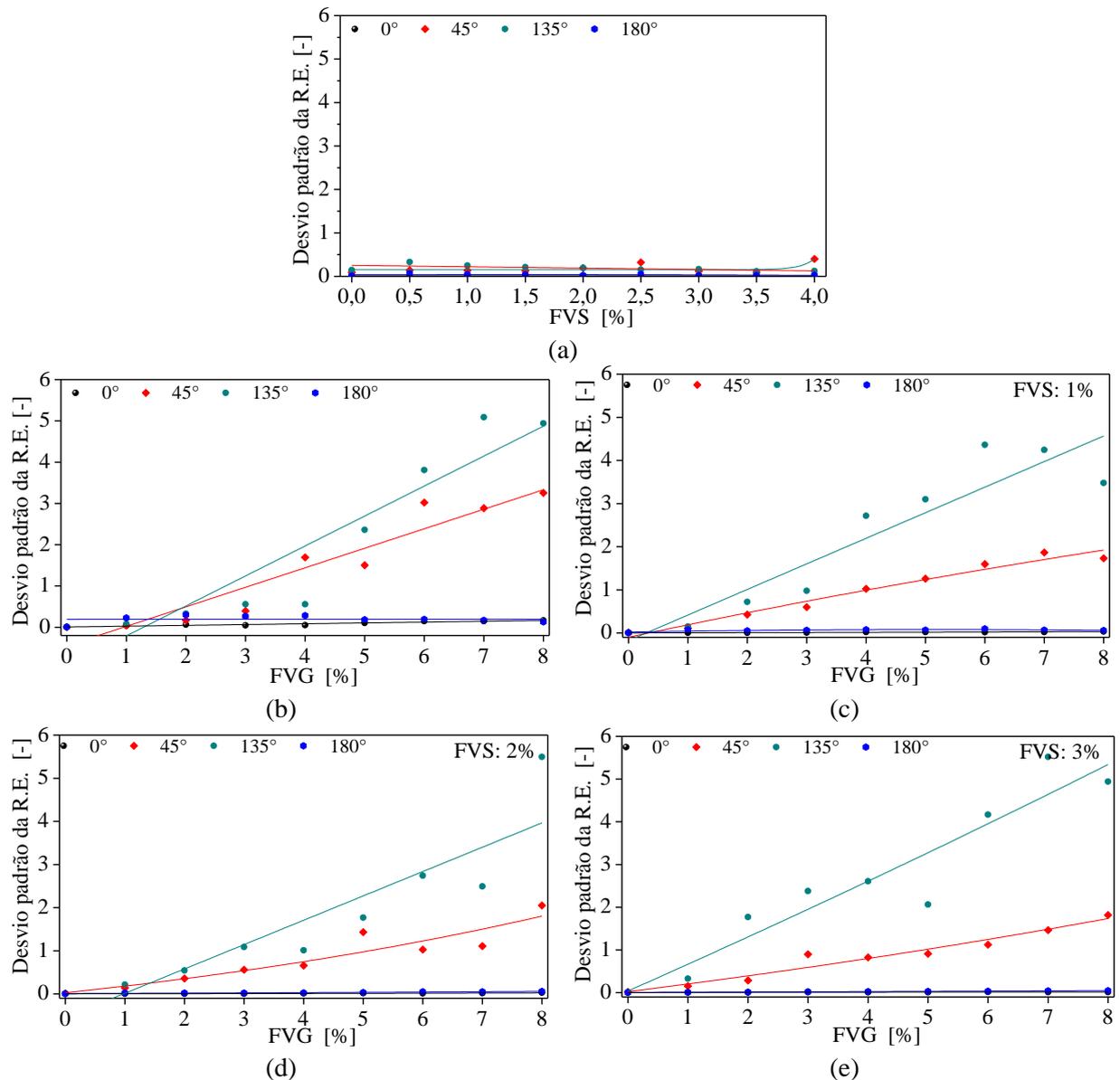


Figura 3.28. Desvio padrão da razão de energia em função da concentração da fase dispersa para misturas (a) bifásicas óleo-sólidos, (b) bifásicas óleo-gás e (c), (d), (e) trifásicas óleo-ar-sólidos.

A Figura 3.28a mostra que o desvio padrão da razão de energia permaneceu muito baixo com o aumento da FVS em misturas bifásicas óleo-sólidos, indicando que os particulados não causam variação significativa da razão de energia instantânea em nenhum dos quatro transdutores. Por outro lado, os desvios padrão nos sensores a 45° e 135° nas misturas bifásicas óleo-gás (Figura 3.28b) aumentaram rapidamente com o aumento da FVG. Nas misturas trifásicas (Figura 3.28c, d e e), o desvio padrão seguiram o mesmo comportamento linear nos sensores a 45° e 135° das misturas bifásicas óleo-gás (Figura 3.28b) nas três situações. Mais ainda, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para estes dois sensores a 45° e 135° permaneceram relativamente altos, quando comparados com os coeficientes dos sensores a 0° e 180°.

Finalmente, como a maioria dos escoamentos da indústria de óleo e gás apresenta valores de FVS menores do que 1% v/v, a combinação da razão de energia no sensor a 135° e do desvio padrão nos sensores a 45° e 135° poderia em princípio ser usada para medição da FVG, independentemente da FVS. Esta possibilidade será verificada mais a fundo no Capítulo 4, onde são apresentados dados ultrassônicos obtidos em escoamentos bifásicos, trifásicos e quadrifásicos tendo óleo como fase contínua. Diferente desta montagem simplificada, os dados apresentados no Capítulo 4 foram obtidos em um circuito onde todas as fases escoam.

Tabela 3.4. Coeficiente de determinação  $R^2$  entre os parâmetros ultrassônicos e a fração volumétrica de gás na montagem simplificada.

Parâmetros	Sensores	Óleo-ar	Óleo-sólidos	Óleo-ar-sólidos		
				FVS 1%	FVS 2%	FVS 3%
Razão de energia	0°	0,97	0,71	0,89	0,66	0,63
	45°	0,80	0,59	0,74	0,86	0,79
	135°	0,89	0,04	0,97	0,84	0,92
	180°	0,97	0,96	0,82	0,97	0,99
Desvio padrão da razão de energia	0°	0,68	0,02	0,78	0,71	0,66
	45°	0,89	0,42	0,96	0,82	0,93
	135°	0,85	0,21	0,83	0,92	0,86
	180°	0,51	0,18	0,51	0,92	0,98

### 3.10. ANÁLISE DE MISTURAS BIFÁSICAS ÓLEO-AR EM TUBOS COM DEPÓSITO DE PARAFINA

Uma vez que a deposição de parafina está presente em diversos processos da indústria de óleo e gás, causando grandes transtornos no transporte dos fluidos, foi feita uma avaliação

da influência destes depósitos nas medidas do ultrassom. Primeiramente, tentou-se medir a FVG em tubos com depósitos de parafinas (Figura 3.29) e em seguida tentou-se medir a espessura destes depósitos. A parafina simulada era constituída de uma mistura de parafina branca (ponto de fusão 66 °C) e 3% em massa de petróleo extrapesado (°API < 19) do campo de Fazenda Alegre. Foram obtidas medidas ultrassônicas em misturas óleo-ar em tubos de acrílico em três situações diferentes: (a) sem depósito de parafina, (b) depósito de 0,7 cm de espessura e (c) depósito de 1,2 cm de espessura. Em cada condição, a FVG variou de 0% a 8% em passos de aproximadamente 1%.

Uma vez identificadas as janelas de atividade referentes ao interior do tubo de acrílico, procedeu-se com o estudo da correlação entre a razão de energia e a FVG nas três situações diferentes (Figura 3.30). Mesmo havendo o depósito de parafina, observou-se uma correlação clara entre a razão de energia e a FVG na mistura nos quatro transdutores. Não foi possível, entretanto, identificar a interface parafina óleo nos sinais ultrassônicos a fim de determinar a espessura dos depósitos. O sinal refletido nesta interface era por demais fraco e se confundia com o ruído. A fim de identificar as espessuras dos depósitos de parafina, trabalhos futuros poderão usar técnicas de filtragem e processamento de sinais.

Nesta montagem experimental foi possível identificar os sinais ultrassônicos em diferentes caminhos acústicos em tubulação de acrílico e conhecer as dificuldades de identificar estes sinais em tubulação de aço. As correlações entre a atenuação acústica e a concentração das fases dispersas foram melhores para os experimentos com a presença do gás, indicando que o gás possui uma característica marcante no processo de atenuação e espalhamento do feixe acústico.

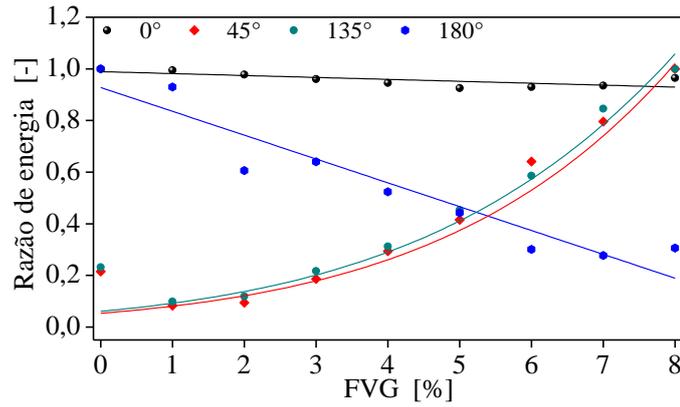


(a)

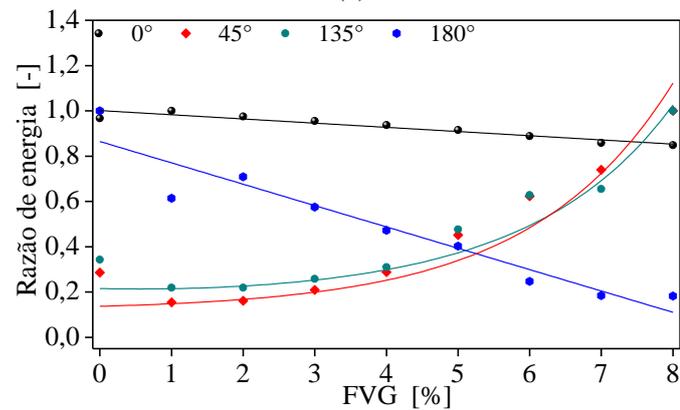


(b)

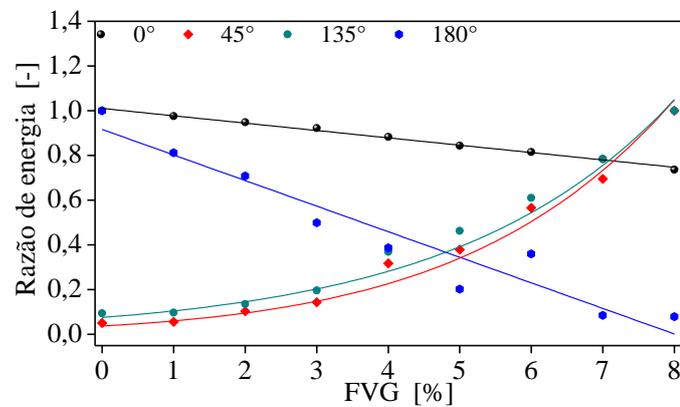
Figura 3.29. (a) Tubos de acrílico com depósitos de parafina e (b) montagem da estação ultrassônica simulando a posição usada para medir a fração volumétrica de gás e a espessura do depósito.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.30. Razão de energia em função da fração volumétrica de gás para as seguintes situações: (a) sem depósito de parafina, (b) 0,7 cm de espessura e (c) 1,2 cm de espessura.

## CAPÍTULO 4

### 4. DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA PARA A MEDIÇÃO DE BAIXA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE GÁS

Após os estudos preliminares na montagem experimental simplificada, os testes foram realizados em um circuito vertical com tubulações de uma polegada e duas polegadas a fim de medir a fração volumétrica de gás (FVG) em diversos tipos de escoamentos multifásicos representativos da indústria de petróleo e gás. Foram obtidos dados para escoamentos bifásicos óleo-ar, trifásicos óleo-ar-sólidos e óleo-ar-água e quadrifásicos óleo-ar-água-sólidos. Neste capítulo, são apresentados os resultados para baixas concentrações de gás (FVG < 20%).

#### 4.1. DESCRIÇÃO DO CIRCUITO VERTICAL

Um circuito de testes foi projetado e construído no Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração na Universidade Federal de Itajubá (LRF-UNIFEI) para simulação de escoamentos verticais representativos da indústria de petróleo (Figura 4.1).

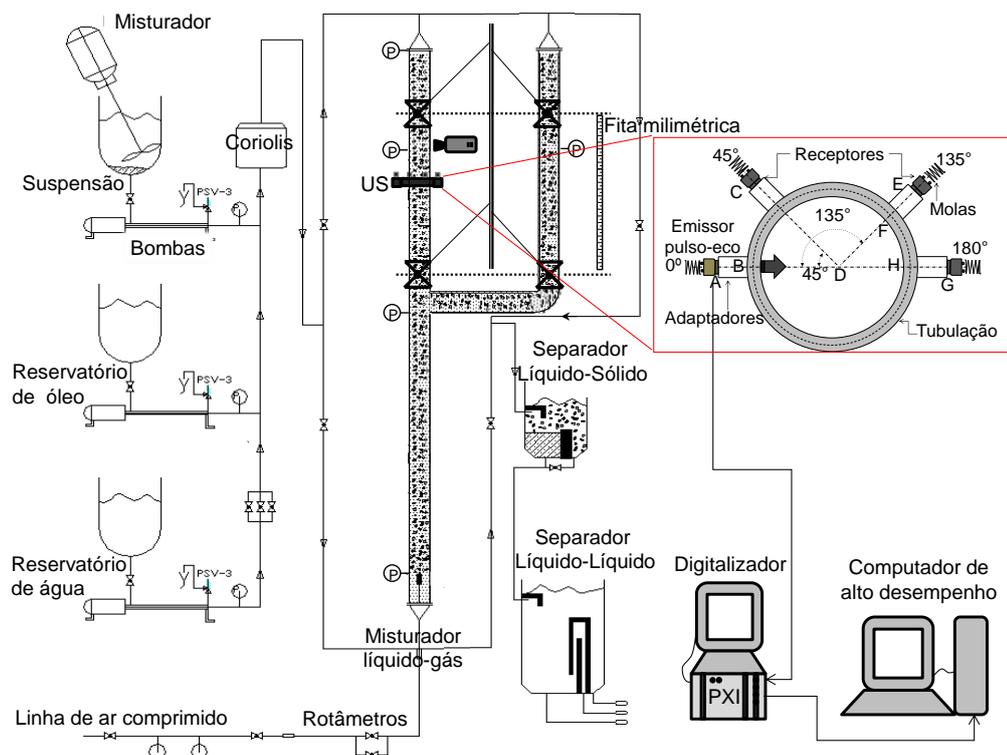


Figura 4.1. Circuito de teste de escoamentos multifásicos (LRF-UNIFEI).

Neste circuito, é possível realizar experimentos com escoamentos bifásicos óleo-ar, óleo-água e óleo-sólidos bem como escoamentos trifásicos e quadrifásicos (óleo-água-ar-sólidos) em diferentes padrões de escoamento. As fases provenientes dos reservatórios são injetadas na parte inferior da tubulação, se desenvolvem na direção ascendente, sendo posteriormente separadas nos tanques para este fim. A tubulação foi projetada em acrílico para efeito de visualização do escoamento e melhoria na qualidade dos sinais ultrassônicos para o desenvolvimento da técnica de forma não-intrusiva. No início do circuito, as fases líquidas óleo e água podem ser armazenadas em dois tanques separados, um com volume de 500 litros e outro de 2000 litros, além de um terceiro tanque de 2000 litros que permite o armazenamento de suspensões (Figura 4.2a). No fundo deste último tanque existe um dispositivo, chamado de “turbulador”, utilizado para aumentar a turbulência e evitar que os sólidos se sedimentem. Este dispositivo consiste de um tubo com furos que completa uma volta no fundo do tanque. A suspensão é injetada por estes furos movida por uma bomba centrífuga (sistema de recirculação da suspensão). Além do turbulador, há neste tanque para suspensões uma hélice acoplada a um motor elétrico de 4 HP para evitar a sedimentação das partículas.

Na extremidade inferior de cada tubulação de acrílico, uma ou duas polegadas, existe um meio poroso e cilíndrico que permite a injeção de gás proveniente da linha de ar comprimido do laboratório (~ 6 bar), conforme mostrado na Figura 4.3a. O escoamento se desenvolve ao longo da tubulação e a fração volumétrica de gás é medida na seção de válvulas de fechamento rápido na parte superior da tubulação (Figura 4.3b), onde foram posicionados os transdutores ultrassônicos e a câmera de filmagem rápida.

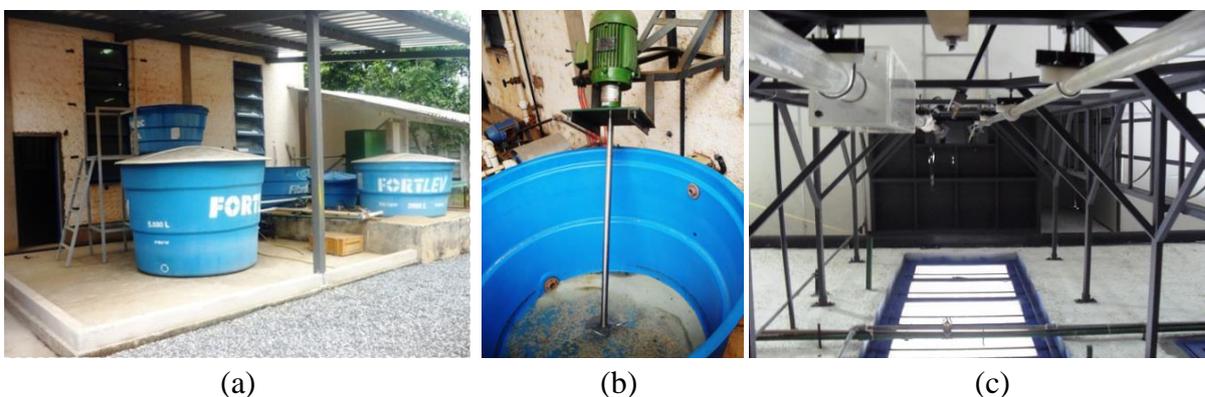


Figura 4.2. (a) Reservatórios do circuito experimental, (b) tanque de suspensão e (c) tubulações de acrílico.



Figura 4.3. (a) Ponto de injeção de gás no escoamento e (b) seção de medição da fração volumétrica de gás na parte superior do circuito.

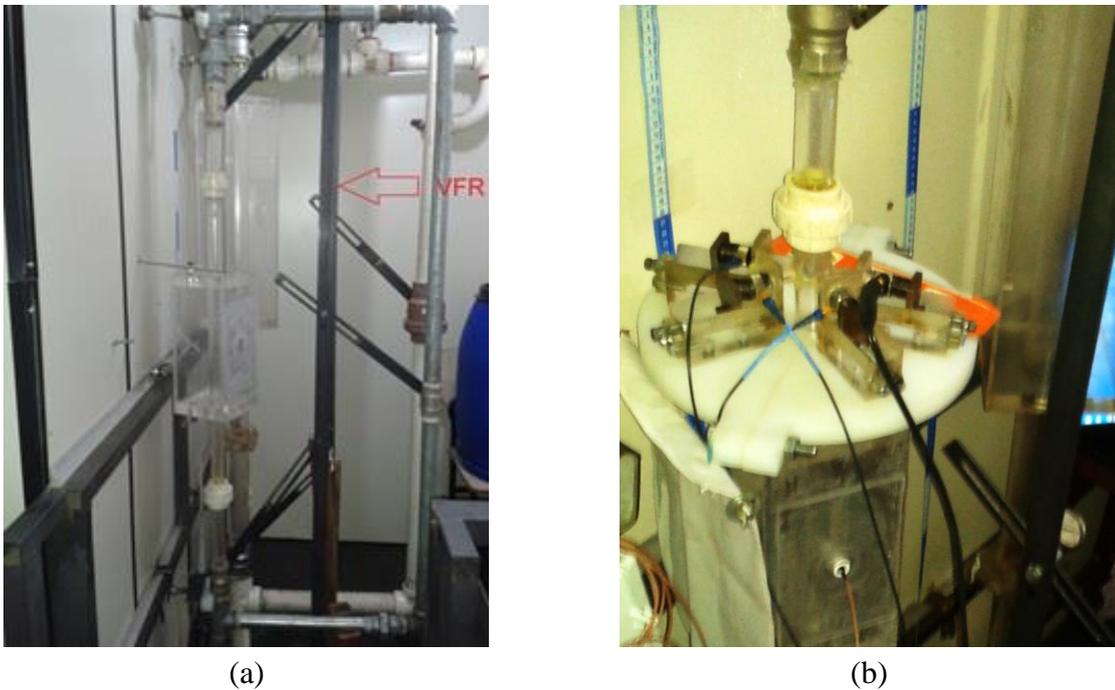


Figura 4.4. (a) Seção de testes entre as válvulas de fechamento rápido e (b) montagem da estação ultrassônica na seção de testes na tubulação de uma polegada.

O escoamento segue então para o primeiro separador, onde o gás e os sólidos são separados da fase líquida e, em seguida, o óleo é separado da água no segundo separador. Em todos os casos, a separação é feita pela ação da gravidade. Na parte superior do circuito de testes localizam-se dois conjuntos de válvula de fechamento rápido (VFR), um para a tubulação de uma polegada e outro para a tubulação de duas polegadas (Figura 4.4a). Cada conjunto possui três válvulas, sendo duas instaladas na tubulação principal (lado direito da Figura 4.4a) e uma em uma tubulação de desvio (lado esquerdo da Figura 4.4a).



Figura 4.5. (a) Sistema de controle e medição das vazões de líquido e (b) bombas de cavidade progressiva.

Ao serem acionadas, as duas válvulas da tubulação principal aprisionam o escoamento no trecho da seção de testes enquanto a outra libera o fluxo para uma tubulação de desvio. O comprimento do trecho entre as duas válvulas da tubulação principal é de 138 cm na tubulação de duas polegadas e de 102 cm na tubulação de uma polegada. Estes comprimentos eram os maiores possíveis no espaço físico disponível, mas foram suficientes para adquirir amostras representativas do escoamento. Após aproximadamente 25 s do fechamento das válvulas, o gás aprisionado se separava da fase líquida na parte superior e as alturas da coluna de líquido e de gás eram medidas por uma escala milimétrica, sendo então possível calcular a FVG. O aparato ultrassônico descrito na Seção 3.2 foi instalado nesta seção entre as válvulas de fechamento rápido. A aquisição dos dados ultrassônicos era realizada enquanto as válvulas estavam abertas e o escoamento passando pela tubulação principal.

As vazões dos líquidos eram ajustadas por meio de inversores de frequência (Figura 4.5a) que controlam a rotação de duas bombas de cavidade progressiva. Estas bombas permitiam vazões de até 55 kg/min e 4 % em massa de sólidos (Figura 4.5b). As vazões de óleo e de água eram medidas por um medidor do tipo Coriolis, marca Rheonik, modelo RHM12 (0,75 a 100,00 kg/min  $\pm$  0.2%) que inclui um termômetro digital com faixa de operação entre -20 a 120 °C  $\pm$  1 °C. As vazões de ar foram medidas por um medidor do tipo rotâmetro, marca Cole Parmer, (3 a 30 lpm  $\pm$  0,1 lpm). A fim de se monitorar a operação da montagem, as pressões nos vários pontos foram medidas por manômetros do tipo bourdon (0 a 4 psi  $\pm$  0,2 psi), posicionados da seguinte forma: um no ponto de injeção, outro a 3 metros acima e outro a 5 metros acima do ponto de injeção (Figura 4.1). A temperatura do ar no ponto de injeção foi suposta igual à temperatura do ar atmosférico, medida por um termômetro de bulbo com precisão de  $\pm$  0,5 °C. Embora se soubesse que a temperatura do ar

no ponto de injeção fosse ligeiramente maior do que a temperatura ambiente, esta hipótese foi necessária devido às dificuldades de instrumentação. Entretanto, a temperatura do ar no ponto de medição (~ 6m de altura) foi considerada igual à temperatura do líquido por causa da alta taxa de transferência de calor entre bolhas e líquido.

A estação ultrassônica foi posicionada a 6 m de altura a partir do ponto de injeção de ar ( $L/D \sim 111$ ) ao lado da estação de filmagem rápida de modo a se poder comparar diretamente as imagens dos escoamentos com os sinais ultrassônicos. Esta instrumentação foi detalhada na Seção 3.2.

## 4.2. PROCEDIMENTOS DE MEDIDA

Uma série de dados foi adquirida na tubulação de uma polegada com FVG variando entre 0 e 85% e outra série na tubulação duas polegadas com FVG entre 0 e 35%. Os incrementos de FVG foram de aproximadamente 2,5% na tubulação de uma polegada e de 2% na tubulação de duas polegadas. A fase contínua em ambas as séries foi óleo mineral USP cujas propriedades físicas ( $\rho=814.5 \text{ kg/m}^3$  e  $\mu=41.36 \text{ mPa.s}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) podem ser comparadas às de um óleo leve. Foram realizados testes com escoamentos bifásicos óleo-ar, trifásicos óleo-ar-água e óleo-ar-sólidos e quadrifásicos óleo-ar-água-sólidos. O ar foi utilizado para simular o gás devido à praticidade e ao fato de sua impedância acústica ser próxima da impedância dos gases combustíveis (hidrocarbonetos).

Em ambas as séries, as vazões de ar e de líquido foram alteradas de forma se obter os valores de FVG e padrões de escoamento desejados. Devido ao fato da montagem operar em bateladas, era necessário manter a velocidade do líquido dentro de limites compatíveis com o tempo necessário para a realização de todas as medidas. Isto causou certa aleatoriedade nas velocidades de ar e de líquido de modo que comparações entre padrões de escoamento têm por base primordialmente a fração volumétrica de gás.

A taxa de pulsação (geração de pulsos ultrassônicos) foi ajustada em 2 kHz e a taxa de amostragem dos pulsos em 20 MHz a fim reduzir os efeitos de atrasos nos sinais (*aliasing*). O tempo de amostragem era de 7,5 s, cada amostra totalizando, portanto, 15.000 pulsos. Foram obtidas seis amostras para cada fração volumétrica de gás (FVG). Para cada amostra ultrassônica obtida, era feita a medição independente da FVG pelo sistema de válvulas de fechamento rápido. Os dados operacionais foram armazenados em planilhas do Excel®. A Tabela 4.1 mostra as variáveis primárias correspondentes às pressões e temperaturas nas linhas de líquido e de gás.

Tabela 4.1. Tabela de variáveis primárias correspondentes às linhas de líquido e de gás.

MEDIDAS NAS LINHAS DE LÍQUIDO E DE GÁS						
Pbaro [hpa] =				906,6		
Temp. Ambiente [° C] =				24		
Nº	Arquivo	Fluidos	Linha de Líquido		Linha de Ar Comprimido	
			Temp. óleo (Coriolis) [°C]	Vazão óleo (Coriolis) [kg/min]	Temp. Ar (Bulbo) [°C]	Pressão Rel. Ar (Bourdon) [kgf/cm <sup>2</sup> ]
1	1	Oleo/Ar	24.0	3,92	27.0	2.00
2	2	Oleo/Ar	24.0	3,92	27.0	1.00
3	3	Oleo/Ar	24.0	3,92	27.0	1.00
4	4	Oleo/Ar	24.0	3,92	27.0	1.00
5	5	Oleo/Ar	24.0	3,92	27.0	1.00
6	6	Oleo/Ar	24.0	6,50	22.0	2.00
7	7	Oleo/Ar	24.0	6,50	22.0	2.00
8	8	Oleo/Ar	24.0	6,50	22.0	2.00
9	9	Oleo/Ar	24.0	6,50	22.0	2.00
10	10	Oleo/Ar	24.0	6,50	22.0	2.00
11	11	Oleo/Ar	24.0	6,70	22.0	2.00
12	12	Oleo/Ar	24.0	6,70	22.0	2.00
13	13	Oleo/Ar	24.0	6,70	22.0	2.00
14	14	Oleo/Ar	24.0	6,70	22.0	2.00
15	15	Oleo/Ar	24.0	6,70	22.0	2.00

Tabela 4.2. Tabela de variáveis secundárias correspondentes às seções de injeção de ar de testes.

MEDIDAS NA SEÇÃO DE INJEÇÃO E TESTES									
Nº	Arquivo	Fluidos	Seção Testes	Seção Injeção	Ultrasom				
			Pressão (Bourdon) [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Pressão (Bourdon) [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Freq. Pulsção [Hz]	Freq. Aquis. [MHz]	Tempo Amostra [s]	Nº Pulsos [-]	Deslocam. Escoam. [cm]
1	1	Oleo/Ar	0.0	1.0	2000	20	7.5	15000	1.1
2	2	Oleo/Ar	0.0	1.0	2000	20	7.5	15000	1.1
3	3	Oleo/Ar	0.0	1.0	2000	20	7.5	15000	1.1
4	4	Oleo/Ar	0.0	1.0	2000	20	7.5	15000	1.1
5	5	Oleo/Ar	0.0	1.0	2000	20	7.5	15000	1.1
6	6	Oleo/Ar	0.0	1.0	2000	20	7.5	15000	2.1
7	7	Oleo/Ar	0.0	1.0	2000	20	7.5	15000	2.1
8	8	Oleo/Ar	0.0	1.0	2000	20	7.5	15000	2.1

Tabela 4.3. Tabela de valores absolutos de pressão e temperatura do ar.

VALORES ABSOLUTOS DE PRESSÃO E TEMPERATURA			
Nº	Arquivo	Ar	
		T <sub>teste</sub> [K]	P <sub>teste</sub> [bar]
1	1	297.15	0.91
2	2	297.15	0.91
3	3	297.15	0.91
4	4	297.15	0.91
5	5	297.15	0.91
6	6	297.15	0.91
7	7	297.15	0.91
8	8	297.15	0.91
9	9	297.15	0.91
10	10	297.15	0.91
11	11	297.15	0.91
12	12	297.15	0.91
13	13	297.15	0.91
14	14	297.15	0.91
15	15	297.15	0.91

Tabela 4.4. Parâmetros primários calculados referentes às vazões volumétricas de líquido e de gás.

CÁLCULO DAS VAZÕES VOLUMÉTRICAS						
Nº	Arquivo	Linha de Ar Comprimido	Seção Testes		Oleo	
		Q <sub>actual</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>actual</sub> [m <sup>3</sup> /s]	ρ <sub>ar</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ[kg/m <sup>3</sup> ]	Q [m <sup>3</sup> /s]
1	1	0.00E+00	0.00E+00	1.06	860.0	7.60E-05
2	2	0.00E+00	0.00E+00	1.06	860.0	7.60E-05
3	3	0.00E+00	0.00E+00	1.06	860.0	7.60E-05
4	4	0.00E+00	0.00E+00	1.06	860.0	7.60E-05
5	5	0.00E+00	0.00E+00	1.06	860.0	7.60E-05
6	6	7.77E-05	1.27E-05	1.06	860.0	1.26E-04
7	7	7.77E-05	1.27E-05	1.06	860.0	1.26E-04
8	8	7.77E-05	1.27E-05	1.06	860.0	1.26E-04
9	9	7.77E-05	1.27E-05	1.06	860.0	1.26E-04
10	10	7.77E-05	1.27E-05	1.06	860.0	1.26E-04
11	11	1.32E-04	2.16E-05	1.06	860.0	1.30E-04
12	12	1.32E-04	2.16E-05	1.06	860.0	1.30E-04
13	13	1.32E-04	2.16E-05	1.06	860.0	1.30E-04

Tabela 4.5. Parâmetros secundários calculados na seção de testes.

CÁLCULO DAS FVG E VELOCIDADES SUPERFICIAIS										
Diam =	25.4	mm								
PI =	3.14	-								
Area =	5.07E-04	m <sup>2</sup>								
Nº	Arquivo	$j_{ar}$ [m/s]	$j_{óleo}$ [m/s]	$j$ [m/s]	$\alpha_{homogêneo}$ [%]	$\alpha_{Zuber-Findlay}$ [%]	$A_{válvula}$ fechamento rápido [%]	$\rho_{ar} \cdot j_{ar}^2$ [kg/s <sup>2</sup> m]	$\rho_{óleo} \cdot j_{óleo}^2$ [kg/s <sup>2</sup> m]	Descrição Padrão
1	1	0.00	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.000	19.3	Monofásico
2	2	0.00	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.000	19.3	
3	3	0.00	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.000	19.3	
4	4	0.00	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.000	19.3	
5	5	0.00	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.000	19.3	
6	6	0.03	0.2	0.3	9.1	0.1	4.7	0.001	53.1	Maior quantidade de bolhas mas do mesmo tamanho
7	7	0.03	0.2	0.3	9.1	0.1	4.7	0.001	53.1	
8	8	0.03	0.2	0.3	9.1	0.1	4.7	0.001	53.1	
9	9	0.03	0.2	0.3	9.1	0.1	4.7	0.001	53.1	
10	10	0.03	0.2	0.3	9.1	0.1	4.7	0.001	53.1	
11	11	0.04	0.3	0.3	14.3	0.2	7.9	0.002	56.4	Bolhas começam a coalescer e formar calotas
12	12	0.04	0.3	0.3	14.3	0.2	7.9	0.002	56.4	
13	13	0.04	0.3	0.3	14.3	0.2	7.9	0.002	56.4	
14	14	0.04	0.3	0.3	14.3	0.2	7.9	0.002	56.4	
15	15	0.04	0.3	0.3	14.3	0.2	7.9	0.002	56.4	

Tabela 4.6. Variáveis e parâmetros adicionais para utilização no processamento dos sinais ultrassônicos.

Nº	FVG	<FVG>	Desv pad. FVG	Vazão ar [lpm]	Vazão óleo [kg/min]	Ponto de injeção			Pressão platafor. [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Pressão intermed. [kgf/cm <sup>2</sup> ]
						Temp óleo [°C]	Temp. Ar [°C]	Pressão óleo [kgf/cm <sup>2</sup> ]		
1	0	0	0	0	3.92	24.0	27.0	2.0	0.0	1.0
2	0									
3	0									
4	0									
5	0									
6	4.5	4.66	0.18	<3	6.5	24.0	22.0	2.0	0.0	1.0
7	5.1									
8	4.6									
9	4.6									
10	4.5									

A Tabela 4.2 mostra as variáveis marcadas como secundárias, como por exemplo, pressões na seção de testes, pressões na seção intermediária e parâmetros ultrassônicos. A Tabela 4.3 mostra os valores absolutos de pressão e temperatura. A Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6 mostram os parâmetros calculados na seção de testes com base na correlação desenvolvida por Dias (1998).

### 4.3. ANÁLISE DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS

Inicialmente os sinais de ultrassom foram estudados a fim de se identificar de que maneira os fenômenos hidrodinâmicos do escoamento apareciam nos sinais. Uma vez que as dimensões da tubulação e dos adaptadores foram as mesmas da montagem experimental simplificada descrita na Seção 3.3, as janelas de atividades dos sinais eram as mesmas. O termo “janela de atividade” se refere ao intervalo de tempo correspondente à passagem da onda longitudinal pelo escoamento multifásico propriamente dito. Estas janelas são a única porção do sinal considerado no processamento dos dados, resultando em um menor esforço computacional. Um exemplo de sinal ultrassônico no sensor a  $180^\circ$  visto na Figura 4.6 corrobora este fato. O pico marcado como “disparo” representa o instante em que o pulso ultrassônico é disparado pelo sensor a  $0^\circ$ . Ao atingir o lado oposto da tubulação, a onda longitudinal gera uma onda transversal que se propaga a uma velocidade inferior à da onda longitudinal (Figura 4.6a). A atenuação acústica foi expressa em termos de razão de energia, ou seja, a razão entre a energia recebida por um sensor em relação a um valor de referência apropriado.

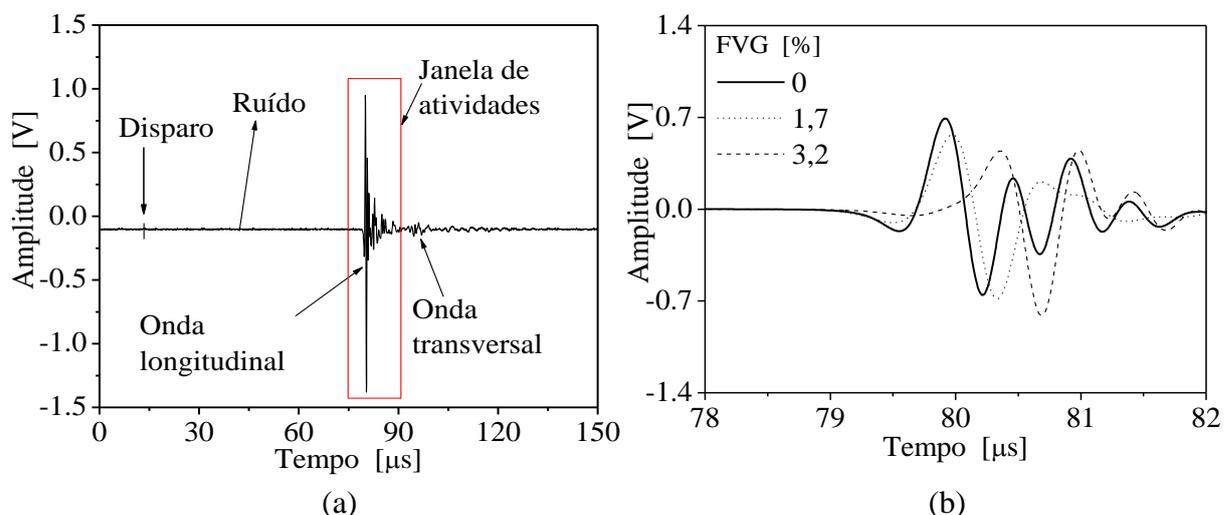


Figura 4.6. a) Sinal típico no sensor a  $180^\circ$  e b) média dos pulsos individuais na janela de atividade para três frações volumétricas de gás em escoamentos bifásicos óleo-ar.

A referência adotada para o sensor a  $0^\circ$  e a  $180^\circ$  foram os sinais para somente óleo preenchendo a tubulação. Nesta condição, chegava a maior quantidade de energia possível nestes dois transdutores. Por outro lado, nesta mesma condição, os sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$  não recebiam quantidades mensuráveis de energia, uma vez que não havia fase dispersa para espalhar o feixe acústico para as laterais. Nos sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$ , a condição adotada como referência correspondia à fração volumétrica de gás que promovia espalhamento máximo do feixe acústico, verificada experimentalmente. Os detalhes sobre a definição das janelas de atividade são descritos no Apêndice B. As expressões para a razão de energia assim definida e para o desvio padrão correspondente são dadas pelas equações descritas na Seção 3.3. Estas equações foram facilmente aplicadas às janelas de atividade dos vários sensores por meio de um código computacional desenvolvido em Matlab®.

#### 4.4. ANÁLISE DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO

O conhecimento dos padrões de escoamento simplificam significativamente a análise e o entendimento dos eventos nos sinais ultrassônicos, facilitando o processamento dos sinais. No circuito com tubulação de uma polegada, buscou-se variar a fração volumétrica de gás (FVG) entre 0 e 85% em passos de aproximadamente 2%. A Figura 4.7 mostra a evolução dos padrões de escoamentos bifásicos óleo-ar nesta tubulação. Para FVG entre 0% e aproximadamente 4%, o escoamento permaneceu no padrão bolhas dispersas (Figura 4.7a); neste ponto iniciou-se a coalescência das bolhas, podendo-se já observar a presença de calotas gasosas para FVG em torno de 4%. A presença simultânea de calotas e bolhas dispersas se manteve até FVG atingir aproximadamente 14% (Figura 4.7b). Para FVG entre 14% e 30%, predominou o escoamento pistonado com interfaces estáveis (Figura 4.7c).

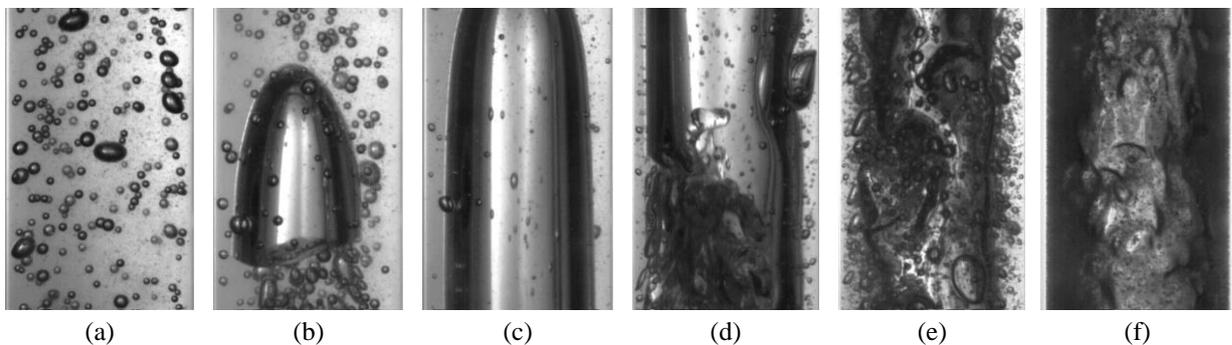


Figura 4.7. Evolução dos padrões de escoamentos bifásicos óleo-ar na tubulação de uma polegada: (a) bolhas dispersas; (b) calotas; (c) pistão estável; (d) pistão instável; (e) agitado e (f) anular.

Entre 30% e 45%, os pistões começaram a se quebrar em bolhas menores e sua superfície tornou-se irregular (Figura 4.7*d*). Para FVG entre 45% e 75%, predominou o escoamento agitado (Figura 4.7*e*) e, acima de 75%, predominou o escoamento anular (Figura 4.7*f*). Nos experimentos com escoamentos trifásicos óleo-ar-sólidos e quadrifásicos óleo-ar-água-sólidos, os padrões de escoamentos observados foram praticamente os mesmos aqui descritos para escoamentos bifásicos óleo-ar.

Na tubulação de duas polegadas, os detalhes do padrão de escoamento tornaram-se mais difíceis de serem observados devido à turbidez do óleo após a emulsificação da água no escoamento. Entretanto, observou-se que as bolhas coalesceram mais facilmente formando pequenas calotas ao longo da tubulação (Figura 4.8*a*). Estas bolhas aumentaram de tamanho até FVG aproximadamente igual a 12% e eram acompanhadas de bolhas menores (1-10 mm) a partir de FVG 6%. Pistões com interfaces estáveis começaram a surgir a partir de FVG 14% e aumentaram de tamanho até FVG aproximadamente 35%, também acompanhados de pequenas bolhas dispersas (1-10 mm). Neste capítulo, são apresentados resultados para os parâmetros acústicos somente no padrão em bolhas e início do pistonado (FVG < 18%).

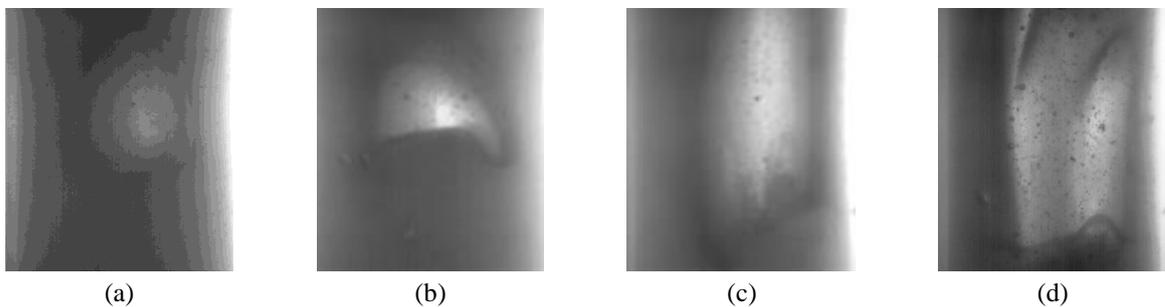


Figura 4.8. Evolução dos padrões de escoamentos bifásicos óleo-ar na tubulação de duas polegadas: (a) calotas médias; (b) calotas grandes; (c) pistão estável e (d) pistão estável.

#### 4.5. CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS E FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE GÁS

Nesta seção, são discutidas as correlações obtidas entre os parâmetros ultrassônicos ‘razão de energia média’ e ‘desvio padrão da razão de energia instantânea’ em função da fração volumétrica de gás (FVG). A Figura 4.9 mostra os dados obtidos para a razão de energia média em função da FVG em escoamentos bifásicos óleo-ar, trifásicos óleo-ar-água e quadrifásicos óleo-ar-água-sólidos na tubulação de duas polegadas. Cada ponto representa a média de cinco amostras e as barras associadas a cada ponto representam um intervalo de confiança de 95%.

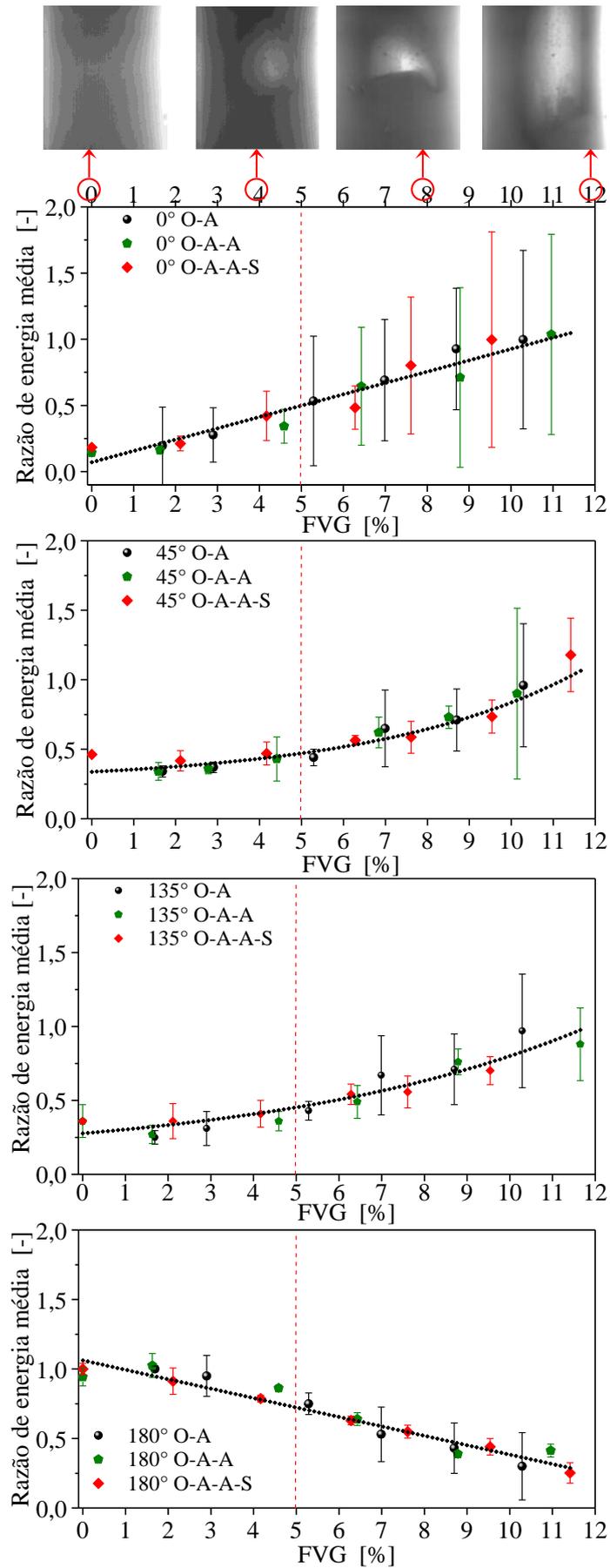


Figura 4.9. Razão de energia média em função da FVG na tubulação de duas polegadas.

Observa-se na Figura 4.9 que a razão de energia aumenta significativamente nos transdutores a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $135^\circ$  com o aumento da FVG no escoamento. No sensor a  $0^\circ$ , este aumento se deve principalmente ao mecanismo de reflexão acústica nas interfaces das bolhas ao passo que, nos sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$  o aumento da energia é causado pelo espalhamento do feixe acústico para as laterais (difração e reflexão). Por outro lado, o sensor a  $180^\circ$  apresenta um decréscimo linear da razão de energia com o aumento da FVG na faixa testada devido também à atenuação crescente do feixe acústico pelos fenômenos de reflexão e espalhamento. A alta transmitância de energia nas interfaces óleo-água e óleo-sólido ( $T \sim 97\%$  e  $T \sim 13\%$ , respectivamente, considerando as interfaces planas) quando comparada à transmitância nula na interface óleo-ar permite concluir que o gás é o parâmetro controlador da atenuação acústica nos vários tipos de escoamento. Logo, é possível medir a FVG mesmo na presença de outras fases dispersas. Observa-se ainda que, antes do início da coalescência das bolhas ( $FVG < 5\%$ ), as barras de erro nos sensores a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $135^\circ$  são relativamente pequenas e não superiores às tendências exibidas pelas médias. Todavia, para  $FVG \geq 6\%$  a coalescência das bolhas aumenta a incerteza da medida nestes sensores devido à forte reflexão do pulso ultrassônico causada por estruturas gasosas de maior tamanho. Isto é, os valores de atenuação acústica para os pulsos individuais se estenderão agora por uma faixa consideravelmente maior. Assim sendo, as tendências exibidas pelas médias nesta região, embora coerentes com o comportamento exibido para  $FVG < 5\%$ , estão contidas dentro do próprio intervalo de incerteza. Não se tem, portanto, confiabilidade estatística das tendências dos dados nesta região. Por outro lado, os intervalos de incerteza no sensor a  $180^\circ$  mantiveram-se relativamente menores em toda a faixa de FVG, confiabilidade estatística à tendência apresentada pelas médias.

Deve-se ressaltar que o procedimento de medida para obtenção dos dados na Figura 4.9 contribui para o aumento do intervalo de incerteza. Para um mesmo valor de FVG, foram utilizados diferentes combinações de vazão de líquido e de gás de uma amostra acústica a outra, tendo a vazão de óleo variado em faixas de 6 kg/min a 20 kg/min. Isto se deu devido à necessidade de aplicação da técnica ultrassônica em uma faixa mais ampla de vazões, sendo esta uma situação mais representativa dos processos da indústria petrolífera. Logo, o padrão de escoamento e, portanto, o tamanho das estruturas gasosas variava ligeiramente de uma amostra a outra, intensificando ou diminuindo o fenômeno de reflexão do feixe acústico. Em vista destes resultados, pode-se então afirmar que a medição da FVG por meio da razão de energia média parece oferecer resultados mais precisos para padrões de escoamento do tipo ‘bolhas dispersas’, ou seja, escoamentos em que as estruturas gasosas ainda são pequenas.

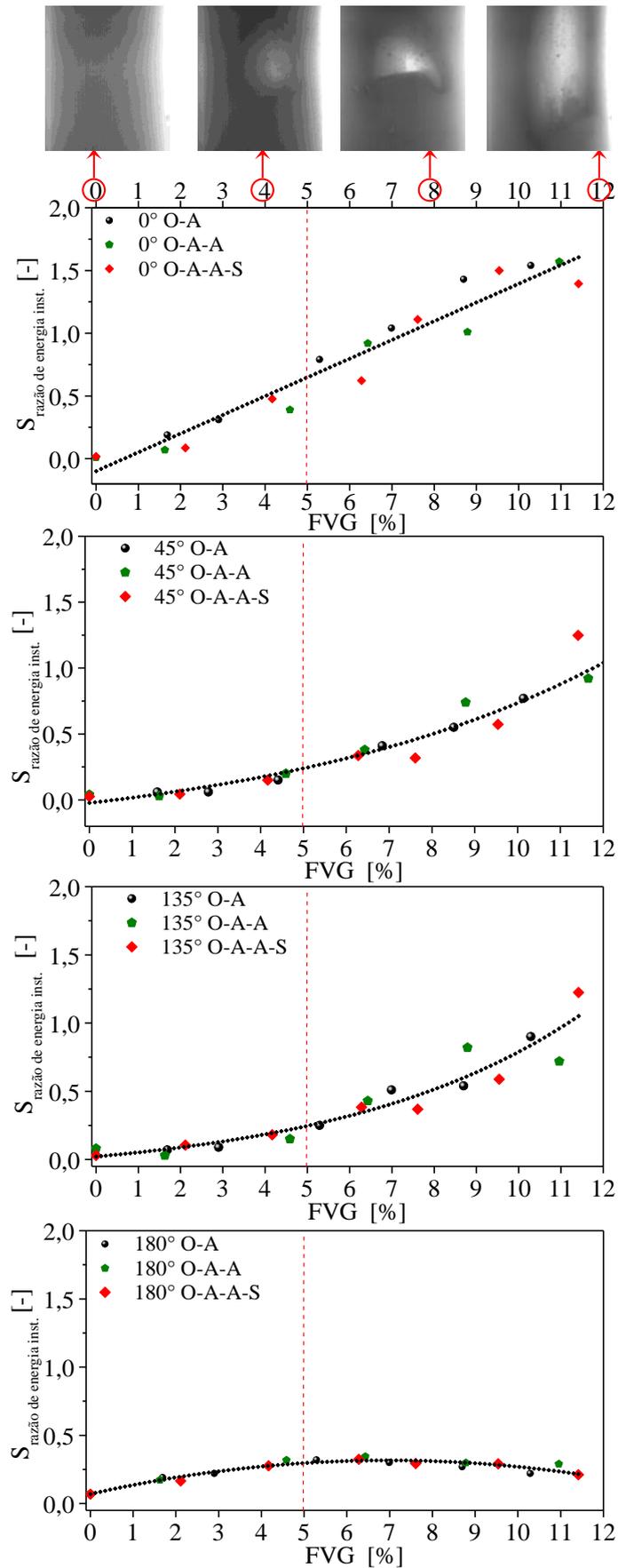


Figura 4.10. Desvio padrão da razão de energia instantânea na tubulação de duas polegadas.

Com relação ao desvio padrão da razão de energia instantânea, observa-se também uma correlação com a FVG nos sensores a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $135^\circ$  (Figura 4.10). A combinação destes dois parâmetros, razão de energia média e desvio padrão da razão de energia instantânea, permite aumentar a confiabilidade da técnica ultrassônica para medir a FVG para baixas concentrações de gás. Por exemplo, comparando os gráficos do desvio padrão e da razão de energia, observa-se que para  $FVG < 6\%$  todos os valores do desvio padrão em todos os sensores ficaram abaixo de 0,5, ao passo que a razão de energia média permaneceu entre 0,5 e 1,0. Logo, uma combinação de alta razão de energia com baixo desvio padrão é uma indicação mais confiável do padrão bolhas dispersas do que cada parâmetro isoladamente.

Para a tubulação de uma polegada, foram também obtidos dados ultrassônicos de razão de energia média e de desvio padrão da razão de energia instantânea em escoamento bifásico óleo-ar, trifásico óleo-ar-sólidos e quadrifásico óleo-ar-água-sólidos. Com relação à razão de energia média (Figura 4.11), os pontos representam a média de cinco amostras e as barras representam o intervalo de confiança de 95%. Houve uma maior dispersão dos dados para este caso quando comparado à tubulação de duas polegadas. Isto se deve ao trajeto acústico mais curto que amplia o efeito do tamanho variável das estruturas gasosas.

Mais uma vez, a mudança das vazões de líquido e de gás para a mesma FVG acarretou um aumento da dispersão dos dados para FVG acima de 10% nos sensores a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $135^\circ$  ao passo que para o sensor a  $180^\circ$  a grande dispersão ocorreu em toda a faixa testada. Observou-se também um aumento do desvio padrão da razão de energia instantânea com o aumento da FVG (Figura 4.12). Permanecem válidas as hipóteses sobre os mecanismos de atenuação, reflexão e espalhamento do feixe acústico descritas para a tubulação de duas polegadas.

A fim de se analisar a influência do diâmetro da tubulação nas correlações, os dados experimentais para a tubulação de uma polegada e de duas polegadas foram superpostos em um único gráfico (Figura 4.13). Observa-se uma tendência à estratificação dos pontos em função do diâmetro. Para os sensores a  $0^\circ$  e a  $180^\circ$ , as razões de energia tendem a ser mais altas para a tubulação de duas polegadas; por outro lado, para os sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$ , elas tendem a ser mais baixas. Este comportamento parece estar de acordo com os mecanismos de dissipação acústica: a seção transversal tende a ser menos obstruída para a tubulação de maior diâmetro, deixando, portanto, o caminho acústico entre os sensores a  $0^\circ$  e  $180^\circ$  mais livre; porém, o espalhamento lateral do feixe acústico na tubulação de maior diâmetro produz intensidades sonoras mais baixas nos sensores a  $0^\circ$  e  $45^\circ$ . A estratificação dos pontos também foi observada nos gráficos para o desvio padrão da razão de energia instantânea (Figura 4.13b).

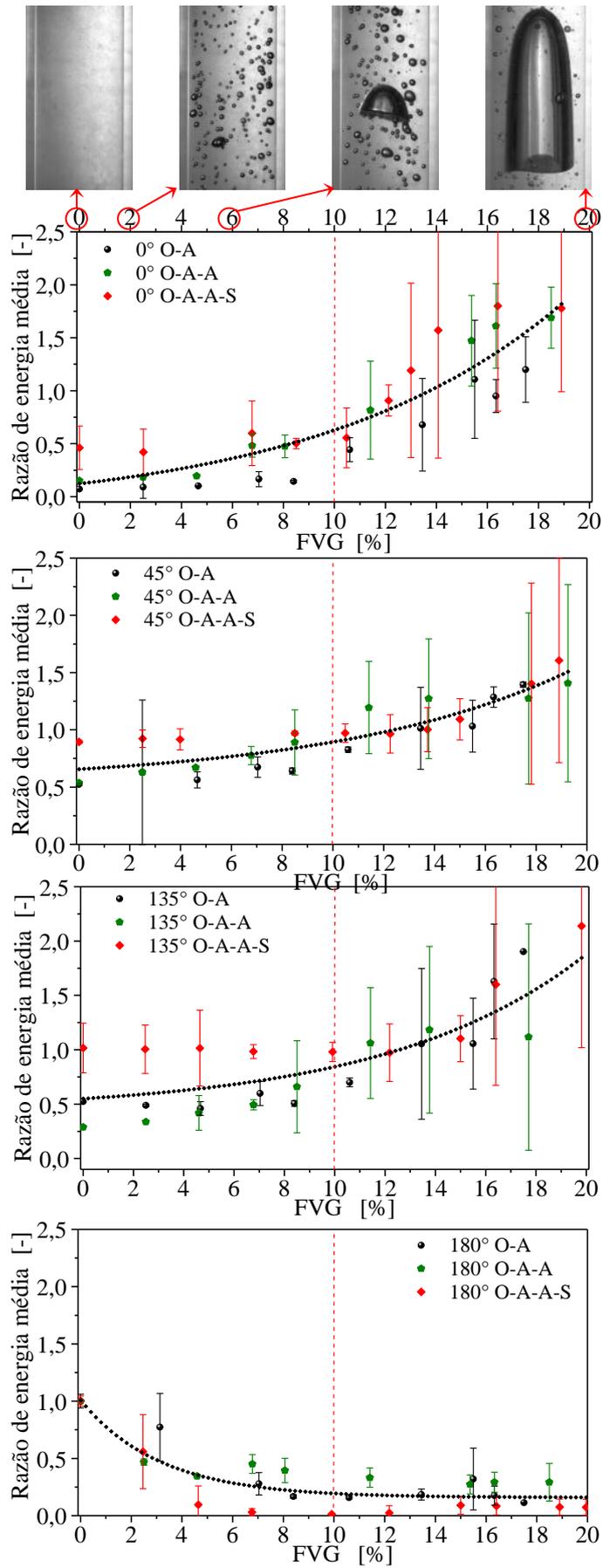


Figura 4.11. Razão de energia média em função da FVG na tubulação de uma polegada.

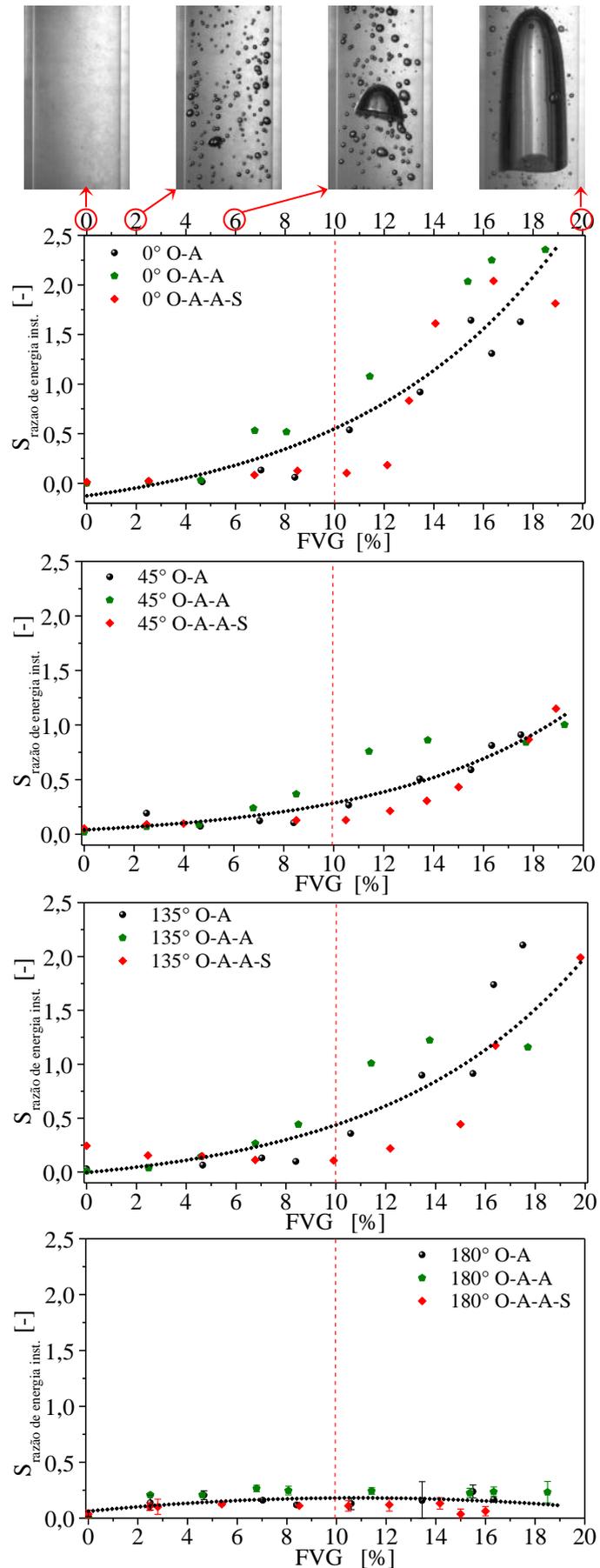


Figura 4.12. Desvio padrão da razão de energia instantânea na tubulação de uma polegada.

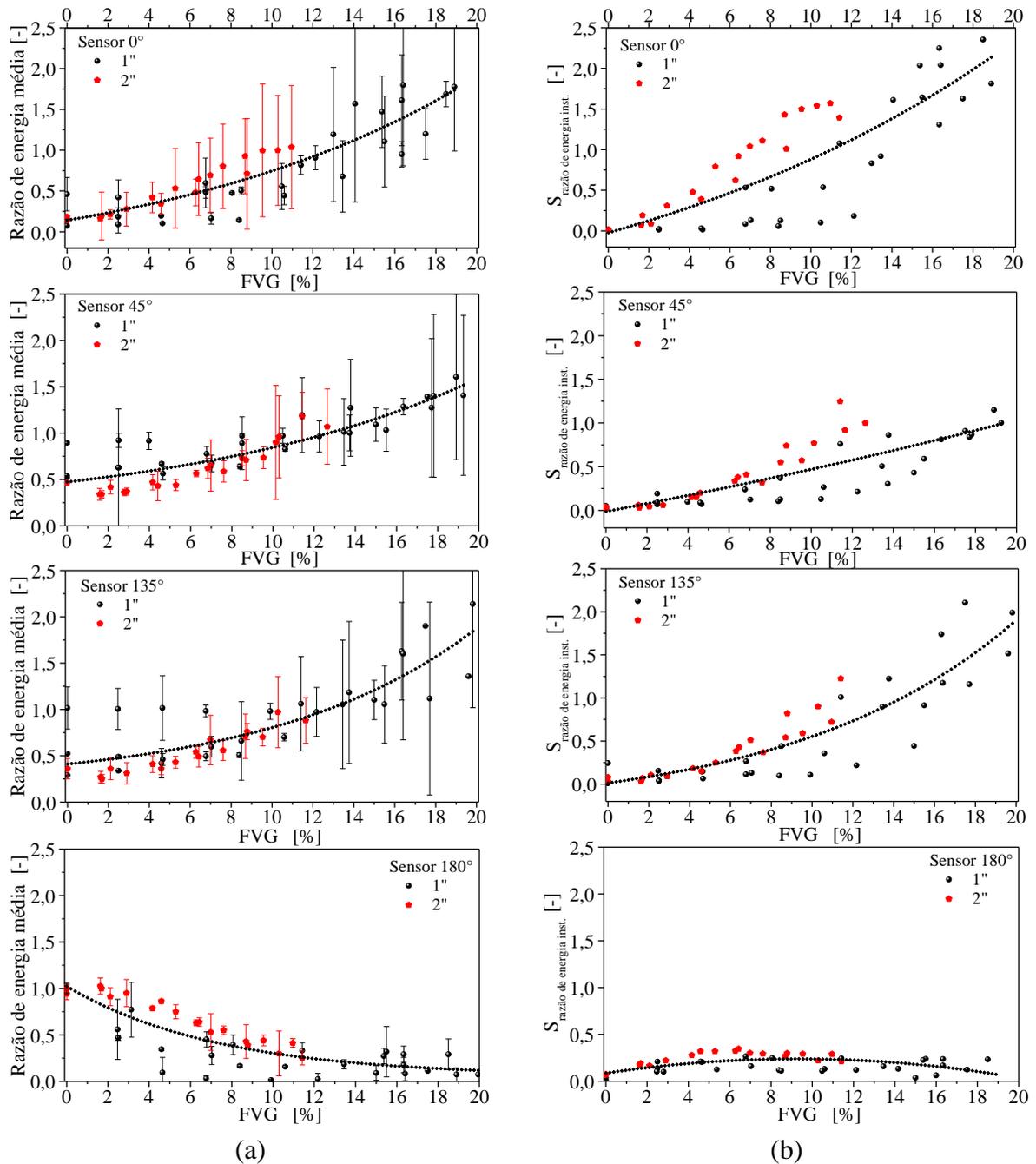


Figura 4.13. (a) Razão de energia média e (b) desvio padrão da razão de energia instantânea nos quatro sensores em tubulação de uma e de duas polegadas.

Tabela 4.7. Coeficiente de determinação  $R^2$  entre os parâmetros ultrassônicos e a FGV para escoamentos bifásicos, trifásicos e quadrifásicos em tubulação de uma e de duas polegadas.

Parâmetros	Sensores			
	0°	45°	135°	180°
Razão de energia média	0,81	0,78	0,80	0,72
Desvio padrão da razão de energia instantânea	0,71	0,76	0,78	0,30

Estes resultados indicam a necessidade de se considerar o diâmetro da tubulação como uma das variáveis de entrada no desenvolvimento da técnica ultrassônica para aplicação em diferentes situações da indústria petrolífera. As curvas de ajuste da razão de energia para todos os pontos combinados (uma e duas polegadas) ainda apresentaram valores aceitáveis de coeficientes de determinação (Tabela 4.7), mantendo-se acima de 0,70 em todos os casos. Para o desvio padrão, exceto para o sensor a 180°, os coeficientes de determinação também se mantiveram em valores superiores a 0,70. Mesmo havendo coeficientes de ajuste razoáveis, a técnica ultrassônica com base na razão de energia média e no desvio padrão da razão de energia instantânea não tem apresentado bom desempenho para a medição da FVG acima de 6%.

Outros estudos estão sendo feitos com base no tempo de trânsito para a medição da FVG, uma vez que este parâmetro ultrassônico tem fornecido resultados promissores (Capítulo 5).

## CAPÍTULO 5

### 5. DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA PARA A MEDIÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE GÁS EM ESCOAMENTOS INTERMITENTES

O desenvolvimento da técnica ultrassônica para padrões intermitentes de escoamentos multifásicos é mais complexo do que para baixas concentrações de gás ( $FVG < 20\%$ ). A própria estrutura dos escoamentos intermitentes requer a introdução do tempo de trânsito da onda sonora como um parâmetro de medida além da atenuação acústica. Neste capítulo, o método de medição ultrassônica das estruturas de escoamentos intermitentes e das vazões das fases individuais desenvolvido por Grangeiro (2010) é aperfeiçoado e ampliado. Grangeiro (2010) se ateve a escoamentos pistonados horizontais água-ar bem definidos e a baixas velocidades; os pistões de líquidos eram pouco aerados e a interface das bolhas alongadas era bastante lisa.

No presente caso, foram tratados dados para escoamentos horizontais água-ar abrangendo uma ampla faixa de velocidades superficiais das fases e padrões de escoamentos intermitentes menos definidos do que o escoamento pistonado propriamente dito. Desta maneira, tornou-se possível evidenciar e solucionar problemas apresentados pela técnica ultrassônica em condições de medição menos favoráveis.

#### 5.1. DESCRIÇÃO DO CIRCUITO HORIZONTAL PARA ESTUDO DE ESCOAMENTOS INTERMITENTES

O circuito de testes de escoamentos intermitentes horizontais (Figura 5.1) está localizado no *Laboratório Experimental de Petróleo Kelsen Valente* da Universidade Estadual de Campinas – LABPETRO-UNICAMP. Este circuito foi construído para operar com fase contínua água ou óleo em escoamentos isotérmicos ou com transferência de calor e possibilita ainda a realização de filmagens ultrarrápidas do escoamento. 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. Uma descrição detalhada deste circuito pode ser vista em Grangeiro (2010). Aqui são enfatizados apenas os aspectos da montagem mais relevantes para a compreensão do desenvolvimento da técnica ultrassônica.

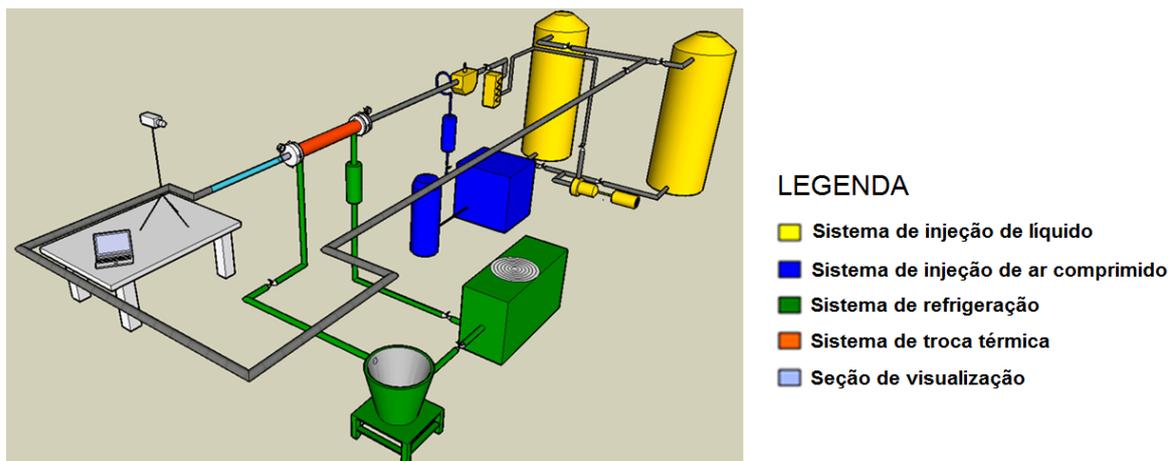


Figura 5.1. Circuito multifásico horizontal com trocador de calor localizado no LABPETRO-UNICAMP.

Fonte: (Grangeiro 2010).

O sistema de injeção de líquido tem a função de armazenar, bombear e aquecer o líquido. Para o armazenamento são usados dois tanques, sendo um de 2 m<sup>3</sup> e outro de 4 m<sup>3</sup>. O líquido é bombeado por uma moto-bomba, controlada por um inversor de frequência, e ao sair, passa pelo trocador de calor (micro controlador, termopares e resistência), e em seguida, pelo medidor Coriolis (*Micromotion*, 0 a 12 kg/s  $\pm$  0,2%) que mede a temperatura e a vazão mássica. Deve-se salientar que, no presente caso, os testes foram realizados somente à temperatura ambiente visto que o objetivo primordial era o desenvolvimento da técnica ultrassônica e não propriamente o estudo dos escoamentos.

O sistema de injeção de ar é alimentado por um compressor de ar rotativo (vazão máxima 349 m<sup>3</sup>/h a 960 kPa) com dois cilindros de 1 m<sup>3</sup> cada. Antes de ser injetado no circuito, o ar tem sua temperatura medida por um termopar tipo 'J' e então flui através de um elemento de fluxo laminar que envia informações de temperatura, pressão e vazão mássica ao sistema de medição que as armazena em computador.

Os dados de temperatura, pressão e vazão foram adquiridos por dois módulos *CompactDAQ* fabricados pela *National Instruments*. As informações foram enviadas a um computador através de um cabo USB e processadas por meio do programa *Labview Signal Express NI*. Para adquirir as imagens, foi utilizada uma filmadora de alta velocidade e resolução, modelo *MotionPro X3*, do fabricante *Redlake*, que opera com uma taxa de aquisição de até 1.000 quadros por segundo em resolução máxima de 1280 x 1024 pixels. O aplicativo *Motion Studio* foi usado para a aquisição e gravação das imagens diretamente no

disco rígido de um computador Sony Vaio, com processador Intel Core 2 Duo T8100 (velocidade de 2.1GHz) e memória RAM de 2GB.

Foram fixadas duas estações de ultrassom na seção de visualização do escoamento cuja tubulação era em acrílico (Figura 5.2 e Figura 5.3). As estações foram distanciadas de 3 cm a fim de se adquirir dados ultrassônicos para a medição da velocidade das bolhas alongadas.

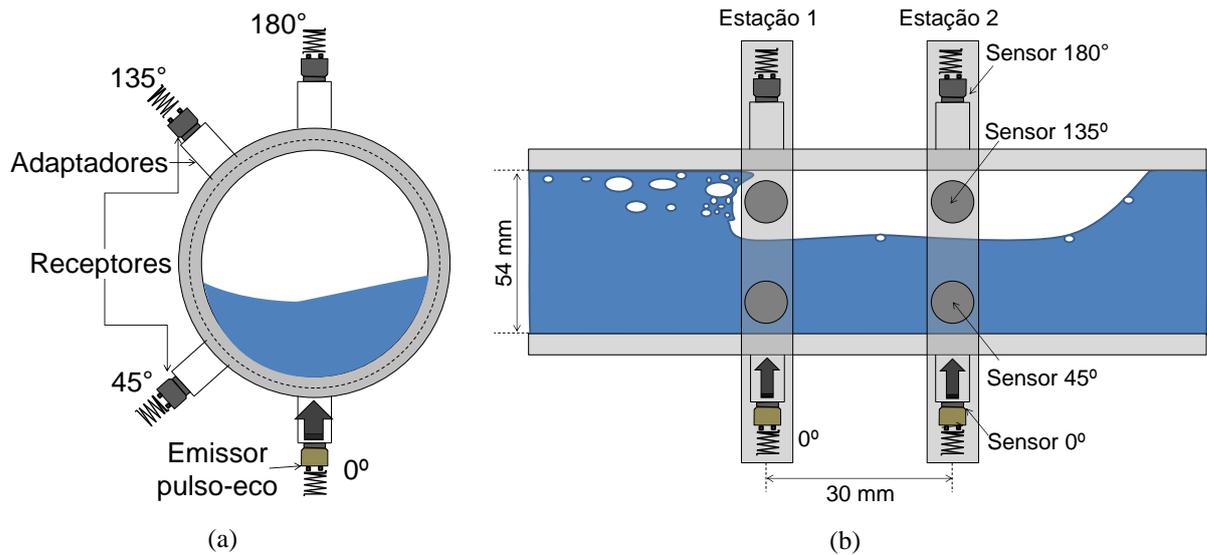


Figura 5.2. Vista esquemática do posicionamento das estações de ultrassom na seção de visualização do escoamento.

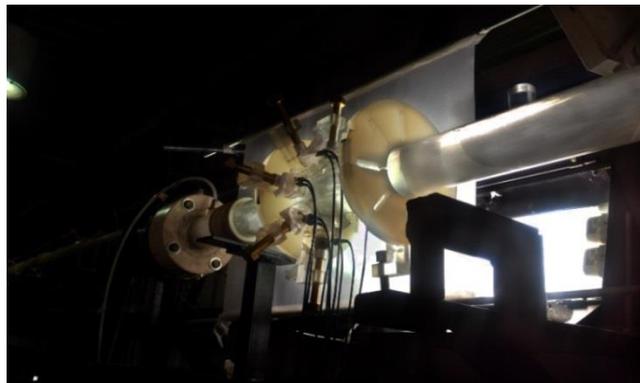


Figura 5.3. Fotografia da seção de testes indicando o posicionamento dos sensores de ultrassom.

## 5.2. PROCEDIMENTOS DE MEDIDA

Para a obtenção dos dados ultrassônicos e de filmagem rápida, foram feitos experimentos com diferentes padrões de escoamento água-ar com base no mapa de Taitel (1976). Os pontos na Figura 5.4 correspondem às condições testadas no circuito do LABPETRO-UNICAMP.

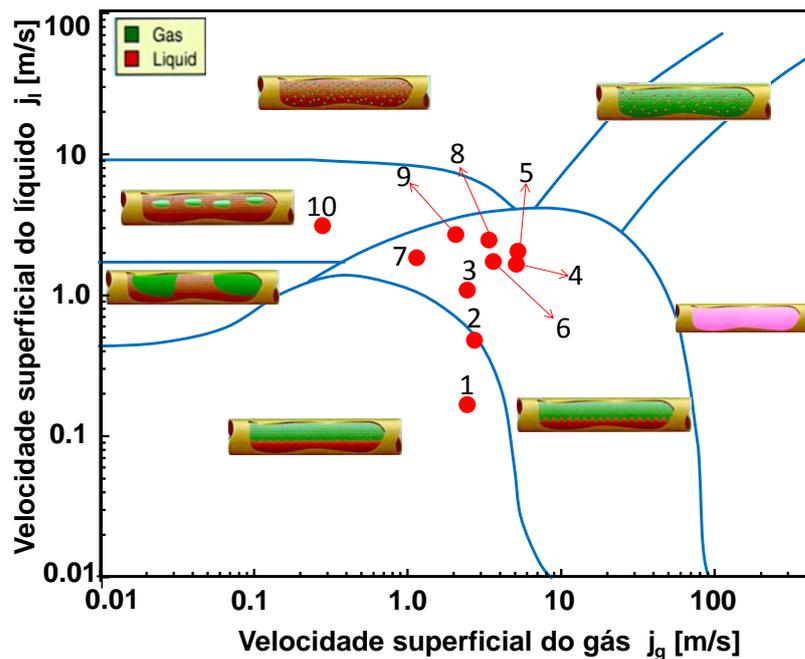
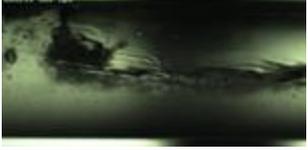
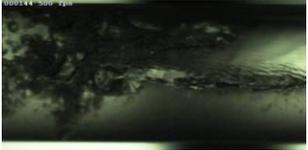
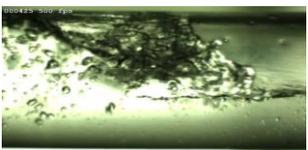
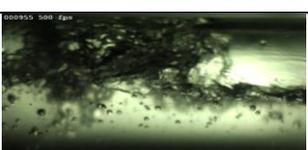
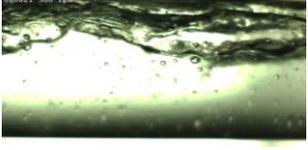
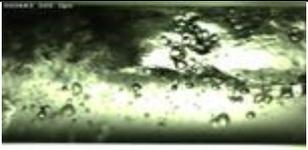
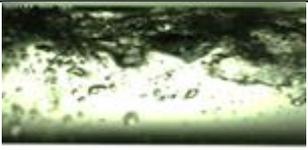
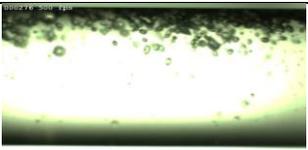


Figura 5.4. Velocidades superficiais medidas pelos medidores monofásicos superpostas no mapa de padrões de Taitel (1976).

Embora a maioria dos pontos no mapa esteja contida na região do padrão estratificado ondulado, os padrões visualizados na seção de testes não ficaram limitados apenas a este padrão. A Tabela 5.1 descreve as principais características dos escoamentos testados, indo desde o padrão tamponado (*plug flow*) até o estratificado, passando pelo pistonado lento, pistonado rápido e algumas transições entre estes padrões. A seleção destes padrões de escoamento (Tabela 5.1) foi guiada pela necessidade de aprimoramento da técnica ultrassônica desenvolvida por Grangeiro (2010) para medição em condições menos favoráveis, como por exemplo, escoamentos rápidos com bolhas de gás curtas e esteira turbulenta e pistões de líquido bem aerados. A ordenação das linhas da tabela corresponde à velocidade crescente da água, pois esta promovia maior turbulência do escoamento, passando do escoamento estratificado ao pistonado e chegando ao padrão bolhas dispersas.

Os dados correspondentes de temperatura, pressão e vazão adquiridos pelos módulos *CompactDAQ* eram enviados a um painel virtual programado em *Labview*®. Este painel permitia a visualização dos dados medidos pelo Coriolis, laminador de ar e medidores de pressão (*Valadine*), como mostra a Figura 5.5.

Tabela 5.1. Velocidades e padrões de escoamentos horizontais na seção de medição.

Amostra	J <sub>água</sub> [m/s]	J <sub>ar</sub> [m/s]	Padrão	Observações	Imagens
#1	0,16	2,23	Transição entre estratificado e tamponado	Presença de pistões de água lentos.	
#2	0,45	2,61	Transição para tamponado	Presença de pequenas bolhas alongadas na parte superior e pistões de líquido mais rápidos e sem bolhas dispersas.	
#3	1,08	2,31	Pistonado	Bolhas alongadas velozes com poucas bolhas dispersas na sua esteira.	
#4	1,47	4,08	Pistonado	Bolhas alongadas velozes com uma quantidade média de bolhas dispersas na sua esteira.	
#5	1,50	4,10	Pistonado	Bolhas alongadas velozes com quantidade média de bolhas na sua esteira. A diferença da amostra anterior se deve à lâmpada de iluminação da filmagem (melhor contraste).	
#6	1,65	2,57	Início do pistonado	Bolhas alongadas velozes após a transição bolhas discretas / pistonado.	
#7	1,79	1,11	Pistonado	Bolhas de ar curtas à alta velocidade, com muitas bolhas dispersas na sua esteira.	
#8	2,51	3,37	Início do pistonado	Bolhas de ar velozes após a transição bolhas discretas / pistonado.	
#9	2,64	2,05	Transição entre pistonado e bolhas discretas	Poucas bolhas alongadas na parte superior, mas muitas bolhas discretas e coalescidas também na parte superior.	
#10	2,82	2,28	Bolhas dispersas	Muitas bolhas discretas na parte superior	

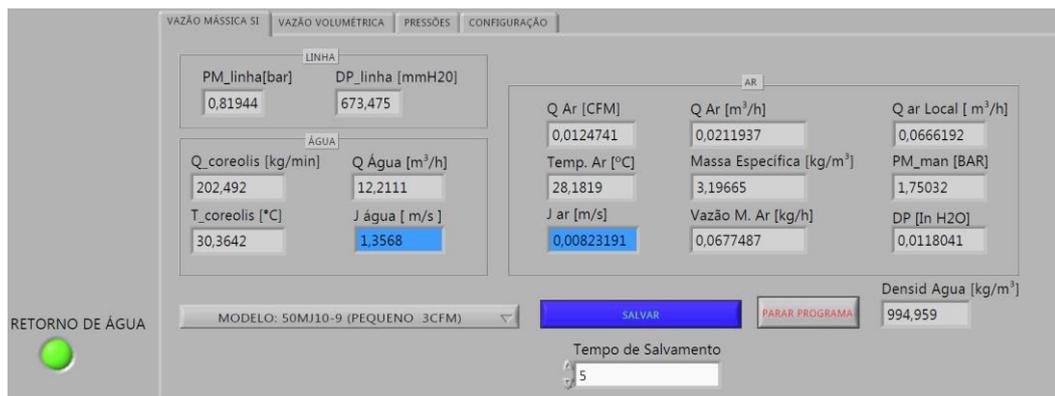


Figura 5.5. Painel virtual de visualização de dados de pressão e vazão dos escoamentos.

Com relação aos parâmetros ultrassônicos, foram adquiridos 30.000 pulsos por amostra de escoamento, correspondendo a 15 segundos de aquisição seguindo as configurações da Tabela 5.2. Foram adquiridas quatro amostras por padrão de escoamento, sincronizadas com filmagens rápidas adquiridas a 500 quadros por segundo. Embora neste circuito a estação ultrassônica tenha sido montada horizontalmente, as dimensões da tubulação, adaptadores e transdutores foram as mesmas da montagem vertical simplificada, mantendo-se, portanto, as mesmas janelas de atividade definidas no Apêndice B.

Tabela 5.2. Parâmetros ultrassônicos utilizados para aquisição das amostras de escoamento.

Frequência aquisição de imagens	Frequência pulsação	Frequência aquisição	Pulsos amostrados	Tempo de amostragem	Amostras por condição
500 fps	2 kHz	20 MHz	30,000	15 s	4

### 5.3. APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO POR GRANGEIRO (2010)

Inicialmente foi feita uma tentativa de medir a FVG e a velocidade destes escoamentos por meio do método proposto por Grangeiro (2010). Foram seguidas as etapas da Figura 5.6, adotando o tempo de trânsito como parâmetro inicial. Este procedimento se divide em quatro passos principais: (1) exclusão dos pontos espúrios que correspondem à perda do sinal original devido às ondulações da interface, (2) criação de um vetor onda quadrada para a distinção entre as regiões das bolhas alongadas e dos pistões de líquido, (3) distinção de partes do sinal em bolhas alongadas e pistões de líquido e (4) cálculo da espessura do filme de líquido. A FVG era obtida por meio da aplicação de uma relação trigonométrica na região da bolha alongada; os pistões de líquido eram considerados não aerados. Maiores detalhes podem ser encontrados na dissertação de mestrado de Grangeiro (2010).

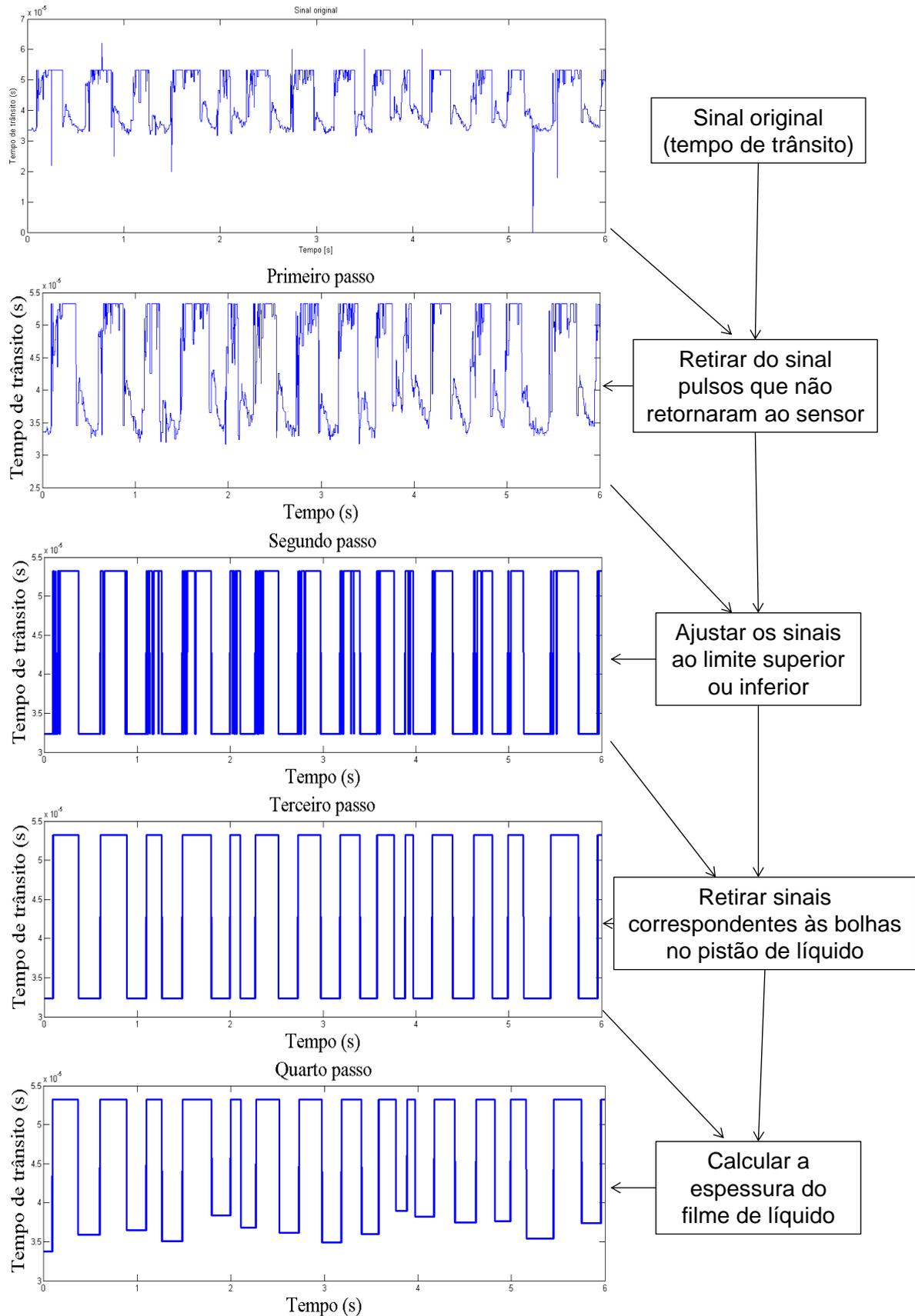


Figura 5.6. Fluxograma para o cálculo da espessura do filme de líquido na região da bolha alongada.

Fonte: Grangeiro (2010).

Antes da aplicação do procedimento de filtragem de Grangeiro (2010) aos presentes dados, foram inicialmente identificadas as estruturas do escoamento nos sinais brutos. A Figura 5.7 ilustra este procedimento mostrando resultados para o parâmetro tempo de trânsito ao longo de 7,5 segundos de aquisição. O gráfico se refere a um escoamento intermitente com bolhas alongadas rápidas e curtas (amostra #5 da Tabela 5.1). Em uma análise comparativa entre os sinais ultrassônicos e as filmagens rápidas, foi possível identificar a passagem das bolhas alongadas e do pistão de líquido em frente ao transdutor a  $0^\circ$ . Em seguida, foram aplicados os demais passos do procedimento de Grangeiro (2010) mostrados na Figura 5.6 às amostras atuais.

Para o caso da amostra #5, a Figura 5.8a mostra a eliminação dos pontos espúrios dos sinais causados pelas irregularidades das interfaces da fase gasosa. Nesta etapa, iguala-se a região do pistão de líquido ao tempo de trânsito correspondente ao topo da tubulação (tempo de ida e volta da onda ultrassônica). Este processo é usado pelo algoritmo para a criação da onda quadrada do próximo passo (segundo passo). Neste caso, conforme mencionado anteriormente, supõe-se não haver bolhas dispersas na região do pistão de líquido, sendo esta hipótese uma fonte de erro significativo quando o pistão de líquido for muito aerado. Aplicando-se o segundo passo (Figura 5.8b), uma onda quadrada é então gerada, zerando os valores de tempo de trânsito na região da bolha alongada; cria-se então um vetor que armazena os pontos de inversão da onda quadrada, caracterizando-se assim as regiões das bolhas alongadas e dos pistões de líquido.

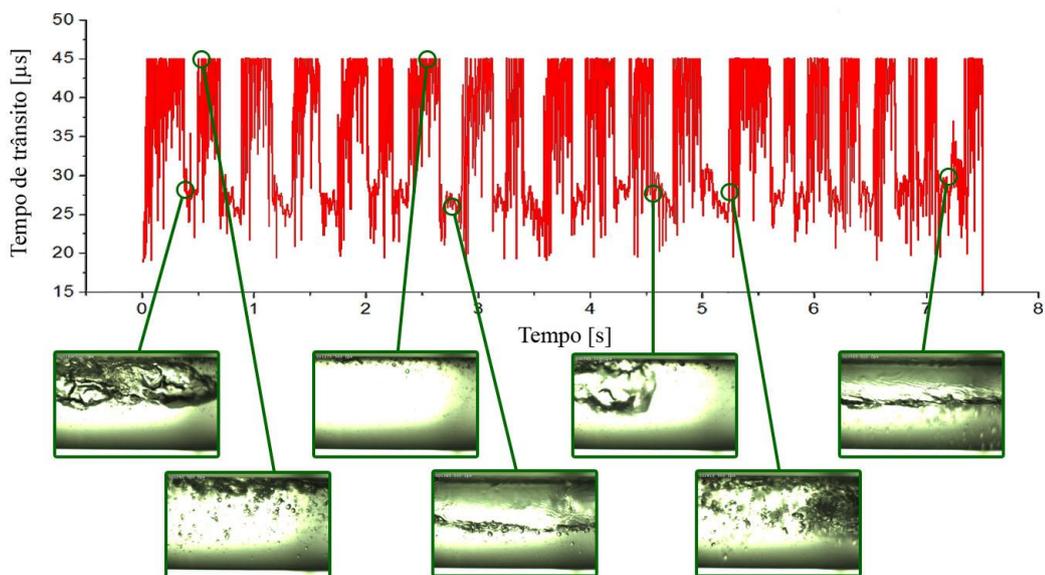


Figura 5.7. Identificação das bolhas de gás pelo parâmetro tempo de trânsito na amostra #5 da Tabela 5.1.

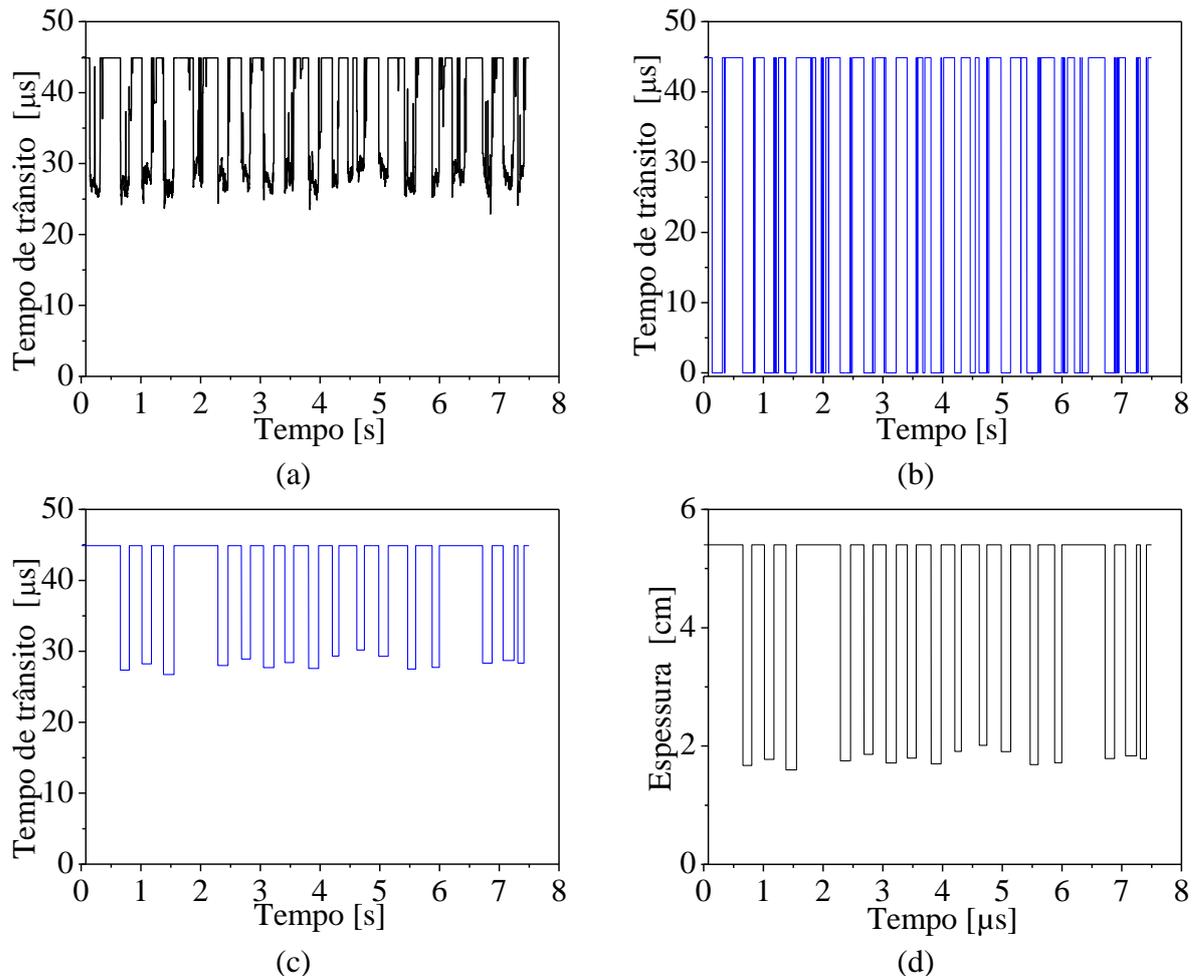


Figura 5.8. Aplicação do método proposto por Grangeiro (2010) para o cálculo da espessura do filme de líquido: (a) exclusão dos pontos espúrios, (b) criação de uma onda quadrada, (c) identificação das bolhas alongadas e dos pistões de líquido e (d) cálculo da espessura do filme de líquido.

No terceiro passo, realiza-se uma média aritmética dos tempos de trânsito entre as inversões da onda (Figura 5.8c). Por fim, calcula-se a espessura do filme de líquido (Figura 5.8d) com base no tempo de trânsito. Mais detalhes do cálculo são mostrados no Anexo B.

Entretanto, para o caso das amostras desta tese, o método apresentou algumas limitações na identificação das estruturas e no cálculo da FVG, conforme mostrado na Figura 5.9. A superposição dos tempos de trânsito e da onda quadrada evidenciou bolhas alongadas não identificadas pelo filtro de Grangeiro (2010) quando aplicado à amostra #5. Pode-se observar que, no intervalo de tempo representado na figura, o programa não conseguiu identificar duas bolhas alongadas. A deficiência apresentada no presente caso se deve principalmente às condições menos favoráveis para a caracterização das bolhas alongadas, como por exemplo, bolhas curtas ( $10 < L_{bolha} < 40$  cm) e escoamento à alta velocidade, quando comparados às condições de Grangeiro (2010), nas quais  $L_{bolha} > 1$  m e escoamentos mais lentos.

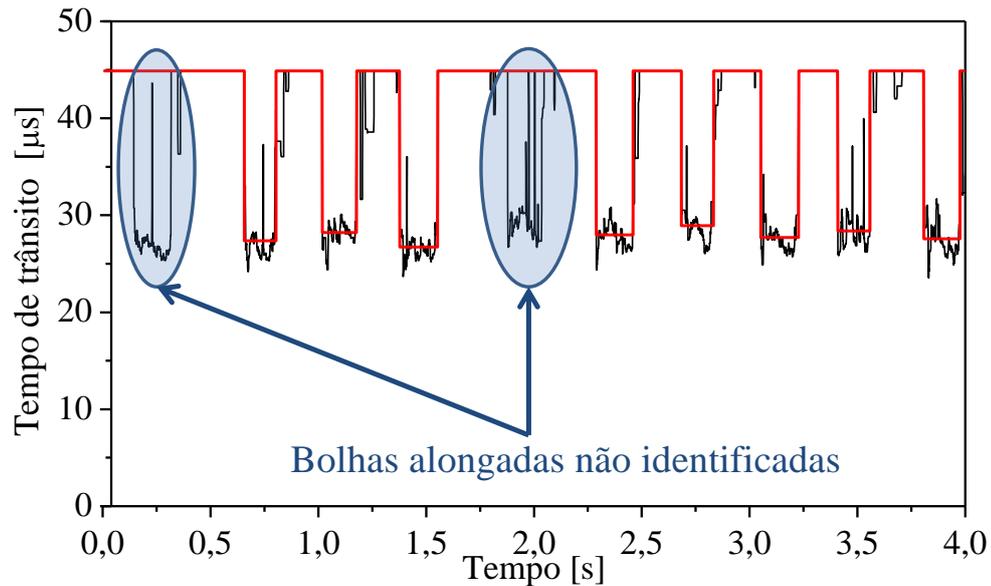


Figura 5.9. Superposição do tempo de trânsito e do sinal filtrado pelo método de Grangeiro (2010) referentes à amostra #5.

A Figura 5.10 mostra duas bolhas alongadas típicas das amostras estudadas ilustrando as superfícies irregulares e pistão de líquido aerado. Visando o desenvolvimento da técnica ultrassônica para escoamentos intermitentes menos favoráveis à caracterização das bolhas, o método desenvolvido por Grangeiro (2010) foi aprimorado. Nas próximas seções são discutidas as etapas e os parâmetros ultrassônicos deste novo método.

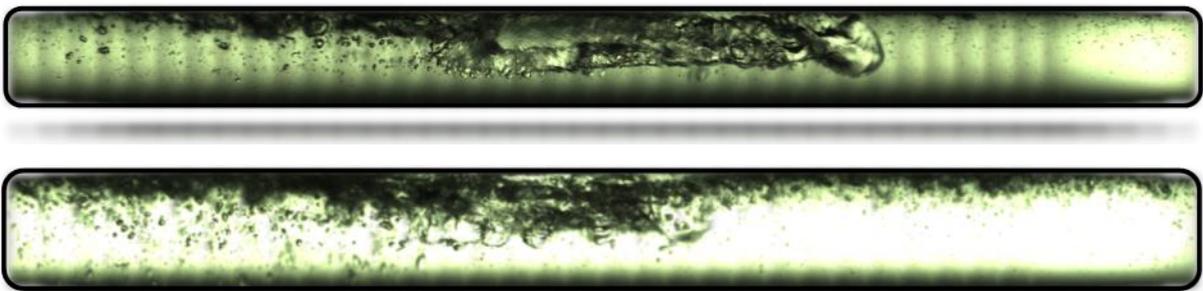


Figura 5.10. Bolhas alongadas com superfícies irregulares típicas das amostras estudadas.

#### 5.4. DESCRIÇÃO DO NOVO MÉTODO DE MEDIÇÃO DA FRAÇÃO DE GÁS EM ESCOAMENTOS INTERMITENTES

O novo método de cálculo da FVG combina os parâmetros tempo de trânsito e atenuação acústica (razão de energia) diretamente no sinal original, não havendo o processo de filtragem por ondas quadradas proposto por Grangeiro (2010). Todavia, o cálculo ainda é

feito distinguindo-se as duas regiões do escoamento intermitente, quais sejam, a região da bolha alongada e a região do pistão de líquido aerado. Na região da bolha alongada, calcula-se a espessura do filme de líquido e obtém-se a  $FVG_{BA}$ . Na região do pistão de líquido aerado, o volume ocupado pelo gás em forma de bolhas dispersas ( $FVG_{BD}$ ) é calculado por meio de uma rede neural artificial (RNA). A  $FVG$  total no escoamento ( $FVG_{total}$ ) é então obtida pelos volumes totais de gás e de líquido e recalculando-se a porcentagem total de gás no escoamento.

Na região da bolha alongada, a área ocupada pelo gás ( $A_{BA}$ ) é obtida por meio do tempo de trânsito, que permite calcular a espessura do filme de líquido. A área ocupada pelo gás é calculada por uma relação trigonométrica desenvolvida por Grangeiro (2010) que, por sua vez, considera-se três situações possíveis: a espessura do filme de líquido ( $efl$ ) ser menor, maior ou igual ao raio da tubulação. Esta espessura é calculada com base na velocidade de propagação da onda longitudinal no fluido ( $v$ ) de acordo com a Equação (5.1). O número 2 no denominador se deve ao trajeto de ida e volta da onda acústica no filme de líquido. A dedução das equações trigonométricas para a obtenção da  $efl$  se encontra no Anexo B e em Grangeiro (2010).

$$efl = \frac{v \times tempo\_transito}{2} \quad (5.1)$$

Por fim, a fração de gás no escoamento correspondente às bolhas alongadas é obtida por meio da média aritmética das áreas individuais, isto é,

$$FVG_{BA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AG_{BAi} \quad (5.2)$$

onde  $N$  é o número de pulsos ultrassônicos disparados no escoamento ao longo do intervalo de amostragem e  $AG$  corresponde à área transversal ocupada pelo gás na seção do escoamento em que o pulso  $N_i$  foi disparado.

Com relação à medida da fração de gás dispersa no pistão de líquido ( $FVG_{BD}$ ), foi desenvolvida uma rede neural artificial (RNA) especificamente para este fim. Esta rede opera com base nos dados de razão energia obtidos na região do pistão de líquido aerado. Nesta região específica do escoamento intermitente, considera-se o padrão de escoamento como bolhas dispersas.

Com relação à arquitetura da RNA, foi projetada uma rede do tipo alimentação progressiva (*feedforward*) de múltiplas camadas (*multilayers perceptron*). Foi usada uma camada intermediária composta por quatro neurônios (Figura 5.11) e, nas camadas de entrada e saída, foram usados 12 e 4 neurônios, respectivamente. As funções de ativação dos neurônios na camada de entrada e na camada oculta foram *tansig* e *logsig*, respectivamente (Figura 5.12) pelo fato de terem apresentados melhores resultados.

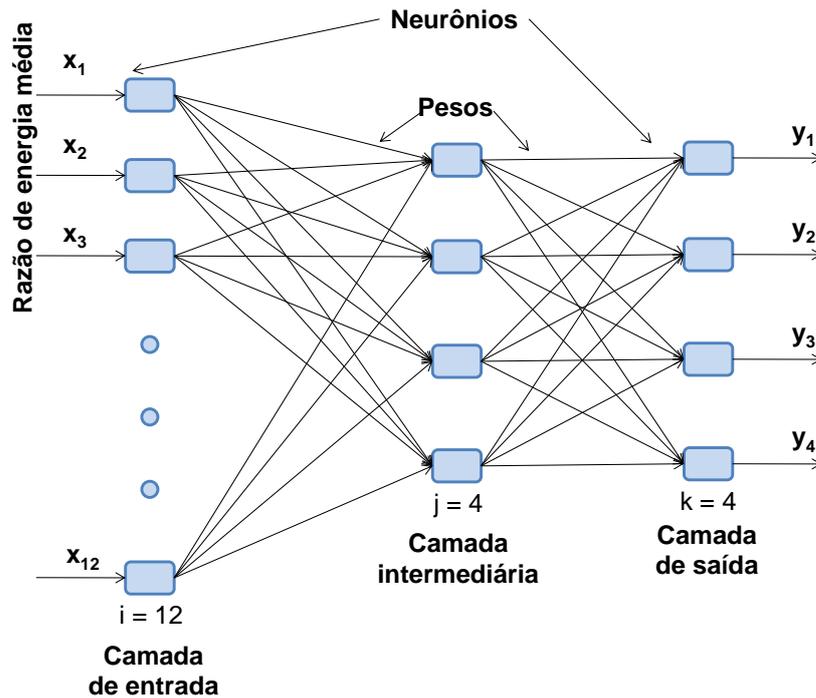


Figura 5.11. Arquiteturas da RNA utilizada para medir a FVG na região do pistão de líquido aerado.

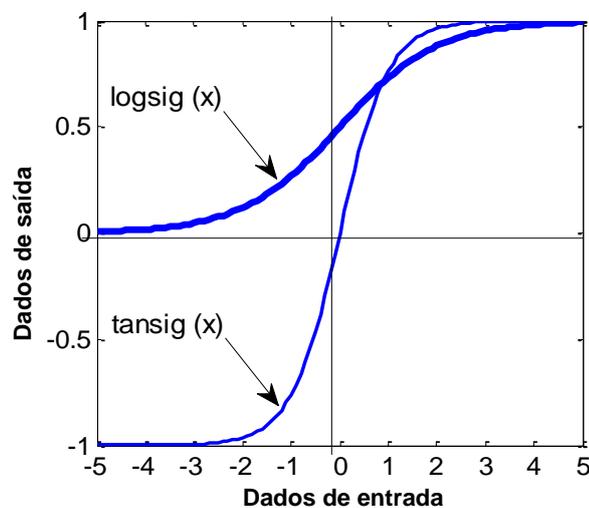


Figura 5.12. Funções de ativação dos neurônios na primeira camada e na camada oculta da RNA.

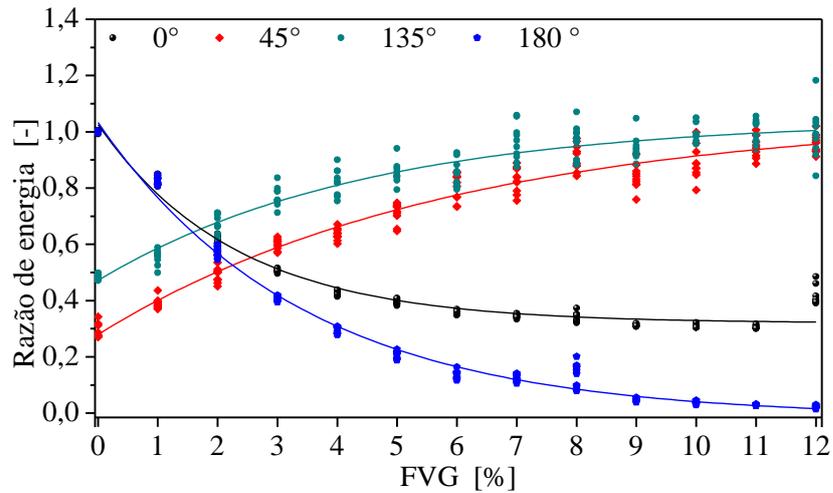


Figura 5.13. Dados de razão de energia em função da fração volumétrica de gás utilizados para o treinamento e validação da RNA.

Fonte: Dados reproduzidos de Tanahashi (2010b).

Com relação ao treinamento da RNA, os dados de atenuação acústica (razão de energia) utilizados como dados de entrada foram retirados de Tanahashi (2010b), reproduzidos na Figura 5.13. Estes dados foram obtidos para escoamentos bifásicos água-ar em um circuito vertical com tubulação de duas polegadas. Foram obtidas dez amostras de ultrassom para cada valor nominal de FVG. A boa correlação entre os dados de atenuação acústica e a FVG nos quatro sensores verificadas por Tanahashi (2010b) fundamentou a escolha da razão de energia como dados de entrada na RNA.

A Figura 5.14 mostra o desempenho da rede durante o processo de validação e teste dos dados. Foram realizadas 30 repetições para cada FVG para fins de avaliação da reprodutibilidade da rede. Observa-se que as tendências das curvas de ajuste dos valores previstos para os quatro sensores se aproximam daquelas da Figura 5.13. Desta forma, no procedimento atual, a  $FVG_{BD}$  na região do pistão de líquido aerado foi obtida com base neste treinamento. A razão de energia média nesta região foi calculada e fornecida como dado de entrada à RNA que, por sua vez, forneceu a  $FVG_{BD}$ .

Por fim, a FVG total no escoamento ( $FVG_{total}$ ) foi obtida por meio da soma da  $FVG_{BD}$  na região do pistão de líquido, obtida pela RNA, com a  $FVG_{BA}$  na região da bolha alongada, obtida pelo tempo de trânsito, conforme mostrado na Equação (5.3).

$$FVG_{total} = \frac{\sum_{i=1}^N FVG_{BDi} \cdot L_{PLi} + \sum_{i=1}^M FVG_{BAi} \cdot L_{BAi}}{L} \quad (5.3)$$

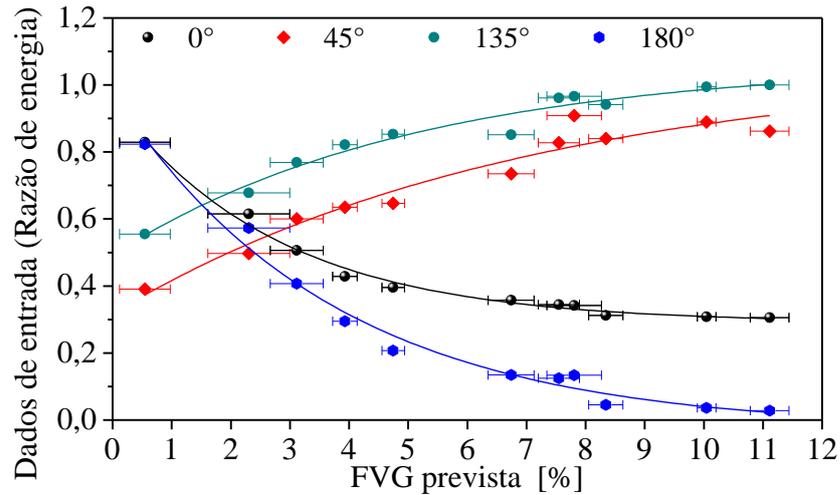


Figura 5.14. Valores de FVG previstos pela RNA durante o processo de validação e teste.

Na Equação (5.3)  $N$  representa o número de pulsos ultrassônicos que atinge o pistão de líquido aerado e  $M$  os pulsos que atingem a bolha alongada,  $L$  representa o deslocamento do escoamento durante o tempo de amostragem,  $L_{PL}$  o comprimento dos pistões de líquido e  $L_{BA}$  o comprimento das bolhas alongadas. O esquema mostrado na Figura 5.15 representa as regiões do escoamento onde os procedimentos de cálculo são aplicados. Este aprimoramento do método de Grangeiro (2010) para as presentes amostras permitiu um cálculo mais preciso da FVG para toda a célula unitária; além disso, o algoritmo não deixou de identificar a passagem de bolhas alongadas.

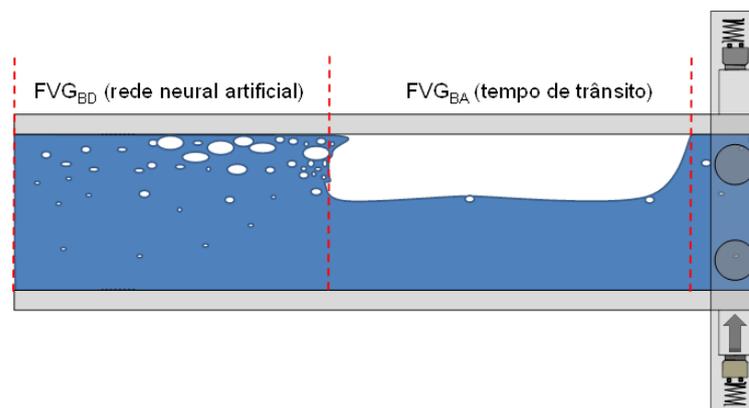


Figura 5.15. Esquema indicando o procedimento de cálculo da FVG no escoamento.

## 5.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a obtenção dos sinais de tempo de trânsito, o algoritmo utiliza um limiar de voltagem como marcador para identificar a passagem das bolhas alongadas em frente ao sensor a  $0^\circ$ . A Figura 5.16 mostra 15.000 pulsos superpostos indicando a atividade causada pela passagens de bolhas alongadas em frente ao sensor a  $0^\circ$ .

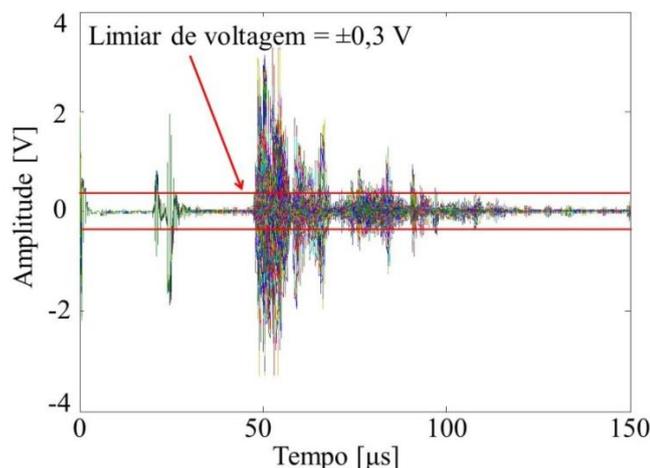


Figura 5.16. Pulsos superpostos indicando o limiar de voltagem usado pelo algoritmo.

Entretanto, este valor pode mudar em virtude das condições experimentais como, por exemplo, presença de ruídos elétricos, espessura e material da tubulação, fluido utilizado como fase contínua, dimensões do adaptador em frente ao sensor e outros. Estas condições também podem influenciar nos valores de razão de energia obtidos pelos sensores, havendo a necessidade de se definir as janelas de atividade e de se aferir a técnica para uma dada condição experimental. No caso destes testes, foram adotadas as janelas de atividade e aparato ultrassônico descritos no Apêndice B.

A sincronização das imagens com os parâmetros ultrassônicos tempo de trânsito e razão de energia possibilitou um estudo detalhado das estruturas dos escoamentos para os diversos padrões. A Figura 5.17 mostra o tempo de trânsito e a razão de energia para a condição entre o padrão estratificado e o tamponado, amostra #1 da Tabela 5.1. Observou-se uma boa concordância entre estes parâmetros no que diz respeito à identificação das estruturas gasosas e do padrão do escoamento. Foi assim possível distinguir de maneira confiável as bolhas alongadas dos pistões de líquido. Na região de estratificação, o tempo de trânsito diminuiu monotonicamente com a redução da espessura do filme de líquido. Neste mesmo trecho estratificado, a razão de energia permaneceu alta devido à reflexão do feixe ultrassônico pela bolha alongada. Quando o escoamento passou do padrão estratificado para o tamponado, ocorreu um aumento do tempo de trânsito e uma redução da razão de energia, conforme era de se esperar. Com relação ao desempenho do método nesta amostra, a sincronização das filmagens com o ultrassom demonstrou uma boa eficiência do algoritmo.

Com relação ao escoamento intermitente pistonado, a Figura 5.18 mostra os sinais ultrassônicos obtidos na amostra #3, para a qual havia a presença de bolhas alongadas rápidas e poucas bolhas dispersas no pistão de água.

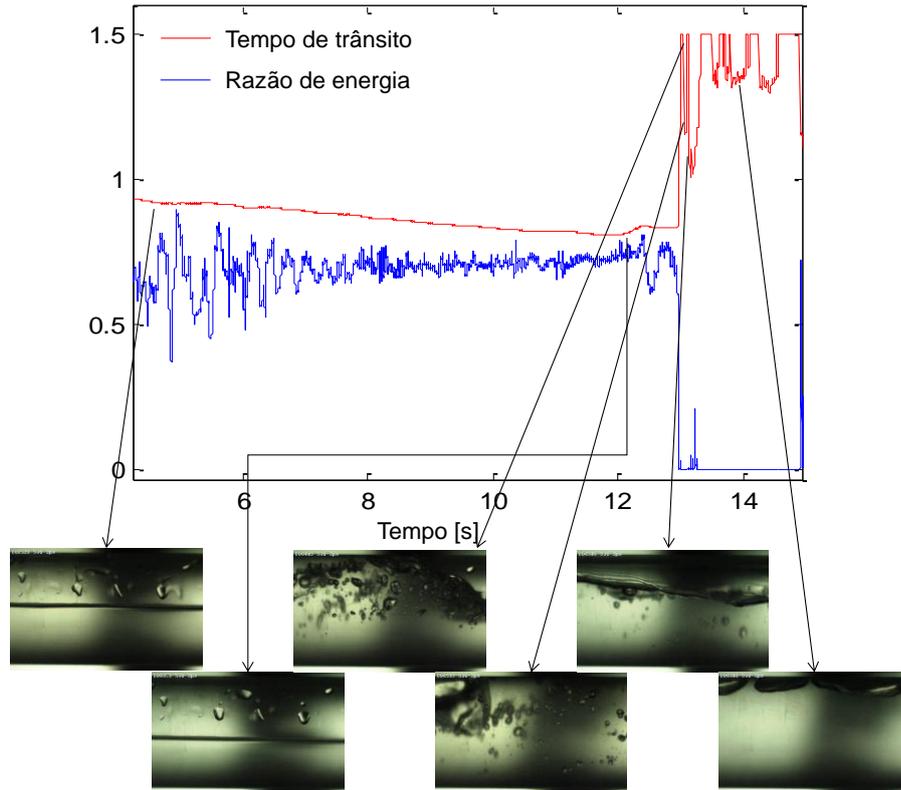


Figura 5.17. Tempo de trânsito e razão de energia para o escoamento na transição entre o padrão estratificado e o tamponado, referente à amostra #1.

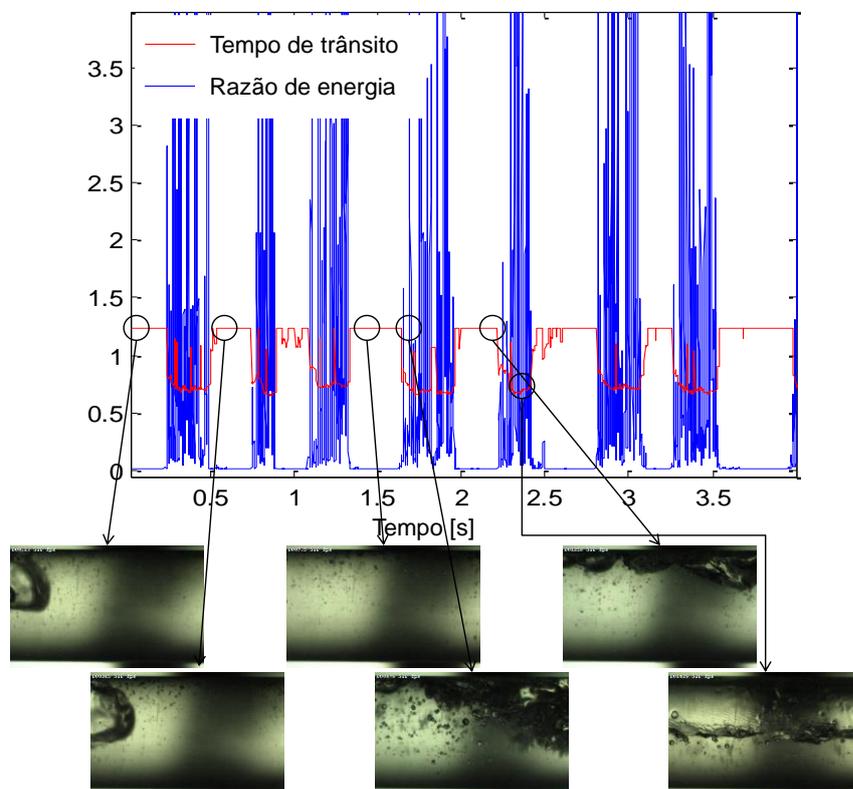


Figura 5.18. Tempo de trânsito e razão de energia para escoamento no padrão intermitente pistonado referente à amostra #3.

Embora neste caso as condições para caracterização das bolhas alongadas fossem menos favoráveis do que no caso de Grangeiro (2010), foi possível identificar as estruturas do escoamento. As filmagens indicaram que houve uma boa correspondência entre os parâmetros tempo de trânsito e razão de energia, aumentando-se assim a confiabilidade da aplicação do método.

Para o padrão intermitente pistonado referente à amostra #5, na região do pistão de líquido aerado, havia uma quantidade de bolhas dispersas maior do que na mesma região da amostra #3 (Figura 5.19). Nesta condição, foi observada uma boa concordância entre os parâmetros tempo de trânsito e razão de energia no que diz respeito à identificação das estruturas gasosas do escoamento.

Por fim, a Figura 5.20 mostra o resultado para a condição de bolhas de gás curtas e rápidas e muitas bolhas dispersas no pistão de líquido. A quantidade de bolhas dispersas foi superior àquelas das amostras citadas anteriormente. Esta condição corresponde à amostra #9 e caracteriza-se pela transição entre o padrão intermitente pistonado e o padrão bolhas dispersas. Observa-se que às vezes a parcela do sinal referente à bolha de gás alongada se confunde com a parcela do líquido altamente aerado. O método proposto para a identificação das estruturas não apresentou um desempenho tão bom quanto nos demais casos estudados. Uma sugestão para a melhoria do método nestas condições seria aumentar a taxa de emissão de pulsos, uma vez que o escoamento encontra-se a uma velocidade superior aos outros casos. Entretanto, há restrições ao aumento da taxa de pulsação devido ao aquecimento excessivo do transdutor pulso-eco. Deve-se, por conseguinte, verificar junto ao fabricante do equipamento a exequibilidade desta medida.

Os resultados da FVG obtidos pela aplicação dos cálculos com o tempo de trânsito na região da bolha alongada e da RNA na região do pistão de líquido são mostrados na Tabela 5.3 O cálculo da FVG tanto pelo tempo de trânsito quanto pela RNA mostraram-se condizentes com as imagens das filmagens rápidas. Além da correspondência com as imagens, observou-se na Figura 5.21 que a FVG obtida pelo presente método ultrassônico está dentro da faixa de erro de 15% dos modelos matemáticos de Rouhani e Axelsson (1970), Premoli *et al.* (1971) e Huq e Loth (1992).

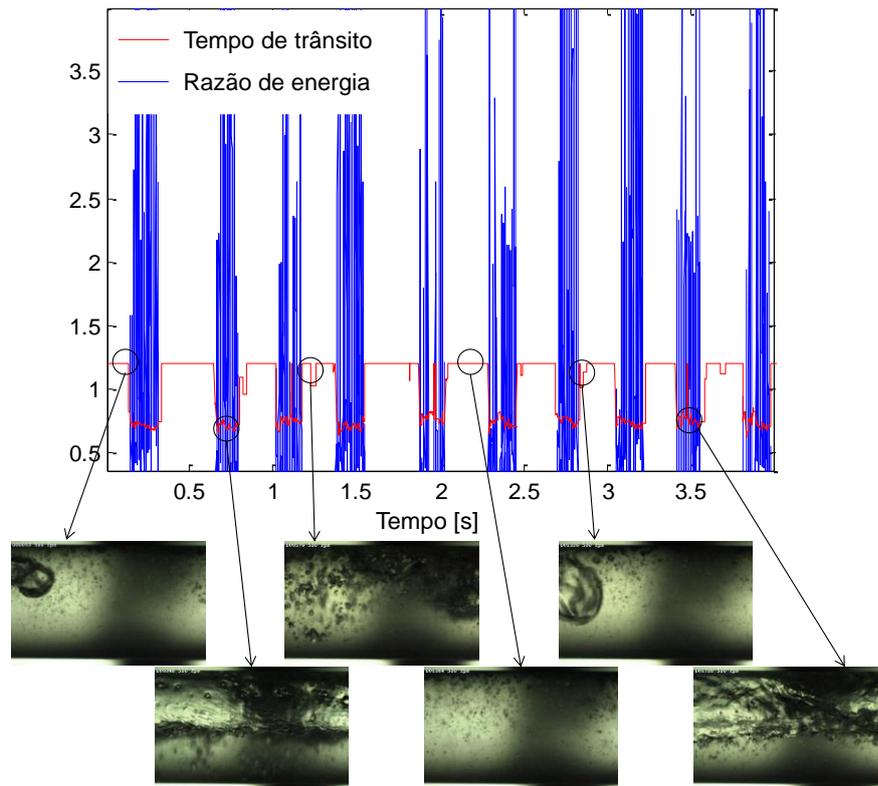


Figura 5.19. Tempo de trânsito e razão de energia para escoamento no padrão intermitente pistonado, referente à amostra #5.

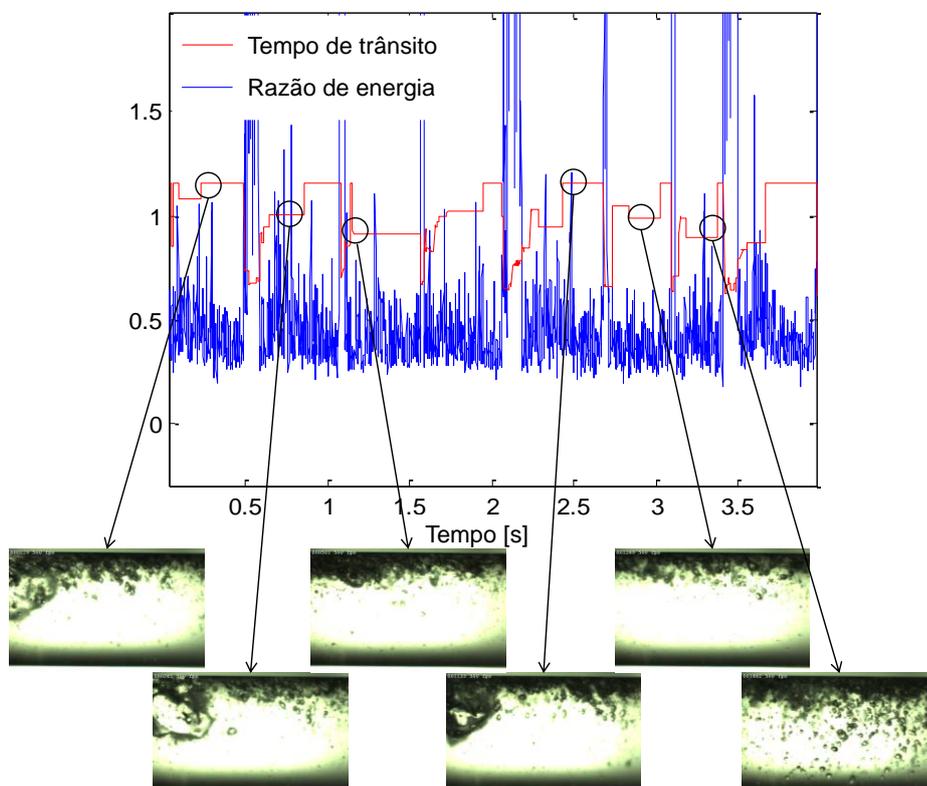


Figura 5.20. Tempo de trânsito e razão de energia para escoamento na transição entre o padrão intermitente pistonado e o bolhas dispersas, amostra #9.

Tabela 5.3. Resultados obtidos para o cálculo da fração volumétrica de gás em diferentes padrões de escoamento.

Nº	Características do escoamento	FGB <sub>BA</sub> [%]	FVD <sub>BD</sub> [%]	FVG <sub>total</sub> [%]
1	Transição entre estratificado e tamponado sem bolhas dispersas	33,0	2,7	35,7
2		50,0	2,7	52,7
3		53,0	1,9	54,9
4		55,0	1,8	56,8
5	Transição entre estratificado e pistonado sem bolhas dispersas	45,0	1,1	46,1
6		49,0	2,6	51,6
7		45,0	2,4	47,4
8		48,0	2,6	50,6
9	Transição entre estratificado e pistonado com poucas bolhas dispersas	29,0	3,1	32,1
10		30,0	4,0	34,0
11		30,0	3,2	33,2
12		29,0	4,0	33,0
13	Pistonado com bolhas longas e lentas e bolhas dispersas	25,0	5,6	30,6
14	Pistonado com bolhas longas e lentas e bolhas dispersas	25,0	5,0	30,0
15	Pistonado com bolhas longas e lentas e bolhas dispersas	24,0	4,0	28,0
16	Pistonado com bolhas longas e lentas e bolhas dispersas	24,0	4,5	28,5
17	Pistonado com bolhas médias e rápidas acompanhadas de poucas bolhas dispersas	25,0	3,1	28,1
18	Pistonado com bolhas médias e rápidas acompanhadas de poucas bolhas dispersas	13,0	3,8	16,8
19	Pistonado com bolhas médias e rápidas acompanhadas de poucas bolhas dispersas	13,0	4,1	17,1
20	Pistonado com bolhas médias e rápidas acompanhadas de poucas bolhas dispersas	13,0	2,4	15,4
21	Pistonado com bolhas médias e rápidas acompanhadas de poucas bolhas dispersas	14,0	3,7	17,7
22	Muitas bolhas dispersas na parte superior	2,0	4,8	6,8
23	Muitas bolhas dispersas na parte superior	2,0	7,1	9,1
24	Muitas bolhas dispersas na parte superior	2,0	6,4	8,4
25	Muitas bolhas dispersas na parte superior	2,0	5,1	7,1
26	Transição entre bolhas dispersas e pistonado	21,0	7,3	28,3
27	Transição entre bolhas dispersas e pistonado	22,0	7,3	29,3
28	Transição entre bolhas dispersas e pistonado	23,0	6,5	29,5
29	Transição entre bolhas dispersas e pistonado	19,0	6,4	25,4
30	Bolhas alongadas muito rápidas acompanhadas de muitas bolhas dispersas	37,0	6,6	42,6
31	Bolhas alongadas muito rápidas acompanhadas de muitas bolhas dispersas	38,0	6,2	44,2
32	Bolhas alongadas muito rápidas acompanhadas de muitas bolhas dispersas	39,0	6,5	45,5
33	Bolhas alongadas muito rápidas acompanhadas de muitas bolhas dispersas	40,0	6,7	46,7

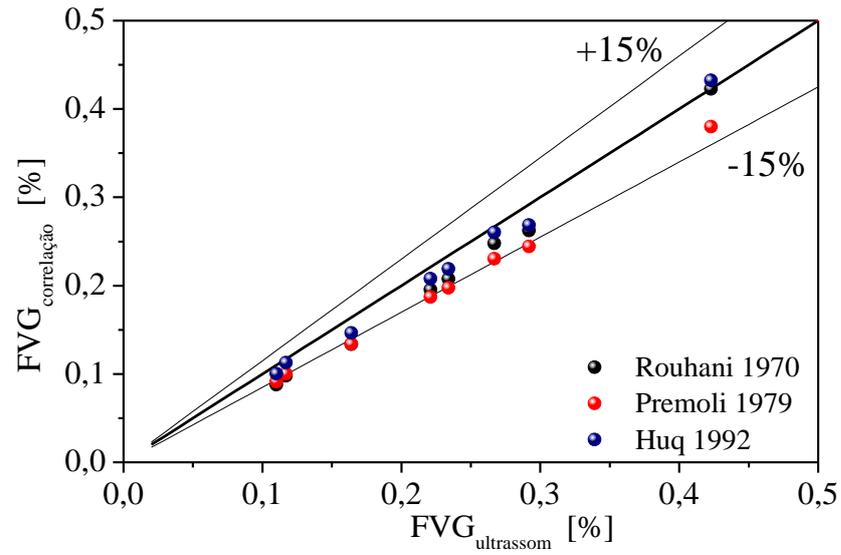


Figura 5.21. Comparação entre as frações de gás obtidas por correlações de modelos matemáticos e pela técnica ultrassônica.

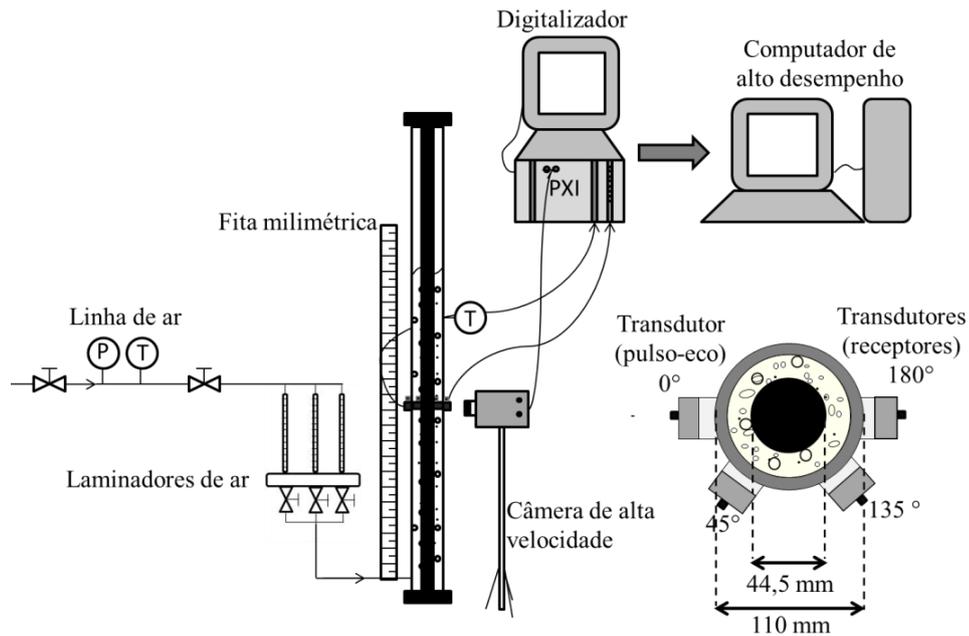
## **CAPÍTULO 6**

### **6. DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA PARA MONITORAMENTO DO ESCOAMENTO NA ENTRADA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA SUBMERSÍVEL**

A presença de gás na entrada de bombas centrífugas submersíveis (BCS) reduz significativamente seu desempenho, sendo necessário o controle e medição destas concentrações na entrada da bomba. Neste sentido, foi feito um estudo da possibilidade de aplicação da técnica ultrassônica para medir a FVG na entrada de uma bomba centrífuga submersível (BCS). Mais precisamente, foi feita uma investigação preliminar da possível correlação entre fenômenos acústicos e hidrodinâmicos para uma mistura bifásica líquido-gás em uma geometria próxima daquela da entrada de uma BCS. Posteriormente, foi feita uma tentativa de tomada de medidas ultrassônicas na entrada da bomba de um conjunto BCS horizontal existente no LABPETRO-UNICAMP.

#### **6.1. DESCRIÇÃO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL**

Inicialmente foi usada uma montagem experimental simplificada devido à facilidade operacional. Este experimento simplificado simula a entrada de uma BCS modelo J350N, do fabricante Schlumberger, que possui um eixo central de transmissão de torque no interior de uma carcaça metálica. A montagem simplificada foi, portanto, projetada de modo a reproduzir este espaço anular e, ao mesmo tempo, permitir a visualização do escoamento (Figura 6.1). Uma barra circular maciça de aço 1020, com diâmetro 44,5 mm, foi inserida no interior de um tubo de acrílico de diâmetro interno 104 mm. As dimensões do espaço anular entre a barra central de aço (cor preta) e o tubo em acrílico são muito próximas daquelas do espaço anular na entrada da bomba do conjunto BCS horizontal citado acima. A barra central simula o eixo que transmite o torque do motor para os rotores da bomba embora neste experimento simplificado não haja o movimento giratório. Isto se justifica pelas dificuldades em se impor o movimento rotatório à barra neste experimento simples e, acima de tudo, pelo fato de que a intenção era apenas verificar a possível correlação entre fenômenos acústicos e hidrodinâmicos em um espaço anular. A tubulação de acrílico, além de permitir a visualização do escoamento, permite ainda a obtenção de sinais acústicos mais fortes conforme já se viu anteriormente.



(a)



(b)

Figura 6.1. (a) Vista esquemática e (b) fotografia da montagem simplificada vertical utilizada para simular a geometria na entrada da bomba do conjunto BCS (LABPETRO-UNICAMP).

Foi utilizada uma filmadora marca IDT, modelo Motion Pro X3, com capacidade de aquisição de até 1000 quadros por segundo na resolução máxima de 1280 x 1024 pixels (1.3 Megapixels). A filmadora foi posicionada de modo a focar a mesma a seção onde se localizam os transdutores ultrassônicos. Embora a bomba do conjunto BCS seja orientada horizontalmente e a montagem simplificada verticalmente, a caracterização dos sinais ultrassônicos (delimitação das “janelas de atividade”) depende das dimensões envolvidas e

não da orientação. O ar foi injetado na parte inferior da tubulação e descarregado para a atmosfera na parte superior. A FVG de gás foi obtida pelo inchamento da coluna de líquido.

Terminadas as séries de dados na montagem simplificada, os experimentos foram então realizados na entrada da bomba do conjunto BCS horizontal. Este circuito experimental encontra-se no LABPETRO-UNICAMP e uma vista simplificada é mostrada na Figura 6.2. Este conjunto BCS é composto pela bomba, sistema de admissão e descarga da bomba, motor elétrico e sistema de controle e aquisição de dados. A bomba modelo J350N, do fabricante Reda/Schlumberger, possui vazão ótima de 12.630 bpd (84 m<sup>3</sup>/h) e é composta por dois estágios e diâmetro interno e externo na entrada de 122 mm e 150 mm, respectivamente (Amaral 2007). O motor elétrico que transmite torque à bomba é acionado por um inversor de frequência que possibilita o ajuste de sua rotação e vazão. O sistema de descarga auxilia no controle da vazão, pressão e FVG no interior da bomba. O sistema de aquisição e controle adquire os sinais de pressão e temperatura na entrada e na saída da bomba. O sistema de aquisição de dados é composto por um microcomputador, módulos de aquisição de sinais e programa de processamento. Nos módulos de aquisição, os sinais analógicos são recebidos dos instrumentos, condicionados e digitalizados. Mais detalhes do circuito e dos medidores são descritos na dissertação de mestrado de Verde (2011b).

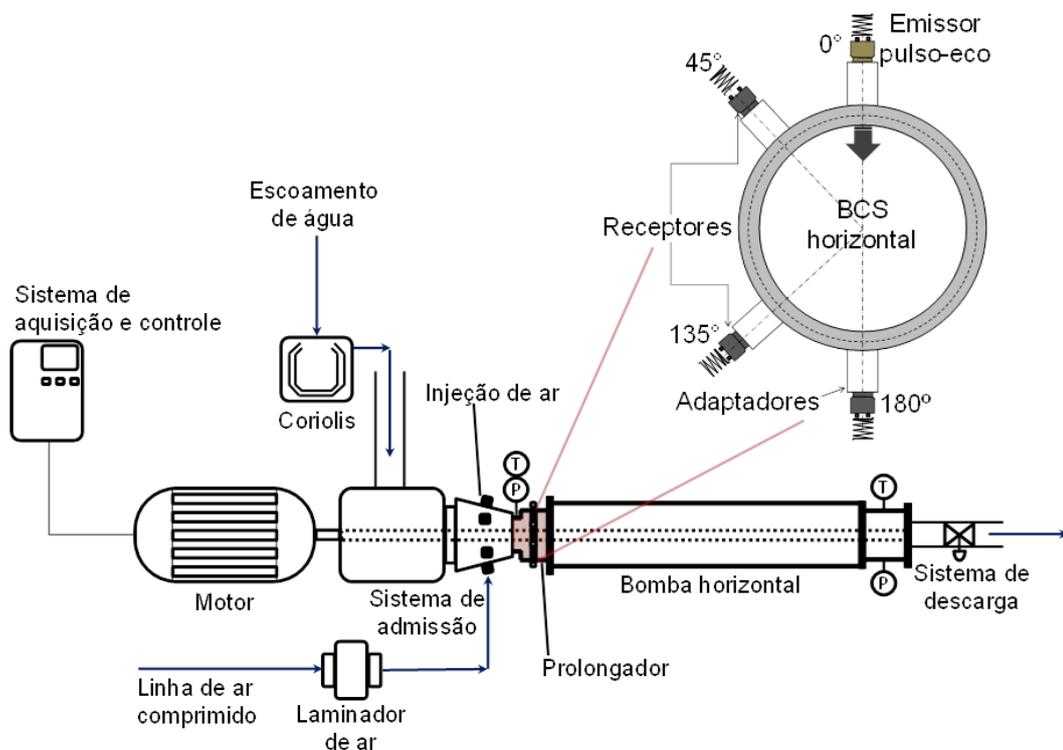


Figura 6.2. Esquema simplificado do conjunto BCS horizontal instalado no LABPETRO-UNICAMP indicando a seção de montagem dos sensores ultrassônicos.

Fonte: Adaptado de Verde, (2011b).

Testes preliminares com os transdutores ultrassônicos montados diretamente na carcaça metálica na entrada da bomba mostraram ser impossível obter sinais acústicos mensuráveis. Os sinais legítimos eram atenuados a ponto de simplesmente se confundirem com o ruído. Por esta razão, foi construído um adaptador em polipropileno para montagem dos transdutores, já que o feixe ultrassônico é menos atenuado em materiais plásticos (Apêndice A). Foram usados transdutores de 2,25 MHz devido às melhores correlações obtidas entre a razão de energia e a FVG nos testes realizados nas demais montagens experimentais. O carretel de injeção de ar na entrada da bomba se localizava a 20 cm da estação ultrassônica que continha os transdutores. O sensor a 0° (pulso-eco) foi posicionado na parte superior da tubulação devido principalmente à facilidade de instalação (Figura 6.3). O fato do carretel de injeção de ar ser composto por quatro pontos de injeção, associado ao movimento giratório do eixo, levava à suposição de que a fase gasosa estaria distribuída uniformemente na seção de medição. Isto tornaria o posicionamento do sensor emissor irrelevante.

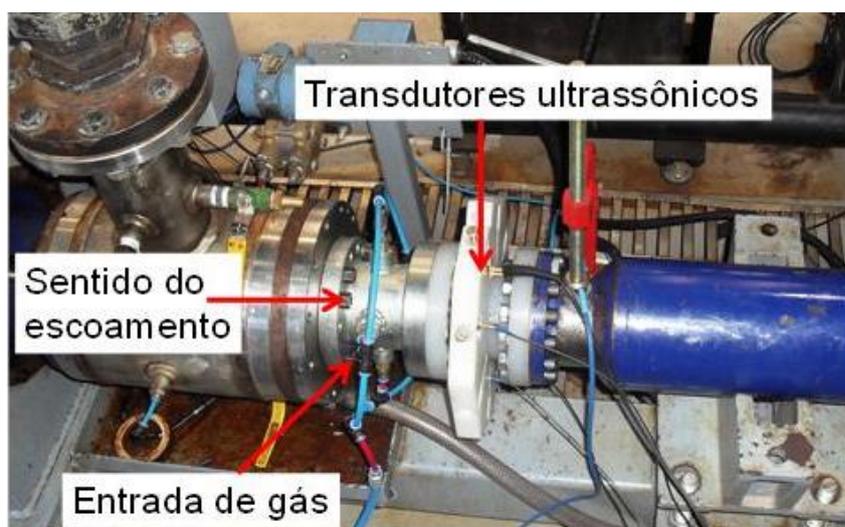


Figura 6.3. Fotografia da estação ultrassônica montada sobre o prolongador na entrada da bomba.

## 6.2. PROCEDIMENTOS DE MEDIDA

Na montagem simplificada, foram feitas duas séries de experimentos, a primeira apenas para caracterizar os sinais ultrassônicos e a segunda para correlacionar a atenuação acústica com a FVG e obter as filmagens rápidas sincronizadas. Nas duas séries, a FVG cobriu a faixa de 0 a 12% em passos de 1%. Foram coletadas cinco amostras ultrassônicas para cada FVG. Devido ao grande tamanho dos arquivos gerados, as filmagens foram realizadas apenas para os seguintes valores de FVG: 1 a 10% e 12%, em passos de 1%. Devido ao maior diâmetro da

tubulação agora testada com relação aos experimentos do Capítulo 3, foi necessário construir um novo dispositivo de fixação dos transdutores ultrassônicos. Todavia, o número, o tipo e a disposição dos sensores foram mantidos conforme descrito anteriormente, isto é, transdutores Panametrics de 2,25 MHz posicionados a 0°, 45°, 135° e 180°, sendo o sensor a 0° do tipo pulso-eco e os demais receptores, monocristais. A análise das janelas de atividades nestes sensores é discutida no Apêndice C.

No circuito de testes do conjunto BCS horizontal, foram realizados experimentos com escoamentos água-ar. A vazão de água foi mantida constante e a vazão de ar aumentada de modo que a FVG variasse de 0 a 8% em incrementos de 1%. A FVG foi calculada com base no modelo homogêneo pelas Equações (6.1), (6.2) e (6.3), onde o subscrito  $ge$  representa o gás na entrada da bomba

$$\rho_{ge} = \frac{P_e}{R \cdot T_e} \quad (6.1)$$

$$m_{geBCS} = \rho_{ge} \cdot Q_{ge} \quad (6.2)$$

$$FVG = \frac{Q_{ge}}{(Q_{ge} + Q_l)} \cdot 100 \quad (6.3)$$

Estes parâmetros eram monitorados em um painel virtual do programa *Labview* e armazenados na memória do computador em formato .txt. Foram adquiridas seis amostras por condição. Os parâmetros ultrassônicos foram ajustados conforme mostrado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Descrição dos parâmetros ultrassônicos para aquisição dos dados nas montagens experimentais.

Montagem experimental	Amostras por condição	Faixa FVG [%]	Frequência transdutor [MHz]	Sensores amostrados	Pulsos amostrados	Tempo amostragem [s]
Simplificada vertical	6	0 – 8	2,25	0°, 45°, 135°, 180°	30.000	15
Conjunto BCS horizontal	6	0 – 12	2,25	0°, 45°, 135°, 180°	30.000	15

### 6.3. SINCRONIZAÇÃO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS COM FILMAGENS RÁPIDAS

Inicialmente, foi estudada a evolução do padrão de escoamento no espaço anular em função da FVG na montagem simplificada vertical. Conforme mostrado na Figura 6.4a, para  $FVG \leq 9\%$  foram observadas apenas bolhas discretas de aproximadamente 10 mm de diâmetro, uniformemente distribuídas no espaço anular entre a barra metálica central e o tubo de acrílico. Para  $FVG \approx 9\%$ , apareceram as primeiras calotas gasosas, resultantes da coalescência de bolhas discretas, coexistindo então calotas e bolhas. Para  $FVG \approx 13\%$ , apareceram os primeiros “torpedos”, semelhantes às bolhas de Taylor. A análise dos vídeos mostrou também uma grande turbulência no escoamento, bem maior do que nos experimentos da montagem auxiliar vertical descrita no Capítulo 3. As bolhas não seguiam uma trajetória ascendente retilínea e, sim, uma trajetória espiralada em torno da barra central. Além disso, as bolhas menores pareciam se mover na esteira de bolhas maiores.

A sincronização das filmagens rápidas com os sinais ultrassônicos possibilitou a identificação de estruturas gasosas no escoamento. A Figura 6.5, reproduzida do trabalho de graduação de Oliveira (2012), mostra a razão de energia instantânea para os sensores a  $0^\circ$  e  $180^\circ$  em padrão bolhas dispersas ( $FVG = 2\%$ ); a Figura 6.6 (Oliveira 2012) corresponde ao início de coalescência de bolhas ( $FVG = 12\%$ ).

As imagens das filmagens rápidas mostram que a presença de bolhas em frente ao sensor a  $180^\circ$  causa uma redução drástica da razão de energia neste sensor, efeito causado pelo bloqueio e espalhamento do feixe acústico para outras direções. Por outro lado, a presença de bolhas em frente ao transdutor a  $0^\circ$  promove o aumento da energia neste transdutor, efeito causado pela reflexão do feixe na interface das bolhas para trás.

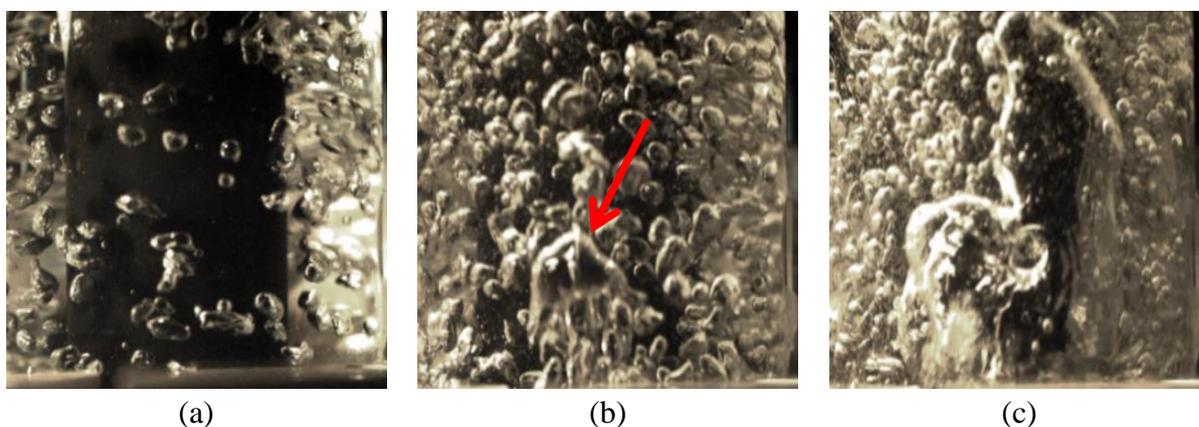


Figura 6.4. Padrões de escoamento em mistura água-ar para FVG igual a: (a) 4%; (b) 10% e (c) 18%.

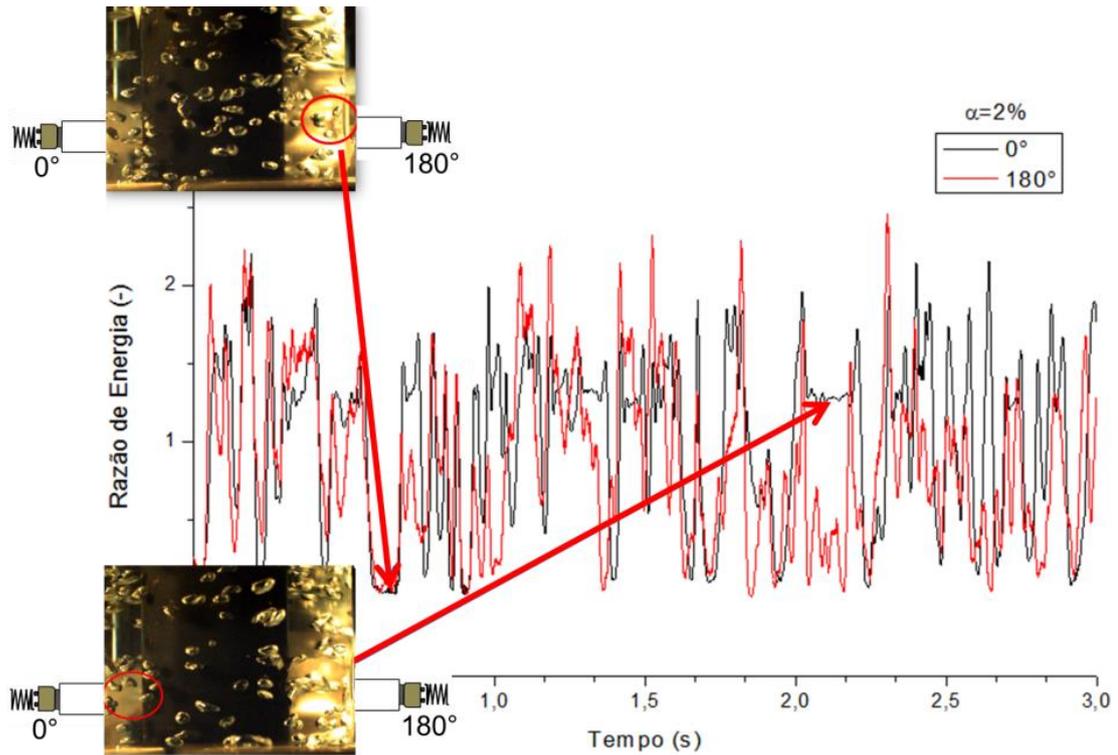


Figura 6.5. Razão de energia em função do tempo de aquisição nos transdutores a  $0^\circ$  e  $180^\circ$  com FVG = 2%.

Fonte: (Oliveira 2012).

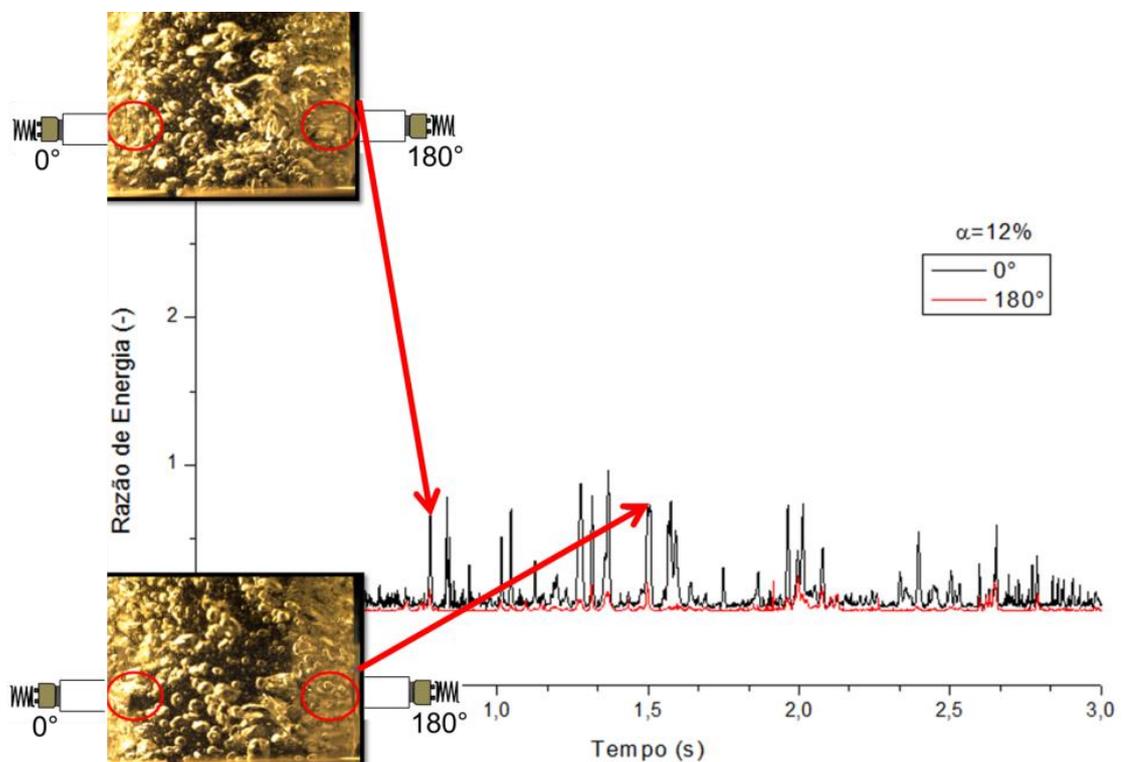


Figura 6.6. Razão de energia em função do tempo de aquisição nos transdutores a  $0^\circ$  e  $180^\circ$  com FVG = 12%.

Fonte: (Oliveira 2012).

Observa-se ainda que a amplitude das oscilações da razão de energia é maior na Figura 6.5 do que na Figura 6.6. Este comportamento é coerente com a baixa população de bolhas no primeiro caso que ora obstrui o caminho acústico, ora deixa-o quase completamente desobstruído. A obstrução do caminho acústico se intensifica à medida que aumenta a FVG na mistura, diminuindo assim a amplitude das oscilações. A sincronização da razão de energia instantânea com as filmagens rápidas mostrou boa concordância entre os fenômenos acústicos e hidrodinâmicos, indicando um bom potencial da técnica para aplicação no monitoramento da FVG em uma geometria com espaço anular.

#### **6.4. CORRELAÇÃO ENTRE OS SINAIS ACÚSTICOS E A FRAÇÃO DE GÁS NA MONTAGEM SIMPLIFICADA**

Inicialmente foi feita uma avaliação da transmissão e reflexão do feixe acústico nas várias interfaces em sua trajetória. A Figura 6.7 ilustra os índices de reflexão e transmissão do feixe acústico nas interfaces do aparato experimental considerando apenas água preenchendo o espaço anular, interfaces planas e incidência normal. Embora estas hipóteses sejam grosseiras, os resultados permitem associar ordens de grandeza relativa entre as quantidades de energia recebidas pelos sensores. Não foi considerada tampouco a dissipação da energia acústica ao longo do trajeto na água e no interior da barra metálica. Observa-se que, mesmo neste caso idealizado, somente uma pequeníssima porcentagem (1%) da energia inicial chega ao transdutor a  $180^\circ$ . Por outro lado, uma grande porcentagem da energia acústica (76%) é imediatamente refletida de volta para o transdutor a  $0^\circ$  pelo eixo central. Conclui-se então que a presença do eixo pode afetar significativamente as tendências observadas nos vários sensores quando comparadas aos dados para a tubulação sem o eixo. Com relação aos eventos associados às interfaces, o Apêndice C mostra um estudo da identificação dos picos nos sinais ultrassônicos com base no tempo de trânsito. Um estudo detalhado da influência da barra central sobre o feixe acústico comparando resultados com e sem a barra central está sendo feita na dissertação de mestrado de Bruno Diego de Oliveira na Universidade na Universidade Federal de Itajubá.

A Figura 6.8 mostra a razão de energia média em função da FVG para as duas séries experimentais com a presença do eixo central. O comportamento das curvas se mostra diferente daquele observado no Capítulo 3 e em Carvalho *et al* (2009) para misturas água-ar. No presente caso, observa-se um pico da razão de energia para  $FVG = 1\%$  e, a partir de então, um decaimento exponencial em todos os transdutores.

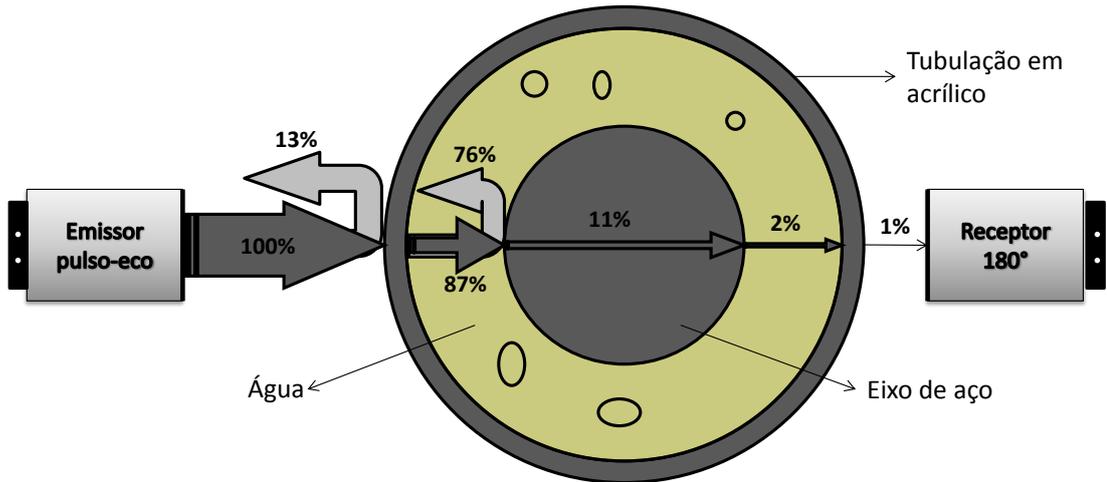


Figura 6.7. Vista esquemática das reflexões e transmissões nas várias interfaces do dispositivo experimental.

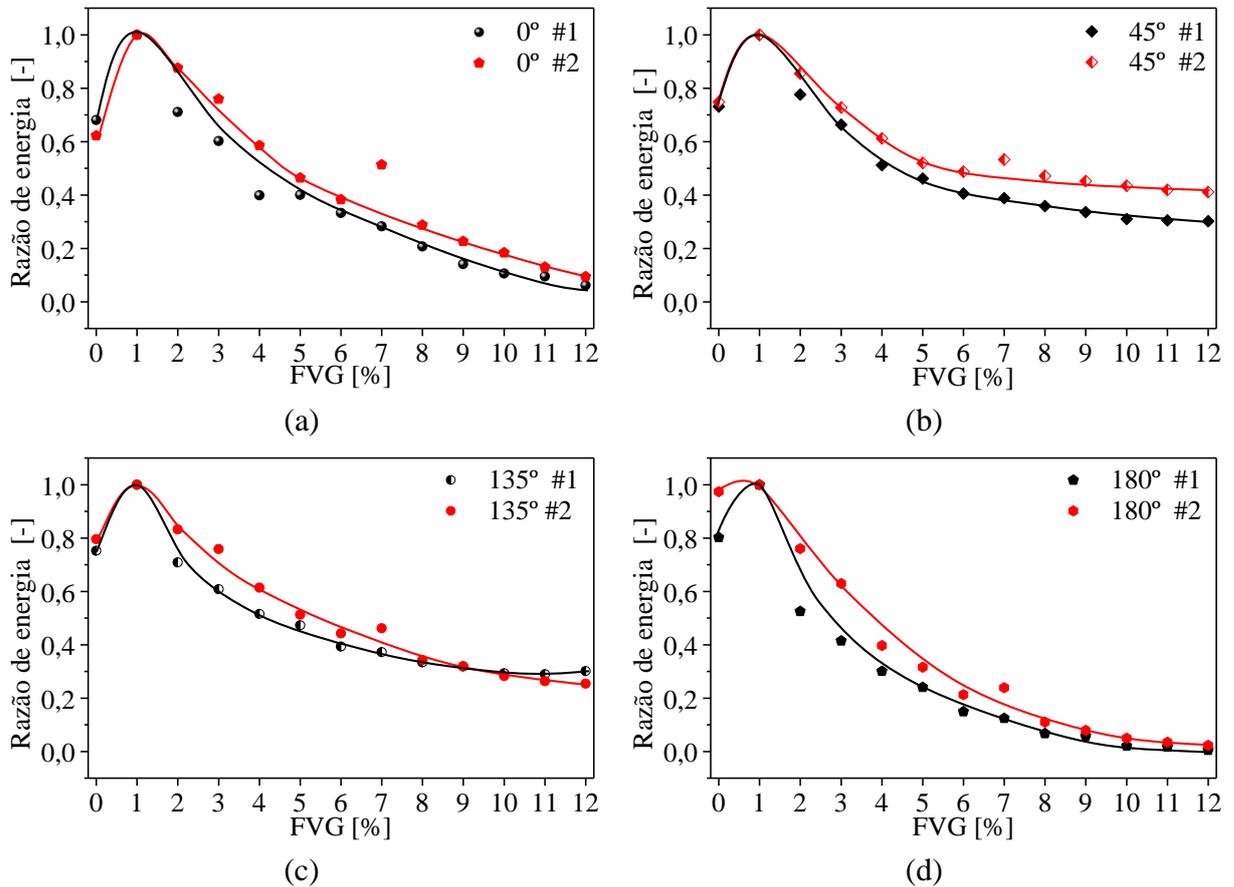


Figura 6.8. Razão de energia média em função da FVG para duas misturas água-ar nos transdutores a (a) 0°, (b) 45°, (c) 135° e (d) 180°.

No Capítulo 3 e em Carvalho *et al* (2009), este decaimento ocorre apenas para os sensores a 0° e 180°, sendo que o transdutor a 180° tende a zero e o transdutor a 0° tende a um valor maior do que zero. Além disso, contrariamente aos dados atuais, nos dados do Capítulo

3 e em Carvalho *et al* (2009), os sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$  apresentaram um aumento contínuo da razão de energia com o aumento da FVG, não se observando o pico em  $FVG = 1\%$ . As razões para estes picos estão sendo estudadas na dissertação de mestrado de Bruno Diego de Oliveira na Universidade Federal de Itajubá. De qualquer forma, ficou clara a correlação entre a FVG e a razão de energia nas duas séries de experimentos, indicando que a técnica ultrassônica pode também ser usada na medição da FVG em um espaço anular compreendido por uma tubulação e um eixo central.

## 6.5. ANÁLISE DA ATENUAÇÃO ACÚSTICA EM ESCOAMENTOS ÁGUA-AR EM UM CONJUNTO BCS HORIZONTAL

A definição das janelas de atividade para o cálculo da razão de energia no conjunto BCS horizontal é descrita no Apêndice D. A Figura 6.9 mostra os resultados da razão de energia média em função da FVG. As referências utilizadas para os quatro sensores corresponderam à condição de escoamento monofásico. Observa-se na Figura 6.9a que a razão de energia no sensor a  $0^\circ$  permanece próxima do valor máximo, entre 0,9 e 1,0, em todas as condições, indicando um possível acúmulo de bolhas na região superior da tubulação em frente a este transdutor.

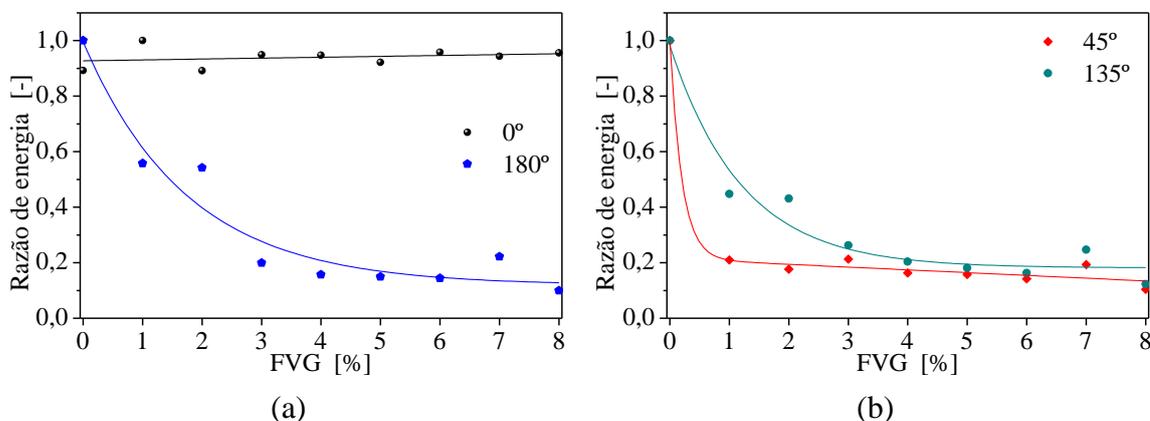


Figura 6.9. Razão de energia em função da fração volumétrica de gás nos sensores a (a)  $0^\circ$  e  $45^\circ$  e (b)  $135^\circ$  e  $180^\circ$ .

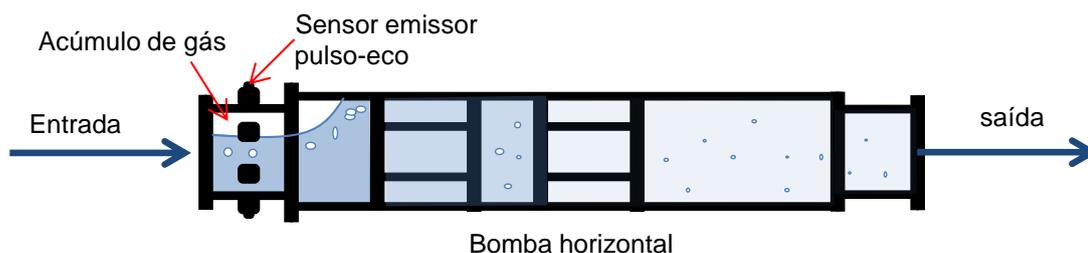


Figura 6.10. Esquema mostrando o acúmulo de gás na parte superior em frente ao sensor emissor  $0^\circ$ .

No sensor a 180°, observa-se uma queda exponencial da razão de energia, que parece confirmar este acúmulo de bolhas na região superior da tubulação. Nos sensores a 45° e 135°, a partir de aproximadamente 2%, a razão de energia permanece em valores muito baixos, menores do que 0,2, sendo mais um indicativo do acúmulo de bolhas na região superior. Estes resultados são coerentes entre si, pois se o feixe acústico é bloqueado logo na saída do sensor emissor a 0° devido ao acúmulo de bolhas (Figura 6.10), dificilmente o sinal acústico chegará aos demais sensores.

Os resultados obtidos com a montagem do sensor pulso-eco na parte superior não permitiram estabelecer uma correlação entre fenômenos acústicos e hidrodinâmicos. Todavia, no capítulo anterior, esta correlação foi verificada na montagem com o tubo de acrílico e a barra metálica. A continuidade destes trabalhos com o sensor pulso-eco posicionado na parte inferior da tubulação está sendo feita como parte da dissertação de mestrado de Bruno Diego de Oliveira na Universidade Federal de Itajubá.

## CAPÍTULO 7

### 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 7.1. PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

Sobre a técnica ultrassônica desenvolvida nesta tese, foram feitos testes experimentais em diversos escoamentos e situações em escala laboratorial usando óleo como fase contínua. Esta técnica consiste de um conjunto de parâmetros ultrassônicos, como por exemplo, razão de energia, energia instantânea, desvio padrão da razão de energia e tempo de trânsito, todos obtidos por meio de uma estação composta por quatro transdutores, um pulsador e um digitalizador. Foram realizados testes experimentais em montagens auxiliares, em um circuito vertical, em um circuito horizontal e na entrada de uma bomba centrífuga de um conjunto BCS horizontal. Podem ser enumerados os seguintes resultados:

- Na montagem vertical simplificada do LRF-UNIFEI, observou-se que o gás é a fase controladora da atenuação acústica, possibilitando sua identificação mesmo havendo a presença de outras fases dispersas.
- No circuito de testes vertical do LRF-UNIFEI, as correlações entre a razão de energia e a FVG apresentaram resultados satisfatórios na medição do gás mesmo em escoamentos trifásico e quadrifásicos. Estas correlações se mostraram melhores em tubulações de 2” do que em 1”.
- Em relação ao circuito de testes de escoamentos intermitentes horizontais localizado no LABPETRO-UNICAMP, foi possível medir a fração volumétrica de gás em escoamentos bifásicos água-ar para diferentes condições operacionais por meio da combinação do tempo de trânsito com a razão de energia. Estas condições operacionais abrangeram diferentes padrões intermitentes, bem como a transição entre eles.
- No estudo preliminar da aplicação de RNAs para medir a FVG e identificar padrões de escoamento, esta ferramenta apresentou desempenho satisfatório em escoamentos água-ar verticais, sendo necessária sua extensão para outras situações da indústria a fim de reduzir a necessidade de aferição da técnica.
- Na geometria que simulava a entrada de uma bomba de um conjunto BCS, os estudos preliminares indicam que a técnica pode ser usada para medir a FVG nesta geometria. Todavia, a atenuação do feixe acústico pelas paredes metálicas da BCS ainda é um problema a ser resolvido.

## 7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do exposto acima, os tópicos a seguir podem ser mais explorados em trabalhos futuros:

- Obtenção de dados ultrassônicos em escoamentos multifásicos com petróleo como fase contínua. Inicialmente poderia ser avaliada a atenuação acústica no fluido e as correlações do parâmetro razão de energia com a FVG.
- Levantamento de instrumentos e técnicas de filtragem de sinais ultrassônicos para redução dos problemas de atenuação em tubulações metálicas.
- Desenvolvimento de uma rede neural artificial mais robusta, envolvendo dados de entrada referentes a outros fluidos, como aqueles produzidos em campo, e outras geometrias e parâmetros hidrodinâmicos. Este estudo vem sendo feito pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (FEQ-UNICAMP).
- Estudo da aplicação de técnicas de medição de velocidade das fases por efeito Doppler. Este estudo já vem sendo feito por dois alunos de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Tecnológica do Paraná.
- Combinação de técnicas ultrassônicas e simulações numéricas para redução do tempo de processamento computacional.
- Influência das propriedades físico-químicas dos fluidos (viscosidade, densidade, composição, e outros) nos processos de espalhamento e atenuação acústica.

## 8. REFERÊNCIAS

- ABNT, A. B. d. N. T.-. (2003). "Agregados - Determinação da composição granulométrica." Disponível em: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). Acesso em 07/12/2011.
- Alderley (2012). "Maersk Olie Og Gas As - Produced Water Treatment Systems. Contractor: Smoe Pte Ltd. Location: Halfdan Field Development Phase Iii Project-Offshore Denmark. Disponível em: <http://www.alderleygroup.com/references/references.asp?client=Maersk+Olie+OG+Gas+AS>. Acesso em 29/10/2012."
- Amaral, G. D. L. (2007). "Modelagem do Escoamento Monofásico em Bomba Centrífuga Submersa Operando com Fluidos Viscosos." Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 233 p.
- API. (2004). "White paper - State of the art multiphase flow metering." Measurement Coordination. American Petroleum Institute. API Publication 2566. Primeira edição. Maio de 2004.
- Arora, R. (2009). "Production Well Testing Using Non-radioactive Multiphase Flow Meters." Exploration & Production. Vol. 7. N 1. p 86-89.
- Bamberger, J. A., Greenwood, M. S., (2004). "Measuring fluid and slurry density and solids concentration non-invasively." Ultrasonics 2004. N 1-9. p 563 - 567.
- Bello, O. O. (2008). "Modelling particle transport in fas-oil-sand multi-phase flows and its applications to production operations." Tese de doutorado. Faculty of Energy and Economics Sciences. Clausthal University of Technology.
- Berge, F. E. M. (2011). "Up to the Challenge: Finn Erick Mohn Berge, Emerso Process Management, discusses meeting platform and multiphase metering challenges in the North Sea and beyond." World Pipelines. May 2011. Disponível em: <[http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Articles/Roxar%20World%20Pipelines%20May%202011%20\(Purchased%20Pdf\).pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Articles/Roxar%20World%20Pipelines%20May%202011%20(Purchased%20Pdf).pdf)>. Acesso em 20/07/2012.
- Birks, A., Green Jr., R. E., McIntire, P., (1991). "Nondestructive Testing Handbook." Vol. 7. ASNT. Ed. Paul McIntire. Columbus, OH.
- Bond et al., L. J., Morra, M., Greenwood, M. S., Bamberger, J. A., Pappas, R. A., (2003). Ultrasonic Technologies for Advanced Process Monitoring, Measurement, and Control. 20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology. . CO, USA. Vol. 2. p 1288-1293.
- Bratland, O. (2010). "Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance. 272 p. Disponível em: <<http://www.drbratland.com/>>. Acesso em: 01 nov 2012."
- Brauner, N. (2004). "Liquid-Liquid two-phase flow systems." Modeling and Control of Two-Phase Flow Phenomena Ed. V Bertola, CISM Center, Udine, Italy.(Disponível em: <<http://www.eng.tau.ac.il/~brauner/LL-Flow>>. Acesso em: 04 nov 2012.).
- Carey, P. C. (2007). "Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena: An Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment." Ed. Taylor & Francis Group. 742 p. ISBN: 1591690358.

- Carvalho, R. D. M., Bannwart, A. C., (2010). The Use of the Ultrasonic Technique for the Study and Online Monitoring of Multiphase Flows. *Advances in Multiphase Flow and Heat Transfer*. D. M. L. Cheng, Bentham Science Publishers. p 144-177.
- Carvalho, R. D. M., Venturini, O. J., Tanahashi, E. I., Neves Jr., F., Franca, F. A., (2009). "Application of the Ultrasonic Technique for the Study of the Structure of Air-Water Bubbly Flows." *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 33 N 7. p 1065-1086.
- Cheeke, J. D. N. (2002). *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. Florida, CRC Press LLC. ISBN 0-8493-0130-0.
- Cong, J. S., ; Wang, X. M.,; Chen, D. H.,; Xu, D. L.,; Che, C. X.,; Ma, S. L., (2008). "Gas detection in a gas-liquid flow using an acoustic resonance spectroscopy method." *Chinese Journal of Geophysics* Vol. 51. N 1. p 191-196.
- Corneliussen, S., Couput, J. P., Dahl, E., Dykesteen, E., Froysa, K. E., Malde, E., Hakon, M. Moksnes, P. O., Scheers, L. Tunheim, H. (2005). *Handbook of Multiphase Flow Metering - Revision 2*. The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement e The Norwegian Society of Chartered Technical and Scientific Professionals. Oslo - Norway. ISBN: 82-91341-89-3.
- Cunha Filho, J. S. (2010). "Estudo experimental de escoamento bifásico em tubo circular inclinado usando técnicas ultrassônicas e de visualização." Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 260 p.
- Danielson, T. J. (2007). "Sand transport in multi-phase pipelines." In: *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, OTC 18691 - 30 abril a 03 de maio 2007.
- Dias, S. G. (1998). "Distribuição de fases em escoamentos com simetria axial em padrão bolhas: aplicação do modelo de dois fluidos e comprovação experimental com novo método usando a sonda dupla." Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Faculdade de Engenharia Mecânica. CEPETRO.
- Emerson, P. M. (2004). "Micro Motion-Inc White Paper: Explaining how two-phase flow affects mass flowmeters." Boulder, Colorado, USA.
- Ersoy, G. C. S., C., Al-Safran, E. M., Zhang, H. Q. (2011). "Experimental investigation of three-phase gas-oil-water slug flow evolution in hilly-terrain pipelines." *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 30 October-2 November 2011, Denver, Colorado, USA. DOI: 10.2118/146630-MS.
- Expro Group (2013). "Catálogo técnico sobre testes de poços. Well Flow Management TM.
- Faccini, J. L. H. (2008). "Estudos de escoamentos bifásicos estratificados usando técnicas ultrassônicas." Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 177 p.
- Falcone et al., G., Hewitt, G. F., Alimonti, C., (2009). "Multiphase Flow Metering, Principles and Applications." Ed. Elsevier. Vol. 54. 300 p. ISBN 0080558844.
- Falcone, G., Alimonti, C., Hewitt, G. F., (2002). "Multiphase Flow Metering: Current Trends and Future Developments." *JPT Online* - ref. SPE 2001 Annual Tech. Conf. and Ex. 54. N 4. 30 Sep. – 3 Oct. .
- Falcone, G. e Harrison, B. (2011). "Forecast expects continued multiphase flowmeter growth." *Oil & Gas Journal*. 03/07/2011.

- Fowler, K. A., Hotchkiss, F. H. C., Yamartino, T. V., Nelligan, T., (2012). "Important Characteristics of Sound Fields of Ultrasonic Transducers." White paper - Panametrics Olympus Inc.
- Grangeiro, F. A. (2010). Caracterização do escoamento intermitente horizontal água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo. Universidade Estadual de Campinas. 123 p. ID 000776467.
- Hatzignatiou e Mohamed, D. G., Mohamed, F., (1994). Water And Gas Coning In Horizontal And Vertical Wells. Society of Petroleum Engineers [successor to Petroleum Society of Canada]. Annual Technical Meeting, Jun 12 - 15, 1994 , Calgary, Alberta. ISBN 978-1-61399-094-0.
- Hibberd, D. (1997). "Ultrasonic monitoring of oil-in-water emulsions undergoing depletion flocculation." *Journal of Colloid and Interface Science* 193. N 1. p 77 - 87.
- Huq, R. H., Loth, J.L., (1992). "Analytical two-phase flow void fraction prediction method." *Journal of Thermophysics*. Vol. 6. p 139 - 144.
- Jones Jr., O. C., Delhaye, J. M., (1976). "Transient and statistical measurement techniques for two-phase flows: a critical review." *International Journal of Multiphase Flow* Vol. 3. p. 89-116.
- Kinsler et al., L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V., (2000). "Fundamentals of acoustics." 4<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-84789-5.
- Kunert, R. (2007). "Processamento Primário de Petróleo." Recursos Humanos. Universidade Petrobras. Escola de Ciências e Tecnologias E&P. 54 p.
- Kyotömaa, H. K. (1995). "Theory of Sound Propagation in Suspensions: A Guide to Particle Size and Concentration Characterization." *Powder Technology*. Vol. 82. N 1. p 115 - 121.
- Lee, A. H., Sun, J. Y., Jepson, W. P., (1993). "Study of flow regime transitions of oil-water-gas mixtures in horizontal pipelines." *Proceedings of the Third (1993) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Singapore. 11 Jun 1993. The International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Manabe, R., Zhang, H. Q., Delle-Case, E., Brill, J. P., (2001). "Crude Oil - Natural Gas Two-Phase Flow Pattern Transition Boundaries at High Pressure Conditions." *SPE Annual Technical Conference and Exhibition 2001*, SPE: New Orleans. DOI: 10.2118/71563-MS.
- Marcano, R. C., X. T., Sarica, C., Brill, J. P. (1998). "A Study of Slug Characteristics for Two-Phase Horizontal Flow." *International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico*, 3-5 March 1998, Villahermosa, Mexico. DOI: 10.2118/39856-MS.
- Masala, T. H., G., Chang, J. S., (2007). "Separated two-phase flow regime parameter measurement by a high speed ultrasonic pulse-echo system." *Review of Scientific Instruments* Vol 78. N 11. ID. 114901. DOI: <http://link.aip.org/link/doi/10.111063/114901.2804117>.
- McClements, D. J. (1994). "Ultrasonic determination of depletion flocculation in oil-in-water emulsions containing a non-ionic surfactant." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* Vol. 90. N 1. p 25 - 35.

- Mishima, K., Ishii, M., (1984). "Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27. N 5.
- Murai, Y., Tasaka, Y., Nambu, Y., Takeda, Y., Gonzalez, A. S. B., (2010). "Ultrasonic detection of moving interfaces in gas-liquid two-phase flow." *Flow Measurement and Instrumentation* Vol. 21. N 3. p 356-366. .
- Murakawa, H. K., H., Aritomi, M., (2005). "Application of ultrasonic doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies." *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol. 29. N 7. p 843-850.
- Nesse, O. (2012). "Coriolis two-phase meter." White paper. Statoil. TEKNA - NFOGM 22-03-2012. Disponível em: <<http://www.tekna.no/ikbViewer/Content/844447/2%20Et%20oljeselskaps%20syn%20%D8%20Nesse.pdf>> Acesso em 31/07/2012.
- Oliveira, B. D. (2012). "Desenvolvimento da Técnica Ultrassônica para Medição de Escoamentos Multifásicos na Entrada de uma Bomba Centrífuga Submersa." Trabalho Final de Graduação. Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá. 55 p.
- Olympus, C. (2012). "Introduction to ultrasonic thickness gaging: theory of operation." White paper - Olympus. Disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/en/ndt-theory/thickness-gage/>>. Acesso em 20 nov 2012.
- Paiva, T. A. (2011). "Aplicação de técnicas ultrassônicas para análise de escoamentos multifásicos do tipo líquido-sólido e líquido-sólido-gás." Dissertação de mestrado. Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá. .
- Paladino, E. E. (2005). "Estudo do escoamento multifásico em medidores de vazão do tipo pressão diferencial." Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis. 263 p.
- Panametrics-NDT, O. (2011) "Ultrasonic Transducers Technical Notes." jan 2012.
- Panetta, P. D. (2010). *Ultrasonic Characterization of Solid Liquid Suspensions*. B. M. Institute. USA.
- Petrobras (2013). "Utilização da técnica ultrassônica e de redes neurais para determinação da concentração das fases dispersas e detecção da configuração de escoamentos multifásicos representativos na indústria de petróleo." Relatório técnico de pesquisa.
- Prasad, V. S. K., Balasubramaniama, K., Kannana, E., Geisingerb, K. L., (2008). "Viscosity measurements of melts at high temperatures using ultrasonic guided waves." *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 207. p 315 - 320.
- Premoli, A., Francesco, D., Prina, A., (1971). "Una Correlazione Adimensionale per la Determinazione della Densita di Miscele Bifasiche. ." *La Termotecnica*. Vol. 25. p 17 - 26.
- Rosa, E. S., Salgado, R. M., Ohishi, T., Mastelari, N., (2010). "Performance comparison of artificial neural networks and expert systems applied to flow pattern identification in vertical ascendant gas-liquid flows." *International Journal of Multiphase Flow* Vol. 36. N 9. p 738-754.
- Rouhani, S. Z., Axelsson, E., (1970). "Calculation of void volume fraction in the sub cooled and quality boiling regions." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 13. p 383 - 393.

- Salgado, S. M. (2010). Identificação de regimes de fluxo e predição de frações de volume em sistemas multifásicos usando técnica nuclear e rede neural artificial.
- Scheers, L. (2008) "Multiphase Flow Metering: on its way from nursing to mature technology." Em: Hydrocarbon Production Accounting Workshop. 16-17 dec. Moscow, Russia.
- Shaikh, A., Al-Dahhan, M., (2003). "Development of an artificial neural network correlation for prediction of overall gas holdup in bubble column reactors." Chemical Engineering and Processing. Vol. 42. N 8-9. p 599 - 610.
- Shoham, O. (2006). "Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes." Ed. Softcover. 408 p. ISBN:978-1-55563-107-9.
- Silva Filho, J. A. P., Oliveira, T. B. V., Mata, J. D., Val, L. G. (2010). "Importância da Avaliação das Incertezas na Medição dos Volumes de Petróleo e Gás Natural." Produto & Produção - Edição Metrologia. Vol. 11. N 1. p 99 - 112.
- Soong, Y. (1995). "Measurements of Solids Concentration in a Three-phase Reactor by an Ultrasonic Technique." The Chemical Engineering Journal. Vol. 60. p 161-167.
- Supardan, M. M., Y., Maezawa, A., Uchida, S. (2007). "The investigation of gas holdup distribution in a two-phase bubble column using ultrasonic computed tomography." Chemical Engineering Journal. Vol 130. N 2-3. p 125-133. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2006.08.035>.
- Taitel, Y., Dukler, A. E., (1976). "A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas -liquid flow." AICRE Journal Vol. 22. N 1. p 47.
- Tanahashi, E. I. (2010b). "Desenvolvimento da técnica de ultrassom para medição da fração de vazio e detecção do padrão de escoamentos água-ar." Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá. 81 p.
- Tanahashi, E. I., Paiva, T. A., Grangeiro, F. A., Carvalho, R. D. M., Venturini, O. J., Bannwart, A. C., Bizotto, V. C., (2010a). Application of the Ultrasonic Technique for Monitoring Intermittent Liquid-Gas Flows and Liquid-Solid Flows. 7th North American Conference on Multiphase Technology (MPNA 2010), Banff, Canada.
- Thomas, J. E. (2004). "(Org). Fundamentos de Engenharia de Petróleo." Ed. Interciência. 2ª ed. 271 P. I.S.B.N.: 8571930996.
- Vatanakul, M., Zheng, Y., Couturier, M., (2004). "Application of Ultrasonic Technique in Multiphase Flow." Industrial and Engineering Chemistry Research. Vol 43. N 18. p 5681-5691.
- Verde, W. M. (2011b). "Estudo experimental de bombas de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido." Dissertação de mestrado. Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas. 153 p.
- Weatherford (2012). Catalog multiphase metering systems (remms). Red Eye 2G Water-Cut Meter. Jan 2012. [http://www.ep-solutions.com/solutions/EP/Red\\_Eye](http://www.ep-solutions.com/solutions/EP/Red_Eye).
- Xu, L. J., Xu, L. A., (1997). "Gas/liquid two-phase flow regime identification by ultrasonic tomography." Flow Meas. Instrum. Vol 8. N 3-4. p 45-155.

Zheng, Y., Zhang, Q., (2004). "Simultaneous Measurement of Gas and Solid Holdups in Multiphase Systems Using Ultrasonic Technique." *Chemical Engineering Science* Vol. 59. N 17. p 3505-3514.

## APÊNDICE A

### A. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE O ULTRASSOM

O ultrassom é uma forma de onda mecânica que se propaga em meios materiais com frequências acima de 20 kHz. Em meios fluidos, o ultrassom se comporta do mesmo modo que o som audível, porém, com comprimentos de onda bem mais curtos. De um ponto de vista qualitativo, podem ser formados quatro tipos diferentes de onda classificadas de acordo com a direção de deslocamento do movimento das partículas, quais sejam: ondas transversais, longitudinais, superficiais (Rayleigh) e de placa (de Lamb e de Love). Dependendo das condições, pode ocorrer a propagação de todas elas de uma só vez em meios sólidos (ex. particulados ou areia). Em casos práticos, a superposição de ondas torna-se extremamente complexa havendo combinações de inúmeras frequências, amplitudes e tipos de onda.

As ondas longitudinais, também conhecidas como compressoriais devido ao movimento de compressão e expansão do meio, propagam-se na mesma direção do movimento das partículas. Este tipo de onda apresenta a maior velocidade de propagação e podem ocorrer nas fases sólida, líquida e gasosa. Ondas transversais e de placa não conseguem se propagar em meios fluidos. No entanto, sob certas condições, uma onda longitudinal ao atravessar a interface entre um meio líquido e um meio sólido pode gerar outros tipos de onda no meio sólido. Algumas velocidades de propagação de ondas longitudinais e transversais em diversos meios são apresentadas no Anexo A.

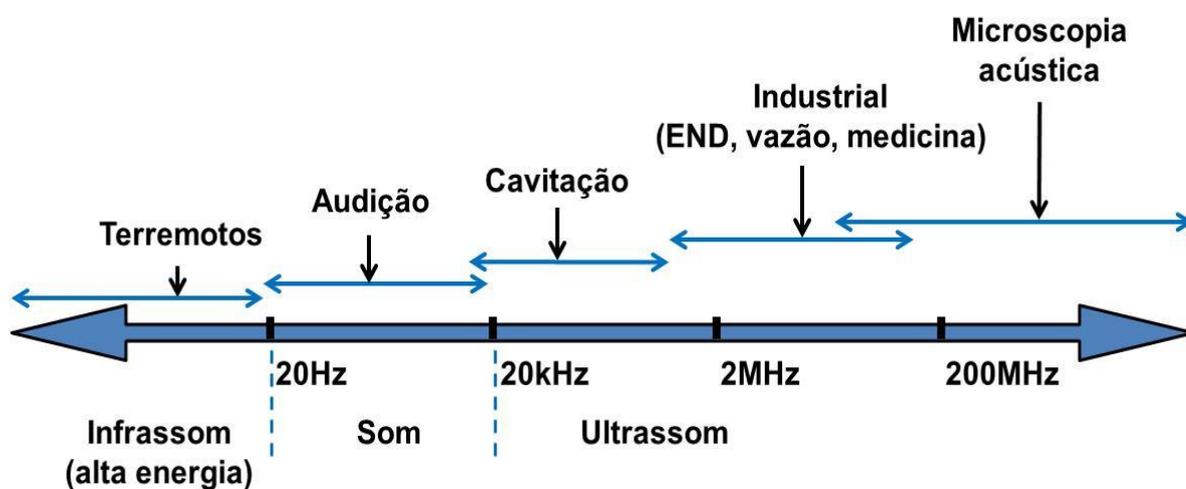


Figura A.1. Espectro de frequência do ultrassom e suas aplicações mais comuns.

Do ponto de vista clássico, a atenuação do feixe acústico em meios fluidos monofásicos ocorre devido à viscosidade e à condução térmica no fluido, sendo este parâmetro importante na aferição de medidores ultrassônicos. Em fluidos não-metálicos, a atenuação causada pela condução térmica é desprezível quando comparada à atenuação causada pela viscosidade (Kinsler *et al.* 2000). Em relação à viscosidade, para a maioria dos fluidos à temperatura ambiente, o produto da velocidade angular da fase pelo tempo de relaxamento é muito menor do que um ( $\omega\tau \ll 1$ ), sendo que o tempo de relaxamento e a atenuação linear da fase devido à viscosidade são descritos por (Cheeke 2002)

$$\alpha = \frac{\omega^2 \mu}{2\rho_0 c^3} \quad (\text{A.1})$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido. Quando a viscosidade da fase contínua é baixa, como por exemplo, em gases, a atenuação por condução térmica deve ser considerada. Neste caso, o *coeficiente de atenuação clássica* deve ser usado

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \left( \frac{4\mu}{3} + \frac{\kappa(\gamma - 1)}{c_p} \right) \quad (\text{A.2})$$

onde  $\kappa$  é a condutividade térmica,  $\gamma$  o coeficiente isentrópico e  $c_p$  é o calor específico. Destaca-se que a atenuação acústica é diretamente proporcional à viscosidade e ao quadrado da frequência. Em petróleos pesados e extrapesados, por exemplo, ondas de altas frequências podem proporcionar pouca penetração no fluido.

A atenuação acústica total é frequentemente medida em escala logarítmica de decibéis, onde  $\mathcal{A}_1$  é a amplitude da onda e  $\mathcal{A}_2$  é a amplitude máxima do sinal. Esta escala é largamente utilizada em ensaios não destrutivos (END) para detecção de falhas.

$$dB = 20 \log_{10} \left( \frac{\mathcal{A}_1}{\mathcal{A}_2} \right) \quad (\text{A.3})$$

Com relação aos fenômenos de interfaces, além da atenuação acústica causada pela absorção no meio de propagação, pode ocorrer ainda a atenuação da onda ao atravessar a interface entre dois meios. Este fenômeno é descrito classicamente em termos de índices de reflexão e transmissão em interfaces e obedece à lei de Snell-Descartes. As razões de pressão,

intensidade e energia transmitidas e refletidas nas interfaces dependem da velocidade de propagação e da impedância acústica em cada meio, além do ângulo entre a interface e direção de propagação da onda incidente (Kinsler *et al.* 2000). A seguir são discutidos conceitos importantes para o cálculo de transmissão e reflexão em interfaces entre fluidos.

*Impedância acústica* é uma propriedade comumente usada nas aplicações de técnicas ultrassônicas, cuja parte real da equação é definida por:

$$Z = \pm \rho_0 c \quad (\text{A.4})$$

*Intensidade acústica* é definida como a média da taxa de transmissão de energia através de uma unidade de área normal à direção de propagação

$$I = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p v dt = \pm \frac{p_{max}^2}{2\rho_0 c} \quad (\text{A.5})$$

onde  $\tau$  é o período de cada ciclo e  $p_{max}$  é a pressão máxima atingida durante o período.

Considerando uma onda ultrassônica que se propaga de um meio fluido com impedância acústica  $Z_1$  para outro meio fluido com impedância acústica  $Z_2$  na direção positiva do eixo  $x$ , definem-se os coeficientes de transmissão e reflexão de pressão como:

$$T = \frac{P_t}{P_i} \quad (\text{A.6})$$

$$R = \frac{P_r}{P_i} \quad (\text{A.7})$$

onde os subscritos  $i$ ,  $t$  e  $r$  referem-se à onda incidente, transmitida e refletida respectivamente. A pressão da onda incidente é descrita por

$$p_i = p_{imax} e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (\text{A.8})$$

Ao atingir a interface plana, geram-se a onda refletida

$$p_r = p_{rmax} e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (\text{A.9})$$

e a onda transmitida

$$p_t = p_{tmax} e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (\text{A.10})$$

Considerando ainda a intensidade de uma onda harmônica plana equivalente a  $(p_{max}^2)/2Z$ , Equação (A.5), os índices de transmissão e reflexão de intensidade são reais e equivalem a:

$$T_I = \frac{I_t}{I_i} = \frac{Z_1}{Z_2} |T|^2 \quad (\text{A.11})$$

$$R_I = \frac{I_r}{I_i} = |R|^2 \quad (\text{A.12})$$

Considerando uma onda harmônica plana que incide sobre uma interface também plana entre dois fluidos de impedâncias diferentes, como óleo e água, as intensidades da onda refletida e transmitida corresponde a:

$$R_I = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (\text{A.13})$$

$$T_I = \frac{4Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (\text{A.14})$$

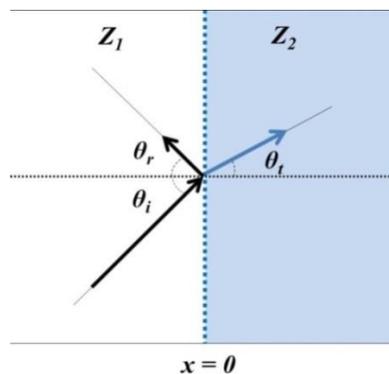


Figura A.2. Reflexão e transmissão de uma onda plana oblíqua ao plano da interface entre dois fluidos com impedâncias acústicas diferentes.

Fonte: Adaptado de (Kinsler *et al.* 2000).

Se esta onda incidir de forma oblíqua ao plano da interface entre os fluidos, como mostra a Figura A.2, o ângulo de incidência será igual ao de reflexão:

$$\text{sen}\theta_i = \text{sen}\theta_r \quad (\text{A.15})$$

e o ângulo de transmissão obedecerá à lei de Snell (Figura A.2):

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{c_1} = \frac{\text{sen}\theta_t}{c_2} \quad (\text{A.16})$$

A fim de analisar os fenômenos de atenuação e espalhamento em situações típicas durante os testes experimentais, foram calculados os índices de transmissão e reflexão em algumas interfaces considerando os dados da Tabela A.1.

Tabela A.1. Propriedades acústicas dos materiais e fluidos utilizados nesta tese.

Meio de propagação	Velocidade longitudinal [m/s]	Velocidade transversal [m/s]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Impedância acústica [kg/m <sup>2</sup> s x 10 <sup>6</sup> ]
Acrílico	2.730	1.430	1.190,0	3,2
Aço AISI 1020	5.890	3.230	7.800,0	45,9
Microesferas de vidro	4.260	2.560	2.500,0	10,6
Água	1.480	-	998,0	1,5
Óleo (USP)	1.422	-	891,5	1,3
Ar	340	-	1,2	0,00

Tabela A.2. Índices de reflexão e transmissão do feixe ultrassônico nas interfaces dos principais materiais utilizados nesta tese, considerando a interface plana.

Interface	Reflexão 1 <sup>a</sup> Interface	Transmissão 1 <sup>a</sup> interface	Reflexão 2 <sup>a</sup> Interface	Transmissão 2 <sup>a</sup> interface	Transmissão 2 <sup>a</sup> interface [%]
Óleo-ar	0,999	0,001	0,001	0,000	0,00
Água-ar	0,999	0,001	0,001	0,000	0,00
Aço-óleo USP	0,904	0,096	0,087	0,009	0,93
Aço-água	0,879	0,121	0,106	0,015	1,46
Microesferas -óleo USP	0,645	0,355	0,229	0,126	12,64
Microesferas-água	0,572	0,428	0,245	0,183	18,31
Acrílico-óleo USP	0,223	0,777	0,173	0,604	60,38
Acrílico-água	0,141	0,859	0,121	0,739	73,87
Óleo-água	0,014	0,986	0,014	0,972	97,22

A Tabela A.2 mostra que as interfaces óleo-ar e água-ar tem o maior índice de reflexão ( $R \sim 1$ ), sendo este tipo de mistura responsável por um alto grau de espalhamento do feixe ultrassônico. Por outro lado, em interfaces óleo-água, o espalhamento do feixe é praticamente nulo, havendo grande energia transmitida através da mistura e alcançando o transdutor a  $180^\circ$  ( $T \sim 97\%$ ). Este estudo foi de grande importância para o desenvolvimento da metodologia para a medição da fração volumétrica de gás nas misturas, auxiliando na descrição de alguns fenômenos que correlacionavam a atenuação acústica com as diferentes fases dispersas.

Com relação aos sensores e instrumentos de aquisição das ondas ultrassônicas, o crescimento expressivo dos dispositivos ultrassônicos a partir dos anos 60 se deu graças à comunidade científica da matéria condensada. O ultrassom passou a ser visto como uma ferramenta excepcional na caracterização de materiais e aplicações em dispositivos eletrônicos (Cheeke 2002). Nos sistemas de aquisição de sinais, o primeiro contato entre o meio de propagação da onda e a eletrônica de processamento era feito por meio de transdutores. A Figura A.3 mostra um esquema típico de transdutores ultrassônicos monocristal e duplo elemento. Os principais elementos são: o elemento ativo, o apoio e a placa de proteção contra desgaste. O elemento ativo é um cristal piezelétrico ou ferroelétrico, normalmente cerâmica polarizada, que pode ser fabricado de modo a fornecer diferentes frequências e tipos de ondas (Fowler *et al.* 2012).

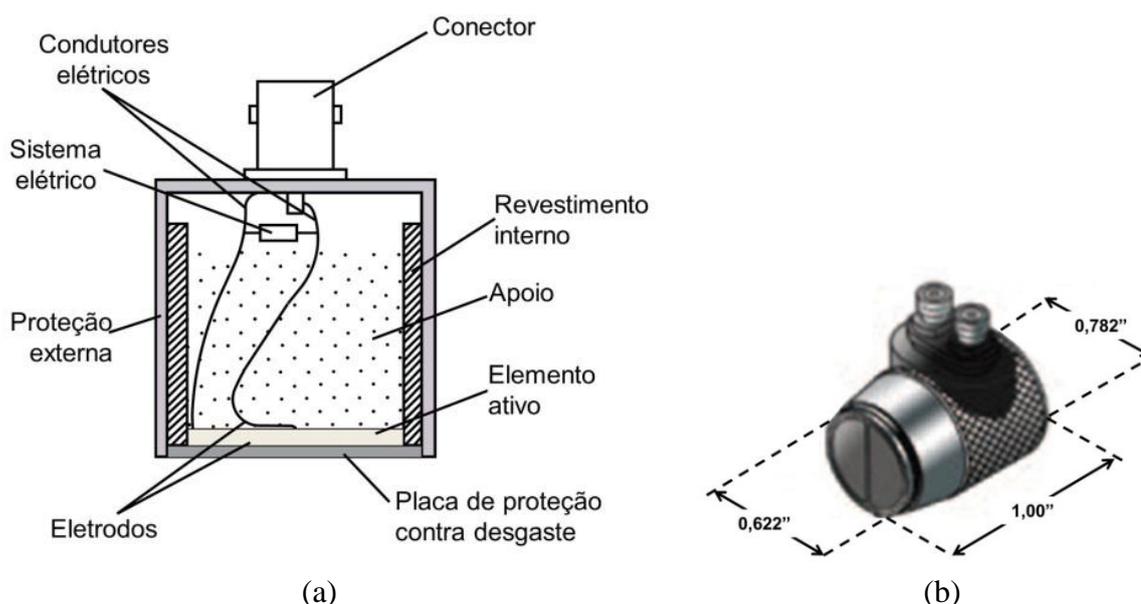


Figura A.3. Principais elementos de um transdutor ultrassônico típico (a) monocristal e (b) duplo elemento.

Fonte: (Panametrics-NDT 2011).

O apoio é constituído de um material altamente atenuante e de alta densidade que absorve a energia emitida pela face traseira do elemento ativo. A placa de proteção tem a função de proteger o elemento ativo contra desgaste e corrosão, o que permite o uso do transdutor em ambientes agressivos. O transdutor de elemento duplo mostrado na Figura A.3b usa elementos de emissão e recepção separados por uma camada altamente atenuante, todos dentro de uma cápsula de proteção externa.

Com relação aos campos acústicos gerados por estes transdutores, eles se classificam em campo próximo e campo distante (Figura A.4a). O campo próximo se localiza na região frontal do transdutor onde existem intensas oscilações e superposições de ondas acústicas. Este campo se inicia no cristal do transdutor e termina no último máximo de amplitude, correspondendo à distância  $N$  (Figura A.4a) O campo distante, também indicado na Figura A.4a, é uma região de comportamento passível de modelagem, iniciando-se no último máximo de amplitude e prosseguindo gradualmente até atingir o valor zero. Em aplicações como detecção de falhas, as superposições de ondas do campo próximo dificultam a visualização do eco causado pelas falhas e reduzem a precisão do método.

Em uma região plana onde o transdutor é posicionado perpendicularmente ao plano da face, o campo próximo pode ser obtido da seguinte forma (Panametrics-NDT 2011)

$$\mathcal{N} = \frac{D^2 f}{4c} = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (\text{A.17})$$

onde  $D$  é o diâmetro do transdutor,  $f$  a frequência,  $c$  a velocidade de propagação da onda longitudinal e  $\lambda$  o comprimento de onda.

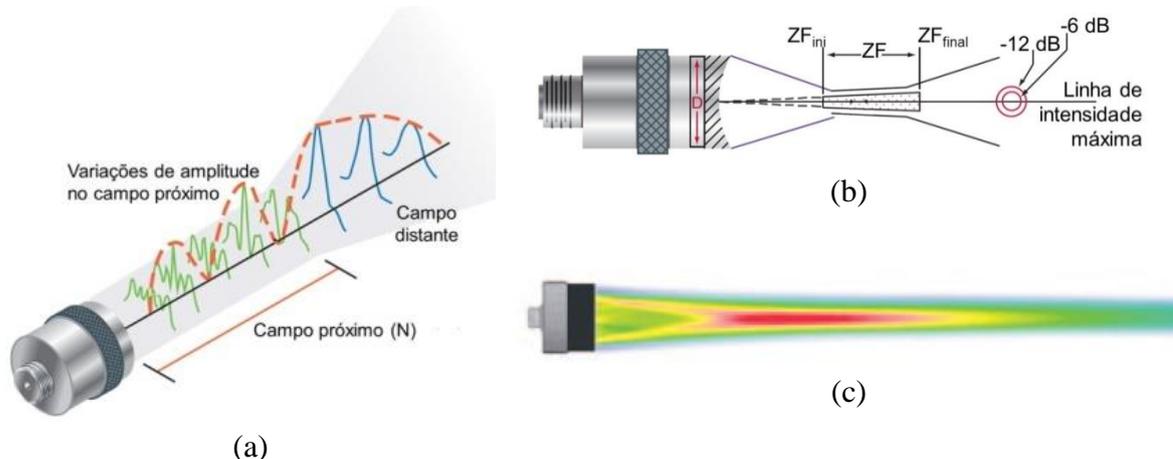


Figura A.4. Campos acústicos gerados por transdutores ultrassônicos.

Fonte: (Panametrics-NDT 2011).

No ponto de medição, a sensibilidade do transdutor pode ser afetada pelo diâmetro do feixe acústico e pela distância da zona focal, sendo necessárias análises prévias para o correto dimensionamento do sistema de aquisição de sinais. No ponto de interesse, quanto menor o diâmetro do feixe, maior a intensidade da onda refletida pela interface (ex. uma bolha no escoamento ou uma falha no sólido). O perfil de intensidade do campo acústico na Figura A.4c mostra em vermelho as regiões de maior intensidade, enquanto as áreas verde e azul mostram as de menores intensidades. Observa-se uma intensidade maior na região focal.

Para atender ao teorema de Nyquist, os sistemas eletrônicos de aquisição de sinais, chamados digitalizadores, devem adquirir os pontos da curva a uma taxa de amostragem no mínimo duas vezes maior do que a frequência de vibração do transdutor. Nos experimentos realizados nesta tese, foram usados somente transdutores Panametrics do tipo *Videoscan*, pois eles apresentam a melhor relação sinal/ruído do que os demais tipos de transdutores (*Accuscan "R"* e *Accuscan "S"*) e permitem uma maior penetração do feixe acústico no escoamento.

Sobre o sistema eletrônico de aquisição de dados, a Figura A.5 mostra um diagrama em blocos de um sistema típico usado na aquisição de sinais ultrassônicos em ensaios não destrutivos para detecção de falhas, análogo ao sistema usado nos experimentos desta tese. O pulsador, monitorado pelo microprocessador, emite um pulso de voltagem para o transdutor emissor, gerando a onda ultrassônica.

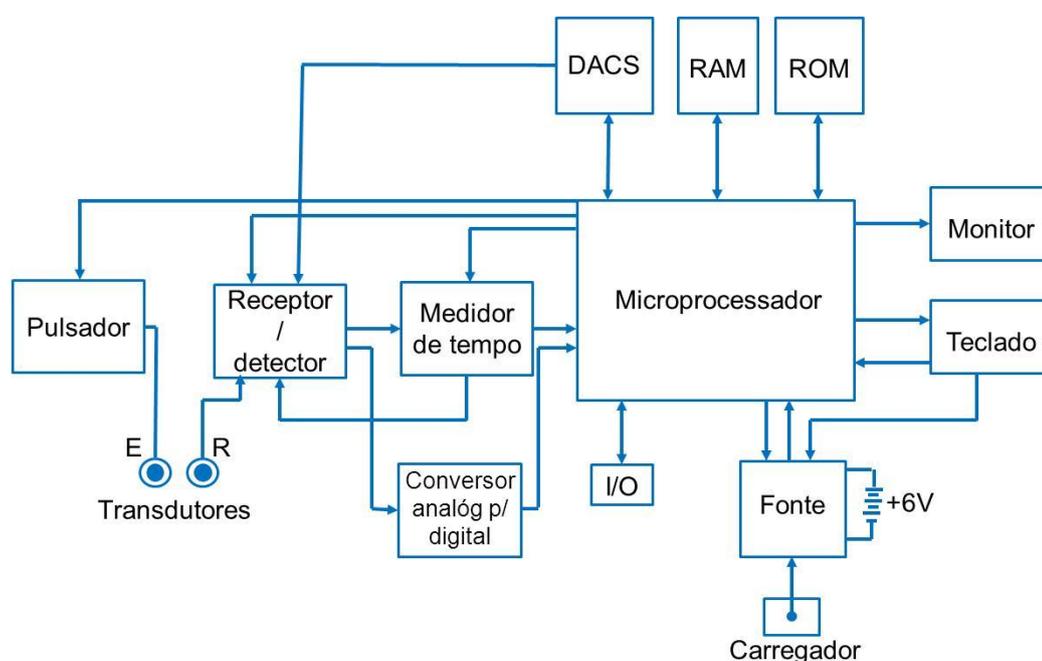


Figura A.5. Diagrama em blocos de um sistema eletrônico típico para aquisição de sinais ultrassônicos em ensaios não destrutivos.

Fonte: (Olympus 2012).

Ao se propagar pelo material e atingir os transdutores receptores, a onda é novamente convertida em sinais elétricos, que são enviados ao amplificador e são então digitalizados. O microprocessador sincroniza o instante de emissão do pulso com os ecos que trazem informações relevantes sobre o meio de propagação. No caso desta tese, estes arquivos digitais foram gravados em um disco rígido e posteriormente transferidos para um computador de alto desempenho para serem processados, filtrados e analisados.

## APÊNDICE B

### B. ANÁLISE DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS NA TUBULAÇÃO DE DUAS POLEGADAS

Para facilitar o processamento dos sinais e obter correlações melhores, inicialmente se faz necessário identificar os eventos hidrodinâmicos nos sinais ultrassônicos. São identificados os picos referentes às interfacesacrílico-fluido e os sinais que interagiram com o escoamento multifásico. Este procedimento foi chamado de identificação das “janelas de atividade” do sinal e envolve uma avaliação preliminar dos possíveis caminhos acústicos e tempos de trânsito das ondas sonoras transversal e longitudinal na montagem (Figura B.1). Este estudo foi feito para tubulações deacrílico e de aço e são apresentados nas próximas seções.

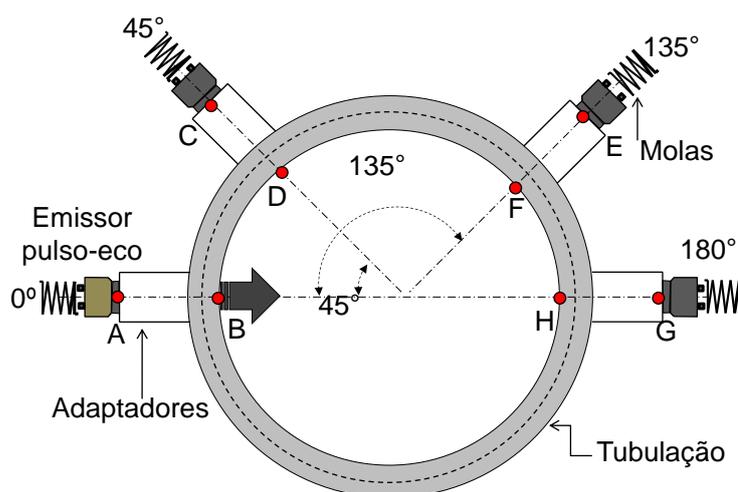


Figura B.1. Caminhos possíveis para a propagação das ondas acústicas na montagem simplificada vertical.

#### B.1. IDENTIFICAÇÃO DAS JANELAS DE ATIVIDADE NA TUBULAÇÃO DE ACRÍLICO

Inicialmente foram identificados os possíveis caminhos acústicos da onda ultrassônica. Para o cálculo do tempo de trânsito, foi considerada a geometria da Figura B.1 e velocidades de propagação nos diferentes meios conforme relacionadas na Tabela B.1. A Tabela B.2 mostra os principais caminhos percorridos pelas ondas acústicas geradas no ponto A da Figura B.1 e que chegam aos receptores da estação ultrassônica. Por exemplo, o pulso gerado no ponto A pode viajar tanto pelo fluido no interior da tubulação quanto peloacrílico.

Tabela B.1. Propriedades dos materiais atravessados pelo feixe ultrassônico.

Material	Velocidade longitudinal [m/s]	Velocidade transversal [m/s]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Impedância acústica [kg/m <sup>2</sup> s x 10 <sup>6</sup> ]
Acrílico	2.730	1.430	1.190,0	3,20
Aço AISI 1020	5.890	3.230	7.800,0	45,90
Água	1.480	-	998,0	1,50
Óleo (USP)	1.422	-	814,5	1,20
Ar	340	-	1,2	0,00

Tabela B.2. Principais caminhos seguidos pela onda e o respectivo tempo de trânsito para tubulação de acrílico e fase contínua óleo USP.

	Caminhos	No acrílico [mm]	No óleo [mm]	Tempo trânsito no acrílico [μs]	Tempo trânsito no óleo [μs]	Tempo trânsito total [μs]	Transdutor ultrassônico	Observações
Onda longitudinal 1 (LW1)	A-B-H-B-A	86,0	108,0	31,3	75,3	121,7	0°	Onda longitudinal gerada em A que interage com o escoamento
	A-B-escoam.-D-C	86,8	~	31,3	~	46,6 < t < 150,0	45°	
	A-B-escoam.-F-E	64,5	50,0	23,5	34,8	67,9 < t < 15	135°	
	A-B-H-G	66,0	54,0	24,0	37,6	76,7	180°	
Onda longitudinal 2 (LW2)	A-B-A	86,0	0,0	31,3	0,0	46,3	0°	Onda longitudinal gerada em A que viaja somente pelo acrílico.
	A-B-D-C	86,8	0,0	31,6	0,0	46,6	45°	
	A-B-D-F-E	130,0	0,0	47,4	0,0	62,4	135°	
	A-B-D-F-H-G	155,5	0,0	56,7	0,0	71,7	180°	
	A-B-D-F-H-B-A	262,1	0,0	95,6	0,0	110,6	0°	
Onda transversal 1 (SW1)	B-A	43,0	108,0	46,4	75,3	136,7	0°	Onda transversal gerada na interface B pelas ondas longitudinais.

A parte da onda que interessa é apenas aquela que passou pelo fluido e, portanto, as demais ondas ou parcelas podem ser eliminadas. Dos caminhos acústicos estudados para todos os sensores, somente aquele identificado como LW1 (porção da onda longitudinal que atravessa o escoamento) corresponde à porção da onda que efetivamente interage com o escoamento.

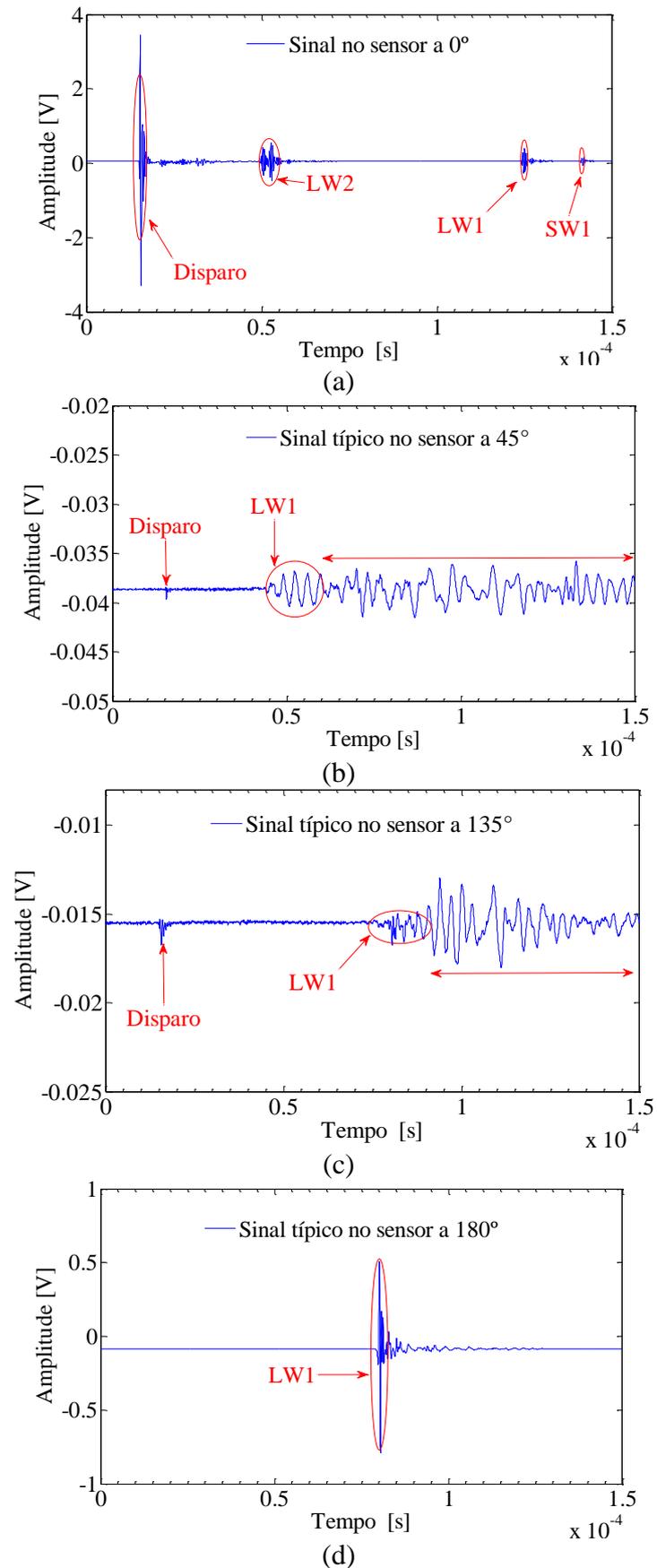


Figura B.2. Sinais típicos nos quatro transdutores de 2,25 MHz a (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , (c)  $135^\circ$  e (d)  $180^\circ$  em meio contínuo óleo.

As demais ondas, portanto, transitam apenas pelo acrílico e foram descartadas no processamento dos sinais. Além de reduzir o tempo computacional, o descarte destas ondas reduz o ruído inerente ao sistema de aquisição e outras interferências causadas pela superposição de ondas.

A Figura B.2a mostra a identificação dos eventos relacionados ao disparo, reflexão pela interface tubulação/líquido (LW1) e as ondas cisalhantes geradas pela chegada das ondas longitudinais (SW1) no sensor a  $0^\circ$ . No sensor a  $180^\circ$  (Figura B.2d), a onda longitudinal que atravessa a mistura é facilmente identificada (LW1), podendo fornecer informações importantes sobre a atenuação acústica na mistura. Observa-se ainda a existência de uma onda cisalhante gerada pela passagem da onda longitudinal pela interface oposta da tubulação (trajetória A-B-H-G). Nos sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$ , mostrados na Figura B.2b e na Figura B.2c, respectivamente, as janelas de atividade se estendem ao longo de toda a seta vermelha a partir de  $\sim 50 \mu\text{s}$  no sensor a  $45^\circ$  e a partir de  $\sim 70 \mu\text{s}$  no sensor a  $135^\circ$ . Isto se deve ao fato de que as porções dos sinais relevantes para a medição multifásica referem-se à energia que atinge estes transdutores por espalhamento acústico na mistura, não havendo, portanto, a necessidade de se considerar as demais partes dos sinais.

## B.2. IDENTIFICAÇÃO DAS JANELAS DE ATIVIDADE EM TUBULAÇÃO DE AÇO

Seguindo o mesmo procedimento utilizado para a tubulação de acrílico, utilizou-se o tempo de trânsito para definir as janelas de atividade para uma tubulação de aço 1020, de diâmetro interno 54 mm (2") e espessura da parede 3 mm. A Tabela B.3 mostra o tempo de trânsito da onda sonora nos diversos caminhos representados na Figura B.1 para o caso desta tubulação de aço.

Entretanto, a identificação das interfaces e diferentes ondas no sinal revelou-se mais difícil do que no caso da tubulação em acrílico. A Figura B.3 mostra os sinais típicos nos quatro sensores posicionados na tubulação de aço. O grande pico negativo próximo de  $10 \mu\text{s}$  em todos os gráficos, exceto no gráfico referente ao sensor a  $0^\circ$  (Figura B.3a), representa o instante do disparo pelo pulsador (*trig*) e marca o instante que o pulso ultrassônico deixa o sensor emissor. No sensor a  $0^\circ$  (Figura B.3a), devido às múltiplas reflexões no adaptador e na interface tubulação/mistura, não foi possível identificar o pico referente à reflexão na interface aço/óleo (Figura B.3a). Neste caso, foram observadas múltiplas reflexões e superposições de ondas longitudinais e transversais, principalmente nos sensores a  $0^\circ$  e  $45^\circ$ .

Tabela B.3. Principais caminhos seguidos pela onda e o respectivo tempo de trânsito para tubulação em aço 1020 e fase contínua óleo USP.

	Caminhos	Aço [mm]	Óleo [mm]	Tempo trânsito no aço [ $\mu$ s]	Tempo trânsito no óleo [ $\mu$ s]	Tempo trânsito total [ $\mu$ s]	Transdutor ultrassônico	Observações
Onda longitudinal 1 (LW1)	A-B-H-B-A	26,0	108,0	4,4	75,9	95,4	0°	Onda longitudinal gerada em A que interage com o escoamento
	A-B-Escoam.-D-C	58,4	0,0	9,9	0,0	24,9 < t < 95,0	45°	
	A-B-Escoam.-F-E	34,5	21,0	5,9	14,8	35,6 < t < 90,0	135°	
	A-B-H-G	36,0	54,0	6,1	38,0	59,1	180°	
Onda longitudinal 2 (LW2)	A-B-A	46,0	0,0	7,8	0,0	22,8	0°	Onda longitudinal gerada em A que viaja somente pelo aço.
	A-B-D-C	58,4	0,0	9,9	0,0	24,9	45°	
	A-B-D-F-E	103,2	0,0	17,5	0,0	32,5	135°	
	A-B-D-F-H-G	125,5	0,0	21,3	0,0	36,3	180°	
	A-B-D-F-H-B-A	213,1	0,0	36,2	0,0	51,2	0°	
Onda transversal I (SW1)	B-A	46,0	0,0	7,8	0,00	22,81	0°	Onda transversal gerada na interface B pelas ondas longitudinais.

Nos sensores a 135° e 180° (Figura B.3c e Figura B.3d, respectivamente) é possível identificar a porção longitudinal da onda que atravessa a mistura com o auxílio da Tabela B.3. No sensor a 0° (Figura B.3a), devido às múltiplas reflexões no adaptador e na interface tubulação/mistura, não foi possível identificar o pico referente à reflexão na interface aço/óleo (Figura B.3a). Neste caso, foram observadas múltiplas reflexões e superposições de ondas longitudinais e transversais, principalmente nos sensores a 0° e 45°. Nos sensores a 135° e 180° (Figura B.3c e Figura B.3d, respectivamente) é possível identificar a porção longitudinal da onda que atravessa a mistura com o auxílio da Tabela B.3.

Deve-se enfatizar a grande atenuação causada pela parede de aço comparada à atenuação causada pela parede de acrílico. Por exemplo, a amplitude máxima da onda que atinge o transdutor a 180° para a tubulação de aço é 0,01 mV (Figura B.3d) enquanto para a tubulação em acrílico este valor é 0,5 mV.

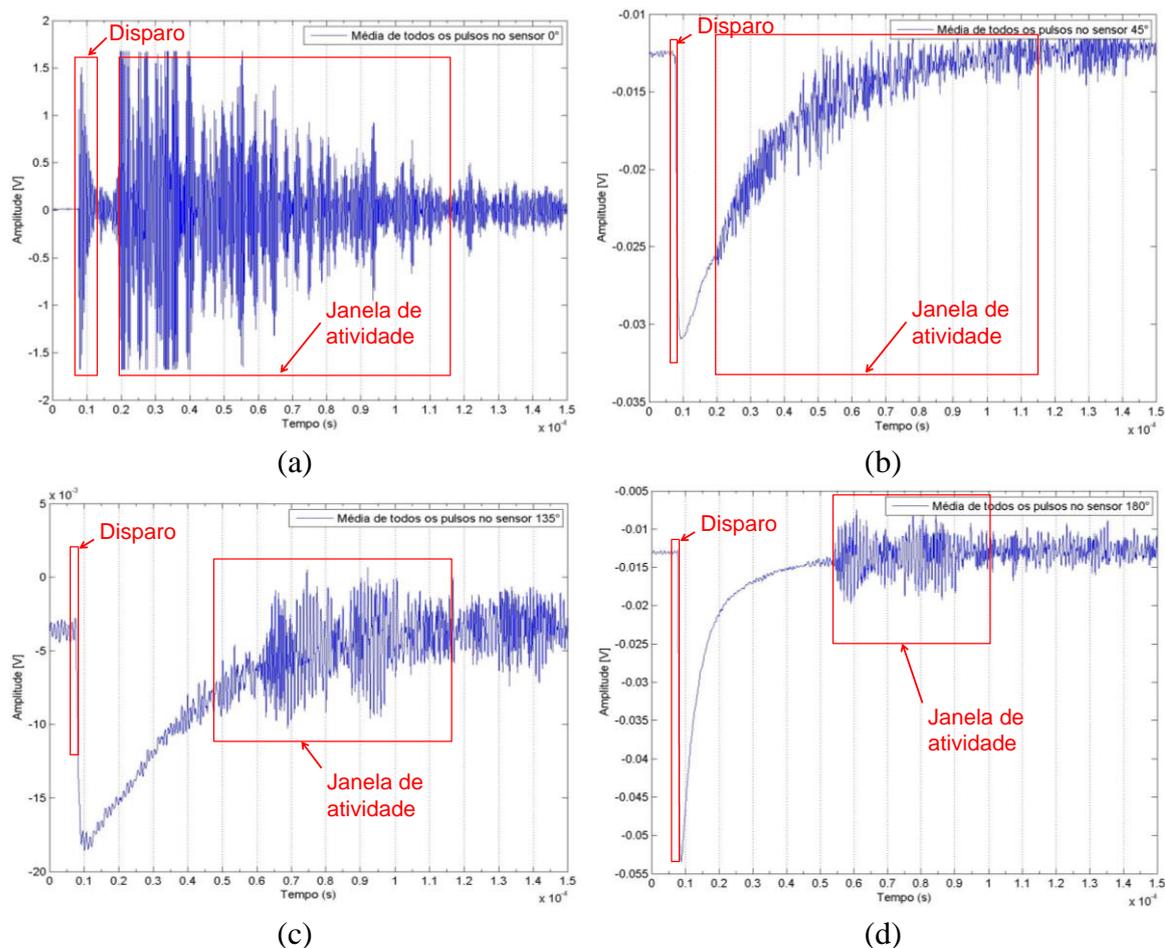


Figura B.3. Definição das janelas de atividade nos transdutores de 2,25 MHz em tubulação de aço contendo óleo USP como fase contínua.

Por outro lado, observa-se no sensor a  $0^\circ$  que uma grande quantidade de energia é refletida na interface aço/óleo, bem maior do que na interface acrílico/óleo. Estes fenômenos ocorrem devido principalmente às fortes reflexões nas interfaces aço/líquido e estão de acordo com os dados na Tabela A.2. O coeficiente de transmissão nas interfaces aço/óleo é apenas 0,009 enquanto, para as interfaces acrílico/óleo, o coeficiente é 0,604.

Testes também foram feitos com sensores de frequência nominal 1 MHz para fins de comparação com os sensores de 2,25 MHz. Este estudo foi motivado pelo fato de que quanto maior a frequência da onda, maior sua atenuação ao se propagar pelo material ( $\alpha \sim \omega^2$ ). De forma geral, para experimentos em tubulações de aço, os sinais nos sensores de 1 MHz apresentaram menos ruídos do que nos sensores de 2,25 MHz (Figura B.4). Nos sensores de 1 MHz a  $45^\circ$  e  $135^\circ$  (Figura B.4c e d), as amplitudes máximas correspondiam respectivamente a  $\sim \pm 0,04$  V e  $\pm 0,02$  V; para os sensores de 2,25 MHz, estes valores foram de  $\sim \pm 0,005$  em ambos os sensores. Todavia, as correlação entre a razão de energia e a FVG foram melhores para sensores de 2,25 MHz.

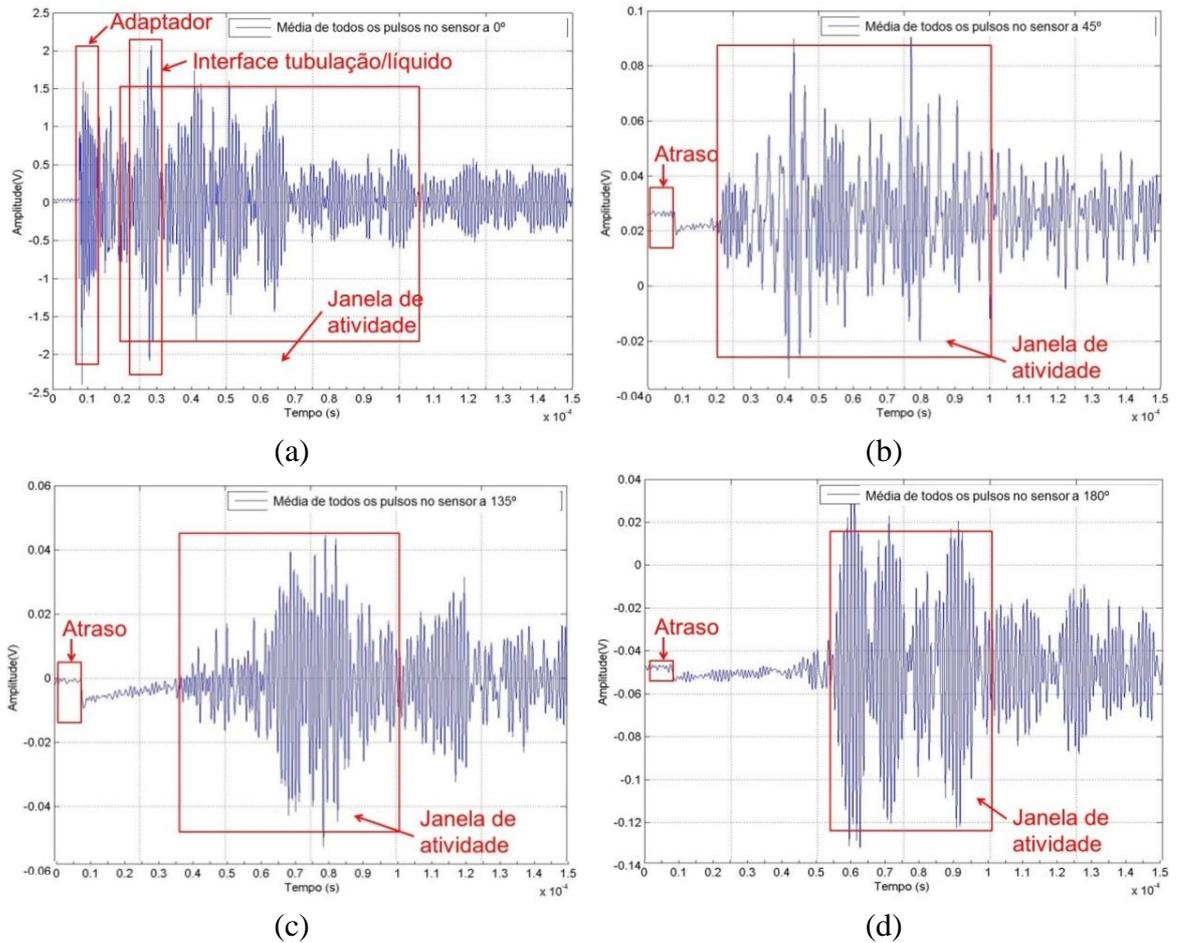


Figura B.4. Definição das janelas de atividade nos transdutores de 1 MHz a em tubulação de aço contendo óleo USP.

## APÊNDICE C

### C. ANÁLISE DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS NA MONTAGEM SIMPLIFICADA BCS

Primeiramente foram identificadas as trajetórias possíveis de propagação da onda pelo aparato ultrassônico (Figura C.1) e os respectivos tempos de trânsito com base nas velocidades de propagação da Tabela A.1.

Os principais caminhos acústicos e o respectivo tempo de trânsito para cada sensor são mostrados na Tabela C.1. A partir das informações da Tabela C.1 foram identificadas as janelas de atividade e os eventos nos sinais ultrassônicos que carregam informações sobre a topologia e concentração das fases na mistura (Figura C.2 a Figura C.5).

Antes de identificar os sinais refletidos pelas laterais da tubulação e pela barra de aço central, foram adquiridos sinais sem esta barra, a fim de garantir a correta identificação dos picos e das janelas de atividade. A Figura C.2 mostra claramente o pico refletido pela barra central de aço e pelas laterais da tubulação no sensor a  $0^\circ$ , permitindo a identificação da janela de atividade para este sensor.

A Figura C.4 também mostra um aumento da atividade ultrassônica no sensor a  $135^\circ$  com a presença da barra de aço e com o aumento da FVG na mistura. A Figura C.5 mostra que no sensor a  $180^\circ$  houve uma aceleração da onda em relação à mistura sem barra de aço central, além de uma atenuação significativa do sinal ( $\pm 4$  V para  $\pm 0,09$  V).

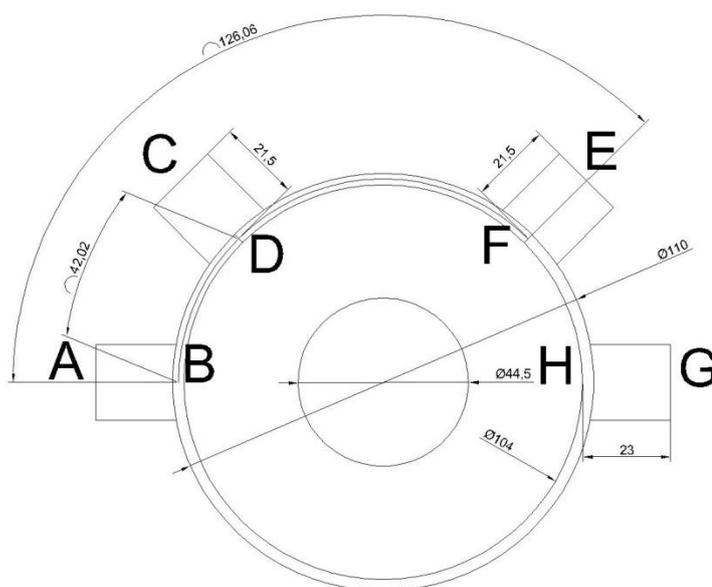


Figura C.1. Dimensões e trajetórias de propagação da onda ultrassônica usadas para calcular o tempo de trânsito na montagem auxiliar vertical de BCS.

Tabela C.1. Principais caminhos seguidos pela onda e o respectivo tempo de trânsito considerando a barra de aço central, tubulação de acrílico e fase contínua óleo USP descritos na Figura C.1.

Tipos de onda	Trajetória	Sensor	Distância percorrida [mm]			Tempo de trânsito [μs]				Observações
			Acrílico	Água	Barra central	Acrílico	Água	Barra central	Total	
Longitudinal 1 [LW1]	A-B-barra B-A	0°	46,0	59,5	0,0	16,8	40,2	0,0	72,1	Onda longitudinal gerada em A que interage com o escoamento
	A-B-H-B-A	0°	46,0	119,0	89,0	16,8	80,4	15,1	127,4	
	A-B-barra D-C	45°	46,0	59,5	0,00	16,8	t > 40,2	0,00	t > 72,1	
	A-B-barra-F-E	135°	46,0	61,0	42,8	16,8	t > 41,2	t > 7,3	t > 80,3	
	A-B-H-G	180°	46,0	59,5	44,5	16,8	40,2	7,6	79,6	
Longitudinal 2 [LW2]	A-B-A	0°	46,0	0,0	0,0	16,8	0,0	0,0	31,8	Onda longitudinal gerada em A que viaja só pelo acrílico
	A-B-D-C	45°	86,5	0,0	0,0	31,7	0,0	0,0	46,7	
	A-B-D-F-E	135°	170,6	0,0	0,0	62,5	0,0	0,0	77,5	
	A-B-D-F-H-G	180°	209,4	0,0	0,0	76,7	0,0	0,0	91,7	
Transversal 1 [SW1]	B-A	0°	23,0	0,0	0,0	8,4	0,0	0,0	87,4	Onda transversal gerada na interf. B pela onda longitud. LW1 da barra.

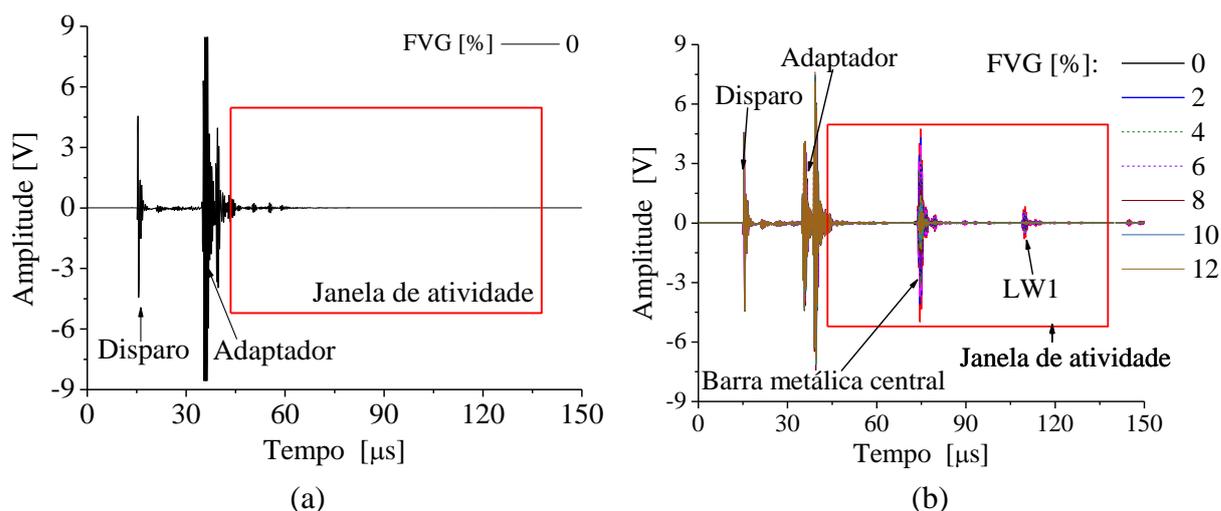


Figura C.2. Identificação das janelas de atividade nos sinais ultrassônicos referentes ao sensor a 0° (a) sem a barra central de aço e (b) com a barra.

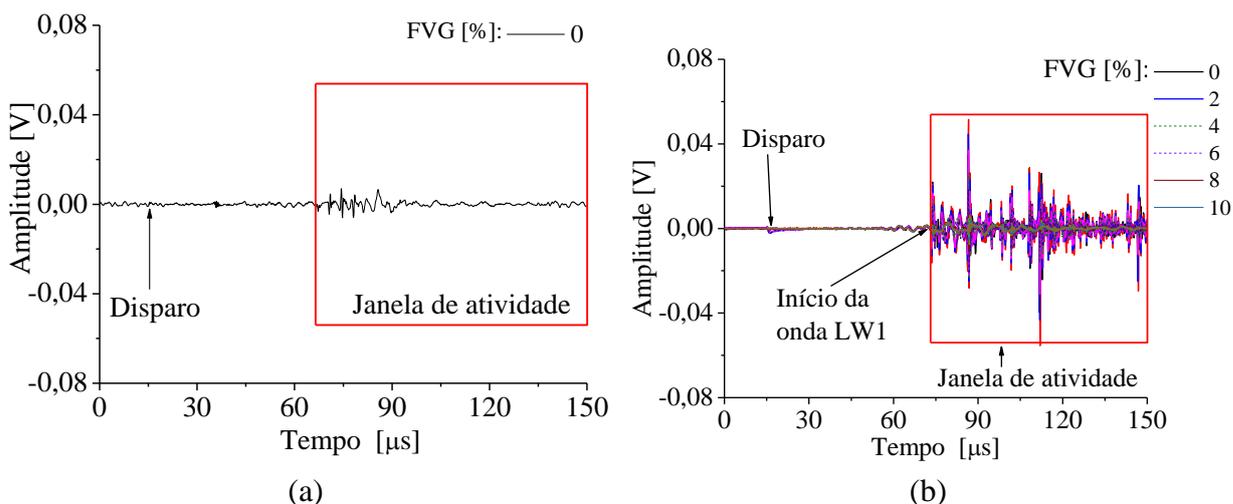


Figura C.3. Identificação das janelas de atividade nos sinais ultrassônicos referentes aos sensores a  $45^\circ$  (a) sem a barra central de aço e (b) com a barra.

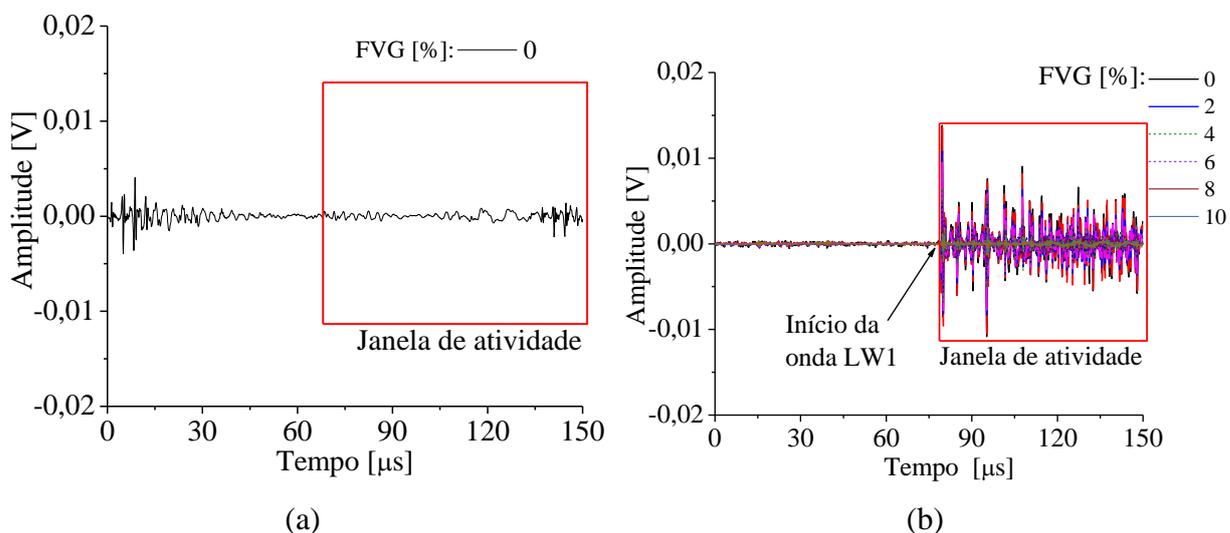


Figura C.4. Identificação das janelas de atividade nos sinais ultrassônicos referentes aos sensores a  $135^\circ$  (a) sem a barra central de aço e (b) com a barra.

Concentrando-se doravante somente nestas regiões de interesse, é possível diminuir o tempo gasto em processamento dos sinais e o espaço de memória requerido para armazená-los. Para fins de medição do escoamento multifásico, só interessam os picos referentes à onda longitudinal LW1, pois somente ela atravessa os fluidos contidos no espaço anular. Nem a onda longitudinal LW2 nem a onda transversal SW1 trazem em si qualquer informação sobre o escoamento e, a rigor, deveriam ser eliminadas dos sinais acústicos. Todavia, nem sempre isto é possível, pois algumas vezes ocorre a superposição da onda legítima LW1 com as ondas espúrias LW2 e SW1.

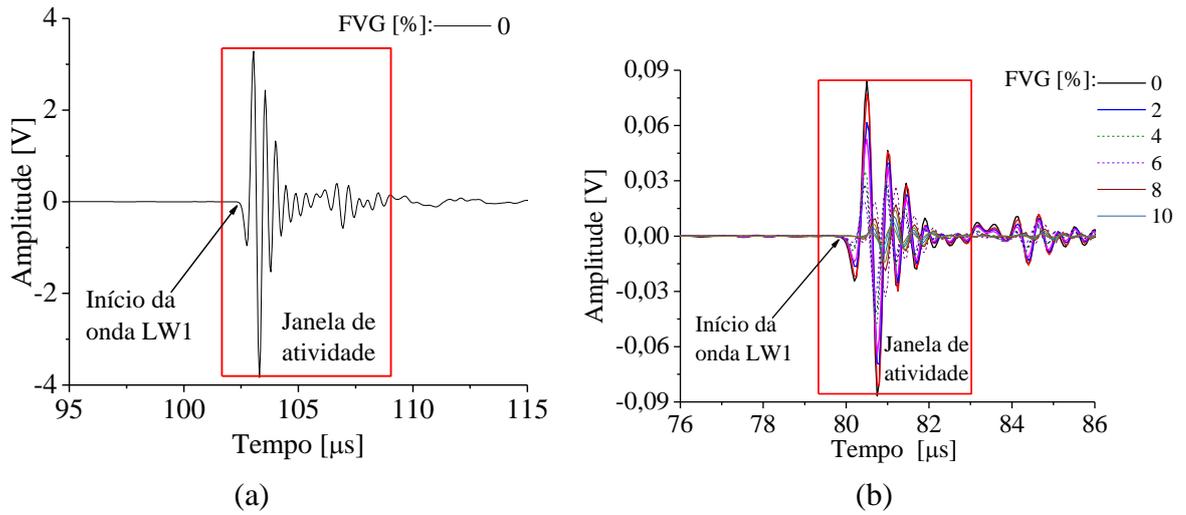


Figura C.5. Identificação das janelas de atividade nos sinais ultrassônicos referentes aos sensores a 180° (a) sem a barra central de aço e (b) com a barra.

## APÊNDICE D

### D. ANÁLISE DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS NO CONJUNTO BCS HORIZONTAL

Inicialmente foi feita uma tentativa de utilizar a técnica ultrassônica instalando os transdutores diretamente na carcaça metálica da bomba. Entretanto, houve uma atenuação excessiva devido à grande espessura da parede de aço, 14 mm, e ao baixo índice de transmissão nas interfaces aço/líquido ( $T \sim 1,5\%$ ), conforme a Tabela A.2. A Figura D.1 mostra a baixa amplitude do sinal transmitido ao sensor a  $45^\circ$  instalados diretamente na carcaça metálica. Estes sinais se referem a somente fluido água como fase contínua, rotação do eixo 1800 rpm, e 2,25 MHz (Figura D.1a) e 1 MHz (Figura D.1b) respectivamente.

Da mesma forma que nos demais experimentos, inicialmente foram identificadas as diversas trajetórias da onda pelo aparato ultrassônico instalado no prolongador e calculados o tempo de trânsito e as janelas de atividade com base nas dimensões da Figura D.2. A trajetória da onda e o respectivo tempo de trânsito em cada sensor são mostrados na Tabela D.1. Este estudo auxiliou na identificação dos eventos nos sinais ultrassônicos e eliminação da parte dos sinais que não transmitiam informações acerca dos parâmetros hidrodinâmicos do escoamento.

A correta delimitação das janelas de atividade pode ser comprovada pelo fato de observar-se uma mudança da amplitude do sinal nesta região ao modificar a FVG na mistura. A Figura D.3d, referente ao transdutor a  $180^\circ$ , por exemplo, mostra que a amplitude da onda transmitida diminui com o aumento da FVG na mistura.

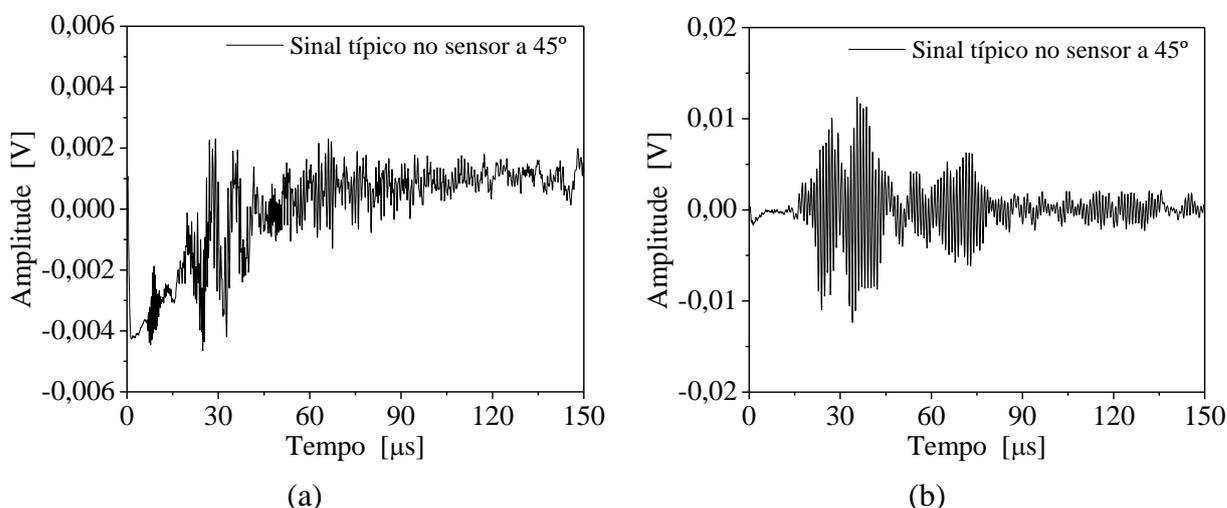


Figura D.1. Sinal típico no sensor a  $45^\circ$  instalado diretamente na carcaça metálica da bomba: (a) 2,25 MHz e (b) 1 MHz.

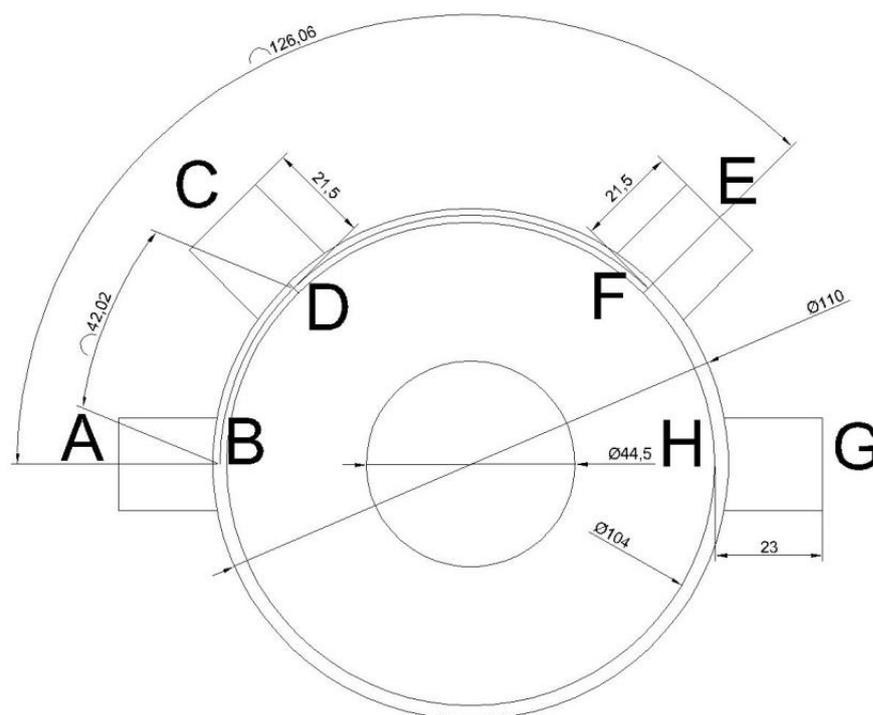


Figura D.2. Dimensões e trajetórias de propagação da onda ultrassônica no prolongador do conjunto BCS horizontal.

Tabela D.1. Principais caminhos seguidos pela onda e o respectivo tempo de trânsito..

Tipos de onda	Trajetória	Sensor	Distância percorrida [mm]			Tempo de trânsito [µs]				Observações
			Poliprop.	Água	Eixo central	Poliprop.	Água	Eixo central	Total	
Longitudinal 1 [LW1]	A-B-eixo-B-A	0°	46,0	59,5	0,0	16,8	40,2	0,0	72,1	Onda longitudinal gerada em A que interage com o escoamento
	A-B-H-B-A	0°	46,0	119,0	89,0	16,8	80,4	15,1	127,4	
	A-B-eixo-D-C	45°	46,0	59,5	0,00	16,8	t > 40,2	0,00	t > 72,1	
	A-B-eixo-F-E	135°	46,0	61,0	42,8	16,8	t > 41,2	t > 7,3	t > 80,3	
	A-B-H-G	180°	46,0	59,5	44,5	16,8	40,2	7,6	79,6	
Longitudinal 2 [LW2]	A-B-A	0°	46,0	0,0	0,0	16,8	0,0	0,0	31,8	Onda longitudinal gerada em A que viaja só pelo poliprop
	A-B-D-C	45°	86,5	0,0	0,0	31,7	0,0	0,0	46,7	
	A-B-D-F-E	135°	170,6	0,0	0,0	62,5	0,0	0,0	77,5	
	A-B-D-F-H-G	180°	209,4	0,0	0,0	76,7	0,0	0,0	91,7	
Transversal 1 [SW1]	B-A	0°	23,0	0,0	0,0	8,4	0,0	0,0	87,4	Onda transv. gerada na interf. B pela onda longitudinal LW1.

Concentrando-se somente nestas regiões de interesse, é possível diminuir o tempo gasto em processamento dos sinais e o espaço de memória requerido para armazená-los. Conforme dito anteriormente, para fins de medição do escoamento multifásico, só interessam os picos referentes à onda longitudinal LW1, pois somente ela atravessa de alguma forma os fluidos contidos no espaço anular. Nem a onda longitudinal LW2 nem a onda transversal SW1 trazem em si qualquer informação sobre o escoamento e, a rigor, deveriam ser eliminadas dos sinais acústicos. Todavia, nem sempre isto é possível, pois algumas vezes ocorre a superposição da onda legítima LW1 com as ondas espúrias LW2 e SW1.

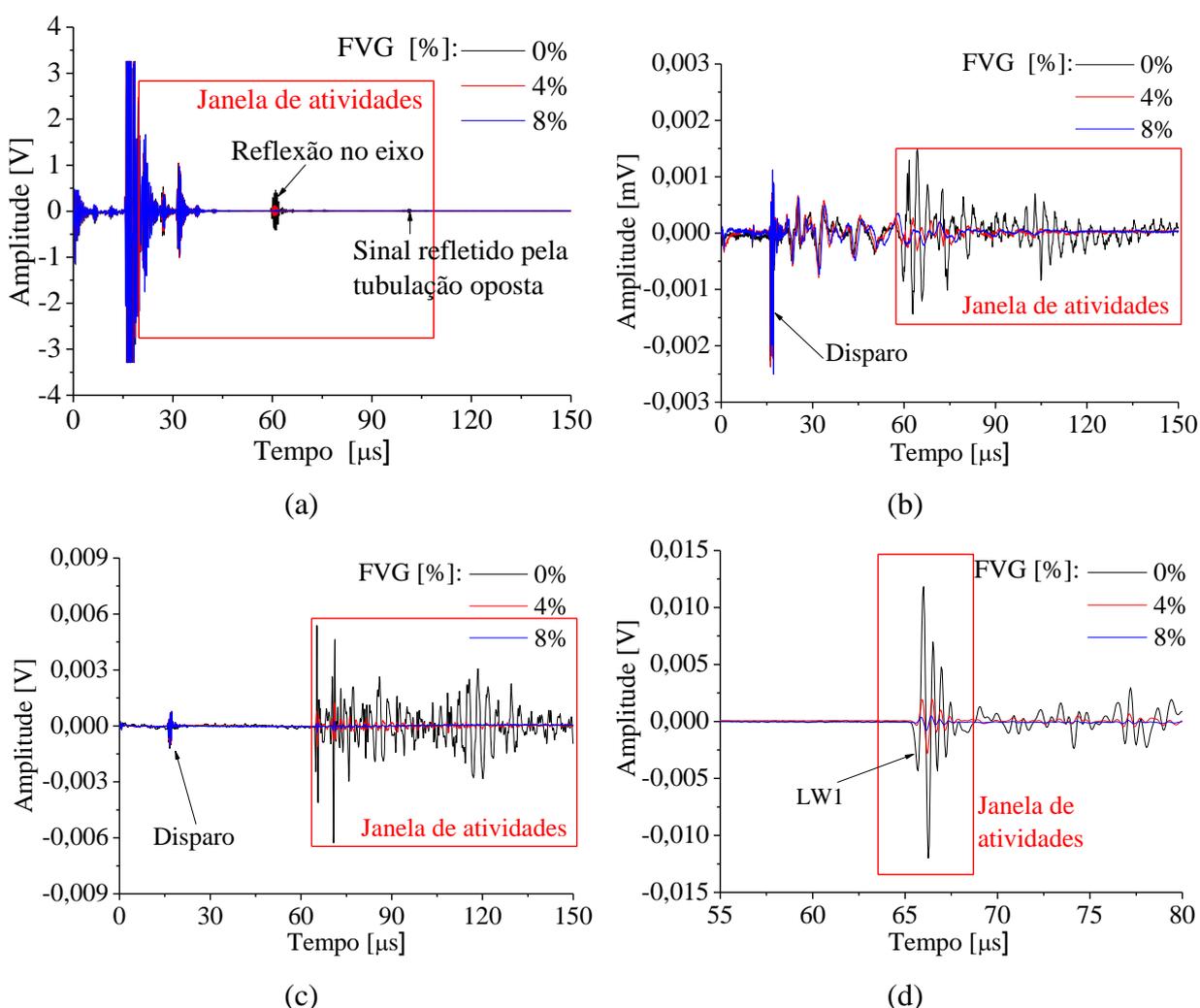


Figura D.3. Sinais típicos e identificação das janelas de atividades nos quatro sensores posicionados a (a) 0°, (b) 45°, (c) 135° e (d) 180° em volta do prolongador de polipropileno na entrada da bomba.

## ANEXO A

### A. PROPRIEDADES ACÚSTICAS DE MATERIAIS<sup>11</sup>

Material	Velocidade longitudinal [m/s]	Velocidade transversal [m/s]	Impedância acústica [Kg/m <sup>2</sup> s x 10 <sup>6</sup> ]
Água 20 °C	1.480	—	1,48
Aço 1020	5.890	3.240	45,63
Aço 302	5.660	3.120	45,45
Aço 4340	5.850	3.240	45,63
Aço Inox 347	5.740	3.090	45,40
Acrílico (Perspex)	2.730	1.430	3,22
Alumínio	6.320	3.130	17,06
Berílio	12.900	8.880	23,5
Cádmio	2.780	1.500	24,02
Chumbo	2.160	700	24,49
Cobre	4.660	2.260	41,61
Glicerina	1.920	—	2,42
Latão	4.430	2.120	37,3
Manganês	4.660	2.350	34,44
Mercúrio	1.450	—	19,66
Molibdênio	6.250	3.350	63,75
Níquel puro	5.630	2.960	49,99
Óleo de motor(SAE 20)	1.740	—	1,51
Ouro	3.240	1.200	62,6
Platina	3.960	1.670	84,74
Poliamida (lenta)	2.200	1.100	0,40
Poliamida (rápida)	2.600	1.200	3,10
Poliestireno	2.340	—	2,47
Prata	3.600	1.590	37,76
PVC	2.395	1.060	3,35
Titânio 150A	6.100	3.120	27,69
Tungstênio	5.180	2.870	99,72
Urânio	3.370	1.980	63,02
Zinco	4.170	2.410	29,61
Zircônio	4.650	2.250	30,13

<sup>11</sup>Retirado de (Birks 1991)*apud*(Panametrics-NDT 2011).

## ANEXO B

### B. DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DO FILME DE LÍQUIDO

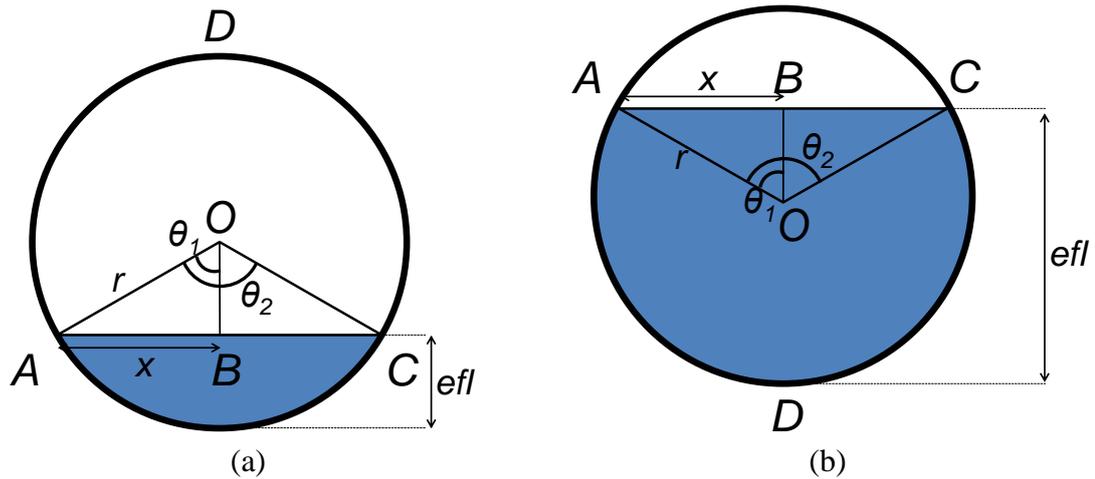


Figura B.1. Representação das variáveis do modelo considerando (a) espessura do filme de líquido menor do que o raio da tubulação e (b) espessura do filme de líquido maior ou igual ao raio da tubulação.

#### 1) Primeira condição: $efl < r$

Neste caso, se a espessura do filme de líquido for menor que o raio interno da tubulação (Figura B.1a), a área ocupada pelo gás em um dado instante pode ser calculada pelo somatório da área do triângulo AOC com a área do semicírculo ADCOA.

$$A_{BA} = A_{tri} + A_{arco} \quad (B.1)$$

$$x = \sqrt{r^2 - (r - efl)^2} \quad (B.2)$$

$$A_{tri} = 2 \times \frac{x \times (r - efl)}{2} \quad (B.3)$$

Na região do círculo, o ângulo  $\hat{A}OB$  é dada por:

$$\theta_1 = \arccos \left( \frac{r - efl}{r} \right) \quad (B.4)$$

Logo, o ângulo  $\hat{A}\hat{O}\hat{C}$  e a área do círculo são dados respectivamente por

$$\theta_2 = 2 \times \theta_1 \quad (\text{B.5})$$

$$A_{arco} = \pi \times r^2 \times \left( \frac{360 - \theta_2}{360} \right) \quad (\text{B.6})$$

Ficando a área total ocupada pelo gás em função somente das da espessura do filme de líquido e do raio da tubulação

$$A_{BA} = \left[ \sqrt{r^2 - (r - efl)^2} \times (r - efl) \right] + \left\{ \pi \times r^2 \times \left( \frac{360 - 2 \times \left[ \arccos \left( \frac{r - efl}{r} \right) \right]}{360} \right) \right\} \quad (\text{B.7})$$

1) *Segunda condição:  $efl > r$  ou  $efl = r$*

Para o caso onde a espessura do filme de líquido seja maior do que o raio da tubulação (Figura B.1b), a área ocupada pelo gás corresponde à área total da tubulação menos a área ocupada pelo líquido, correspondendo ao somatório da área do triângulo AOC e do semicírculo ADCOA

$$A_{BA} = (\pi \times r^2) - A_{tri} - A_{arco} \quad (\text{B.8})$$

$$x = \sqrt{r^2 - (efl - r)^2} \quad (\text{B.9})$$

$$A_{tri} = 2 \times \frac{x \times (efl - r)}{2} \quad (\text{B.10})$$

Com relação à área do semicírculo ADCOA, o ângulo formado entre a hipotenusa e o cateto OB do triângulo AOB é dada por

$$\theta_1 = \arccos \left( \frac{efl - r}{r} \right) \quad (\text{B.11})$$

Logo, o ângulo  $\hat{A}\hat{O}\hat{C}$  e a área do semicírculo são dados respectivamente por

$$\theta_2 = 2 \times \theta_1 \quad (\text{B.12})$$

$$A_{arco} = \pi \times r^2 \times \left( \frac{360 - \theta_2}{360} \right) \quad (\text{B.13})$$

e a área total ocupada pelo gás equivalendo a

$$A_{BA} = (\pi \times r^2) - \left[ \sqrt{r^2 - (efl - r)^2} \times (efl - r) \right] - \left\{ \pi \times r^2 \times \left[ \frac{360 - 2 \times \arccos \left( \frac{efl - r}{r} \right)}{360} \right] \right\} \quad (\text{B.14})$$