

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

**Maurício de Melo Freire Figueiredo**

**Desenvolvimento de uma técnica baseada em medidas ultrassônicas e redes neurais para a identificação do padrão de escoamento e determinação da fração volumétrica de gás de escoamentos multifásicos da indústria petrolífera**

**Itajubá, fevereiro de 2016**

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

**Maurício de Melo Freire Figueiredo**

**Desenvolvimento de uma técnica baseada em medidas ultrassônicas e redes neurais para a identificação do padrão de escoamento e determinação da fração volumétrica de gás de escoamentos multifásicos da indústria petrolífera**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Conversão de Energia**

**Orientador: Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho  
Coorientador: Dr. José Luiz Gonçalves**

**Itajubá, fevereiro de 2016**

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

**Maurício de Melo Freire Figueiredo**

**Desenvolvimento de uma técnica baseada em medidas ultrassônicas e redes neurais para a identificação do padrão de escoamento e determinação da fração volumétrica de gás de escoamentos multifásicos da indústria petrolífera**

**Dissertação aprovada por banca examinadora em 01 de fevereiro de 2016, conferindo ao autor o título de Mestre em Engenharia Mecânica.**

**Banca Examinadora:**

Dr. Valdir Estevam – PETROBRAS

Dra. Ana Maria Frattini Fileti- FEQ/UNICAMP

Dr. Luiz Antonio Alcântara Pereira – UNIFEI

Dr. José Luiz Gonçalves- PRH16/UNIFEI

Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho – UNIFEI

**Itajubá, fevereiro de 2016**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria primeiramente de agradecer aos meus pais, José Marcelo Freire Figueiredo e Rita de Cássia Melo Freire Figueiredo, pelo amor, dedicação e esforço despendido na minha formação tanto profissional quanto pessoal.

À minha companheira e parceira de todos os momentos, Fernanda Barbosa Figueiredo, pelo amor e compreensão durante esta importante fase da minha vida.

Ao meu orientador Professor Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho pela orientação e dedicação para a boa execução deste trabalho e ensinamentos.

Ao meu coorientador Dr. José Luiz Gonçalves pelo apoio, ensinamentos, sugestões e discussões.

Ao Eng. Dr. Valdir Estevam (PETROBRAS) pelo esforço despendido para acompanhar a execução deste trabalho e pelos valiosos conselhos.

À Professora Dra. Ana Maria Frattini Fileti (FEQ-UNICAMP) por estar sempre presente, tirando dúvidas e transmitindo ensinamentos valiosos em relação às redes neurais.

Ao LabPetro-UNICAMP por fornecer as amostras de petróleo, auxiliar na fabricação das montagens experimentais e por realizar as medições das propriedades físicas das amostras.

Finalmente, ao programa do Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) de bolsas de mestrado que, por meio do Programa de Recursos Humanos 16 – PRH16, forneceu a bolsa de auxílio à pesquisa.

## RESUMO

FIGUEIREDO, Maurício M. F. *Desenvolvimento de uma técnica baseada em medidas ultrassônicas e redes neurais para a identificação do padrão de escoamento e determinação da fração volumétrica de gás de escoamentos multifásicos da indústria petrolífera*. 2016. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Conversão de Energia). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Na indústria petrolífera, o escoamento a jusante do poço é composto de uma grande variedade de hidrocarbonetos e componentes não desejados como água, dióxido de carbono, sais, enxofre e areia. A necessidade de um medidor de vazão multifásico surge quando é necessário ou desejável medir a vazão a montante dos separadores. A técnica ultrassônica preenche muito dos requisitos para medição multifásica, principalmente por ser não intrusiva, não radioativa, robusta e relativamente barata. O inconveniente da técnica ultrassônica, como ocorre com outros medidores multifásicos, é a necessidade de calibração do sinal. Uma solução para esse problema pode ser o uso das redes neurais artificiais (RNAs). Neste contexto, o presente trabalho estudou a técnica ultrassônica associada a RNAs para predição da fração volumétrica de gás (FVG). Para a realização das medições ultrassônicas, projetou-se um protótipo para operar sob condições comumente encontradas na indústria petrolífera. O protótipo foi então testado em laboratório utilizando uma montagem simplificada. Ademais, fez-se um estudo profundo do uso de números adimensionais, calculados a partir de variáveis medidas no cotidiano da indústria petrolífera, associados a RNAs para a previsão da FVG e do padrão de escoamento. Os resultados das RNAs baseadas em números adimensionais foram comparados com resultados de simulações numéricas unidimensionais utilizando o programa computacional OLGA distribuído pela companhia Schlumberger.

**Palavras-chave:** Escoamento multifásico; ultrassom; indústria petrolífera; grupos adimensionais; redes neurais artificiais.

## ABSTRACT

FIGUEIREDO, Maurício M. F. *Development of a technique based on ultrasonic measurements and neural networks for identification of the flow pattern and determination of the gas volume fraction of multiphase flows in the oil industry*. 2016. 139p. Dissertation (M.Sc. in Mechanical Engineering – Energy Conversion). Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá (IEM-UNIFEI, Itajubá, Brazil).

In the oil industry, the well stream often consists of a full range of hydrocarbons and a variety of non-wanted components such as water, carbon dioxide, salts, sulfur, and sand. The need for multiphase flow metering (MFM) arises when it is necessary or desirable to meter the flow upstream of the separators. The ultrasonic technique fulfils many of the requirements for MFM in the oil industry (mainly, non-invasive, non-radiative, robust, and relatively non-expensive) and has the capability to provide the information required. The drawback of current ultrasonic techniques, as is the case with other MFM methods, is the need for prior signal calibration. A broader solution to this issue could be the use of artificial neural networks (ANNs). In this context, the present work focused on the combination of the ultrasonic technique and ANNs for determination of the gas volume fraction (GVF). In order to carry out the ultrasonic measurements, a prototype of an ultrasonic meter was designed for operation under conditions representative of applications in the oil industry. The prototype was then tested in the laboratory using a simplified test rig. Next, an in-depth investigation was carried out on the use of dimensionless numbers calculated from variables in daily practice in the oil industry for input to the ANNs for identification of the flow pattern and determination of the GVF. Finally, the ANNs results using the dimensionless numbers were compared with results from numerical simulations using OLGA software from Schlumberger.

**Keywords:** Multiphase flow; ultrasound; oil industry; dimensionless numbers; artificial neural networks.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 A MEDIÇÃO MULTIFÁSICA .....	1
1.2 A TÉCNICA ULTRASSÔNICA .....	4
1.3 REDES NEURAS ARTIFICIAIS.....	6
1.4 OBJETIVOS .....	7
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>8</b>
2.1 PADRÕES DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS LÍQUIDO-GÁS.....	8
2.1.1 <i>Padrões de escoamentos horizontais e quase horizontais</i> .....	9
2.1.2 <i>Padrões de escoamentos verticais e quase verticais</i> .....	10
2.1.3 <i>Padrões de escoamentos multifásicos</i> .....	12
2.2 O ULTRASSOM.....	12
2.3 CONCEITOS BÁSICOS DE REDES NEURAS .....	16
<b>3. DISPOSITIVOS EXPERIMENTAIS E PROCEDIMENTOS DE TESTE .....</b>	<b>20</b>
3.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS ULTRASSÔNICOS .....	20
3.1.1 <i>Transdutores ultrassônicos</i> .....	20
3.1.2 <i>Sistema de aquisição de dados</i> .....	22
3.1.3 <i>Pulsador</i> .....	23
3.2 MONTAGEM EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA PARA MEDIÇÕES ULTRASSÔNICAS EM MISTURAS LÍQUIDO-GÁS .....	23
3.2.1 <i>Dispositivo Experimental</i> .....	24
3.2.2 <i>Procedimento experimental</i> .....	26
3.2.3 <i>Matriz de testes para misturas petróleo-ar</i> .....	27
3.2.4 <i>Matriz de testes para misturas de soluções aquosas de glicerina e ar</i> .....	29
3.3 CIRCUITO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS UNIFEI.....	31
3.3.1 <i>Dispositivo experimental</i> .....	31
3.3.2 <i>Procedimento experimental</i> .....	33
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE ATENUAÇÃO ACÚSTICA .....</b>	<b>35</b>
4.1 MEDIÇÕES ULTRASSÔNICAS NA MONTAGEM EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA COM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS LÍQUIDO-GÁS.....	35
4.1.1 <i>Misturas bifásica petróleo-ar</i> .....	35
4.1.2 <i>Misturas bifásicas de soluções aquosas de glicerina e ar</i> .....	40
4.1.3 <i>Avaliação geral do efeito das microbolhas sobre as medições multifásicas</i> .....	45
4.2 CIRCUITO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS UNIFEI.....	47
4.2.1 <i>Análise das filmagens rápidas</i> .....	47

4.2.2	<i>Resultados para a tubulação de uma polegada</i> .....	49
4.2.3	<i>Resultados para a tubulação de duas polegadas</i> .....	53
4.2.4	<i>Mecanismos de dissipação acústica</i> .....	56
<b>5.</b>	<b>BANCO DE DADOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS</b> .....	<b>61</b>
5.1	BANCO DE DADOS DA LITERATURA .....	61
5.2	SEPARAÇÃO DOS CONJUNTOS DE DADOS .....	63
5.3	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS UNIDIMENSIONAIS .....	68
<b>6.</b>	<b>REDES NEURAS ARTIFICIAIS</b> .....	<b>72</b>
6.1	REDES NEURAS BASEADA EM MEDIDAS ULTRASSÔNICAS .....	72
6.2	REDES NEURAS BASEADA EM NÚMEROS ADIMENSIONAIS .....	74
6.2.1	<i>Desenvolvimento da RNA de números adimensionais</i> .....	74
6.2.2	<i>Escolha dos grupos adimensionais</i> .....	76
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS DAS REDES NEURAS BASEADAS EM MEDIDAS ULTRASSÔNICAS</b> .....	<b>81</b>
7.1	CIRCUITO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS UNIFEI .....	81
7.2	MISTURAS BIFÁSICAS DE SOLUÇÕES AQUOSAS DE GLICERINA E AR.....	82
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS DAS REDES NEURAS BASEADAS EM NÚMEROS ADIMENSIONAIS</b> .....	<b>87</b>
8.1	RNA DE PREDIÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE GÁS .....	87
8.2	RNA DE PREDIÇÃO DO PADRÃO DE ESCOAMENTO .....	93
8.3	COMPARAÇÃO DAS PREDIÇÕES DAS REDES NEURAS COM OS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	99
<b>9.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>103</b>
9.1	PRINCIPAIS RESULTADOS .....	103
9.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	104
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>106</b>
	<b>Anexo A</b> .....	<b>111</b>
	<b>Anexo B</b> .....	<b>118</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Visão geral de uma planta de produção de óleo e gás. ....	1
Figura 2-1: Padrões de escoamento em diferentes inclinações. ....	8
Figura 2-2: Padrões de escoamentos horizontais e quase horizontais. ....	9
Figura 2-3: Padrões de escoamento verticais e quase verticais. ....	10
Figura 2-4: Desenho esquemático de uma onda acústica longitudinal.....	13
Figura 2-5: Representação esquemática do campo acústico no escoamento: (a) de bolhas dispersas (baixa densidade); (b) de bolhas dispersas (alta densidade); (c) de calotas e bolhas de Taylor incipientes; (d) anular. Fonte: Figueiredo <i>et al.</i> [3].	16
Figura 2-6: Modelo não linear de um neurônio.....	17
Figura 2-7:Arquitetura da RNA perceptron de múltiplas camadas. ....	18
Figura 3-1: Esquema do sistema de medição ultrassônico.....	20
Figura 3-2: Desenho esquemático de um transdutor ultrassônico. ....	21
Figura 3-3: Tipos de transdutores ultrassônicos: (a) Accuscan; (b) Centrascan e (c) Videoscan. ....	21
Figura 3-4: Transdutores ultrassônicos Panametrics Videoscan de 2,25 MHz. ....	22
Figura 3-5: Digitalizador PXIe-1062Q.....	22
Figura 3-6: Gerador de pulsos Panametrics, modelo 5077PR.....	23
Figura 3-7: Vista esquemática da montagem experimental simplificada para teste de misturas bifásicas líquido-gás. ....	24
Figura 3-8: Bico difusor para injeção do ar comprimido. ....	25
Figura 3-9: Vista esquemática da seção transversal do carretel ultrassônico.....	25
Figura 3-10: Fotografia da montagem experimental simplificada para medição de FVG utilizando o carretel ultrassônico. ....	26
Figura 3-11: Procedimento experimental para a montagem simplificada para a medição de FVG. ....	27
Figura 3-12: Transdutor ultrassônico instalado na seção inferior da tubulação (estação 2).....	29
Figura 3-13: Vista esquemática do circuito de testes de escoamentos multifásico (LRF-UNIFEI). ....	33
Figura 4-1: Pontos de controle do transdutor a 180° no protótipo.....	37
Figura 4-2: Pontos de controle do transdutor a 0° no protótipo.....	37
Figura 4-3: Pontos de controle do transdutor a 45° no protótipo.....	37
Figura 4-4: Pontos de controle do transdutor a 135° no protótipo.....	38

Figura 4-5: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 180°.....	39
Figura 4-6: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 0°.....	39
Figura 4-7: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 45°.....	39
Figura 4-8: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 135°.....	40
Figura 4-9: Pontos de controle do transdutor a 0° no protótipo ultrassônico.....	41
Figura 4-10: Pontos de controle do transdutor a 0° na extremidade inferior da tubulação.....	41
Figura 4-11: Pontos de controle do transdutor a 180° no protótipo.....	42
Figura 4-12: Pontos de controle do transdutor a 45° no protótipo.....	42
Figura 4-13: Pontos de controle do transdutor a 135° no protótipo.....	43
Figura 4-14: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 180°.....	44
Figura 4-15: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 0°.....	44
Figura 4-16: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 45°.....	44
Figura 4-17: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 135°.....	45
Figura 4-18: Padrões de escoamento para o escoamento bifásico óleo-ar na tubulação de uma polegada: (a) bolhas dispersas; (b) calotas gasosas; (c) pistonado estável; (d) pistonado instável; (e) agitado; (f) anular.....	48
Figura 4-19: Padrões de escoamento para o escoamento bifásico óleo-ar na tubulação de duas polegadas: (a) pequenas calotas; (b) grandes calotas; (c) pistonado estável; (d) pistonado instável.....	49
Figura 4-20: Razão de energia para o sensor 180° para escoamentos multifásicos na tubulação de uma polegada.....	51
Figura 4-21: Razão de energia para o sensor 0° para escoamentos multifásicos na tubulação de uma polegada.....	51
Figura 4-22: Razão de energia para o sensor 45° para escoamentos multifásicos na tubulação de uma polegada.....	52
Figura 4-23: Razão de energia para o sensor 135° para escoamentos multifásicos na tubulação de uma polegada.....	52
Figura 4-24: Razão de energia para o sensor 180° para escoamentos multifásicos na tubulação de duas polegadas.....	54
Figura 4-25: Razão de energia para o sensor 0° para escoamentos multifásicos na tubulação de duas polegadas.....	55
Figura 4-26: Razão de energia para o sensor 45° para escoamentos multifásicos na tubulação de duas polegadas.....	55

Figura 4-27: Razão de energia para o sensor 135° para escoamentos multifásicos na tubulação de duas polegadas. ....	56
Figura 5-1: Histograma do banco de dados experimentais para as diversas combinações líquido-gás utilizadas. ....	61
Figura 5-2: Histograma das faixas cobertas pelos adimensionais da RNA de predição da FVG para os valores: (a) mínimos; (b) máximos. ....	67
Figura 5-3: Histograma das faixas cobertas pelos adimensionais da RNA de predição do padrão de escoamento para os valores: (a) mínimos; (b) máximos. ....	67
Figura 5-4: Histograma do número de pontos por faixa de FVG para os grupos de treinamento e alvo. ....	68
Figura 5-5: Histograma do número de pontos por padrão de escoamento para os grupos de treinamento e alvo. ....	68
Figura 5-6: Comparação entre simulações numéricas e resultados experimentais para a fração volumétrica de gás. ....	69
Figura 5-7: Comparação entre simulações numéricas e resultados experimentais para o padrão de escoamento. ....	70
Figura 5-8: Histograma do percentual de acertos para FVG: (a) desvio de 10%; (b) 20%. ....	70
Figura 5-9: Histograma do percentual de acertos para os padrões de escoamento. ....	70
Figura 6-1: Entradas e saídas redes neurais. ....	72
Figura 7-1: Predição da FVG da RNA baseada em medidas ultrassônicas para o grupo <i>teste</i> dos dados do circuito de testes multifásicos UNIFEI. ....	82
Figura 7-2: Pontos de controle do transdutor a 0° no protótipo ultrassônico. ....	83
Figura 7-3: Pontos de controle do transdutor a 0° no protótipo ultrassônico após a aplicação do filtro. ....	83
Figura 7-4: Razão de energia do transdutor a 0° no protótipo ultrassônico após a aplicação do filtro. ....	84
Figura 7-5: Razão de energia do transdutor a 45° no protótipo ultrassônico após a aplicação do filtro. ....	84
Figura 7-6: Razão de energia do transdutor a 135° no protótipo ultrassônico após a aplicação do filtro. ....	84
Figura 7-7: Razão de energia do transdutor a 180° no protótipo ultrassônico após a aplicação do filtro. ....	85

Figura 7-8: Predição da FVG para o grupo <i>alvo</i> da RNA baseada em medidas ultrassônicas com quatro sensores.....	85
Figura 7-9: Predição da FVG para o grupo <i>alvo</i> da RNA baseada em medidas ultrassônicas com dois sensores. ....	86
Figura 8-1: Arquitetura da RNA usada com uma camada oculta.....	87
Figura 8-2: Procedimento para redução do número de adimensionais.....	88
Figura 8-3: Predição da FVG do grupo <i>alvo</i> para RNA com oito adimensionais.....	91
Figura 8-4: Predição da FVG do grupo <i>alvo</i> para RNA com sete adimensionais. ....	92
Figura 8-5: Predição da FVG do grupo <i>alvo</i> para RNA com seis adimensionais. ....	92
Figura 8-6: Predição da FVG do grupo <i>alvo</i> para RNA com cinco adimensionais.....	93
Figura 8-7: Predição da FVG do grupo <i>alvo</i> para RNA com cinco adimensionais modificada. ....	93
Figura 8-8: Predição do padrão de escoamento do grupo <i>alvo</i> para RNA com oito adimensionais.....	97
Figura 8-9: Predição do padrão de escoamento do grupo <i>alvo</i> para RNA com sete adimensionais.....	97
Figura 8-10: Predição do padrão de escoamento do grupo <i>alvo</i> para RNA com seis adimensionais.....	98
Figura 8-11: Predição do padrão de escoamento para do grupo <i>alvo</i> para RNA com cinco adimensionais.....	98
Figura 8-12: Gráfico comparativo das predições da RNA de FVG com os resultados das simulações numéricas. ....	100
Figura 8-13: Histograma do percentual de acertos considerando aceitável o desvio de 30% na previsão da FVG usando: (a) RNA; (b) simulações numéricas unidimensionais. ....	100
Figura 8-14: Gráfico comparativo das predições da RNA de padrão de escoamento com os resultados das simulações numéricas.....	101
Figura 8-15: Histograma do percentual de acertos na previsão do padrão de escoamento usando: (a) RNA; (b) simulações numéricas unidimensionais.....	101
Figura A-1: Montagem do carretel ultrassônico entre flanges. ....	113
Figura A-2: Esquema de vedação por O’Ring.....	113
Figura A-3: Direção das tensões sobre a parede de um elemento cilíndrico devido à pressão. ....	114

Figura A-4: Distribuição espacial dos transdutores ultrassônicos.....	116
Figura A-5: Modelo tridimensional do carretel ultrassônico (a) isométrico (b) corte.....	116
Figura A-6: Carretel ultrassônico depois de usinado.....	116
Figura A-7: Projeto de fabricação do carretel ultrassônico. ....	117
Figura B-1: Disposição espacial dos transdutores e indicação dos caminhos acústicos. ....	118
Figura B-2: Janela de atividade para o tratamento dos sinais adquiridos no sensor a 180° na tubulação de duas polegadas (escoamento óleo-ar com 2% de FVG).....	120
Figura B-3: Janela de atividade para o tratamento dos sinais adquiridos no sensor a 0° na tubulação de duas polegadas (escoamento óleo-ar com 2% de FVG).....	120
Figura B-4: Janela de atividade para o tratamento dos sinais adquiridos no sensor a 45° na tubulação de duas polegadas (escoamento óleo-ar com diferentes valores de FVG). ....	120
Figura B-5: Janela de atividade para o tratamento dos sinais adquiridos no sensor a 135° na tubulação de duas polegadas (escoamento óleo-ar com diferentes valores de FVG). ....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1: Classificação de instrumentos e técnicas de medições multifásicas. ....	3
Tabela 3-1: Viscosidades medidas para diferentes proporções de mistura petróleo pesado-óleo diesel. ....	28
Tabela 3-2: Composições e propriedades das fases contínuas utilizadas nos experimentos com petróleo como fase contínua a 20°C. ....	28
Tabela 3-3: Matriz de testes para os experimentos usando petróleo como fase contínua. ....	29
Tabela 3-4: Composições e propriedades físicas dos fluidos utilizados nos experimentos com soluções aquosas de glicerina (T = 21°C). ....	30
Tabela 3-5: Matriz de testes para os experimentos usando soluções aquosas de glicerina como fase contínua. ....	31
Tabela 3-6: Tipos de escoamentos testados no circuito de testes de escoamentos multifásicos (LRF-UNIFEI). ....	34
Tabela 3-7: Condições operacionais dos experimentos realizados no circuito de testes de escoamentos multifásicos (LRF-UNIFEI). ....	34
Tabela 4-1: Dados relativos aos pontos de controle para monitoramento das microbolhas. ....	41
Tabela 4-2: Distribuição do tamanho das partículas para a concentração de 1% w/w de partículas de vidro no óleo mineral. ....	58
Tabela 4-3: Contribuição individual dos mecanismos de absorção acústica para a dissipação total de um pulso ultrassônico de 2,25 MHz. ....	59
Tabela 5-1: Banco de dados de escoamentos horizontais e quase horizontais, com diâmetro interno entre 50 a 60mm e fase líquida óleo. ....	62
Tabela 5-2: Conjuntos de dados para as redes de predição do padrão de escoamento e FVG. ....	63
Tabela 5-3: Faixas dos adimensionais para predição da FVG dos grupos de treinamento e alvo. ....	65
Tabela 5-4: Faixas dos adimensionais para predição do padrão de escoamento dos grupos de treinamento e alvo. ....	66
Tabela 6-1: Grupos adimensionais pertinentes ao presente estudo. ....	78
Tabela 6-2: Grupos adimensionais selecionados preliminarmente para entrada da rede neural. ....	79
Tabela 6-3: Grupos adimensionais utilizados como entradas das redes neurais desenvolvidas por Nakashima [28]. ....	80
Tabela 8-1: Melhor arquitetura da RNA de FVG usada em cada ciclo. ....	89

Tabela 8-2: Pesos da primeira camada oculta da RNA de FVG atribuídos a cada adimensional. .....	89
Tabela 8-3: $R^2$ e SSE das predições da RNA para o conjunto alvo.....	91
Tabela 8-4: Melhor arquitetura da RNA de padrão de escoamento usada em cada ciclo. ....	94
Tabela 8-5: Pesos da primeira camada oculta da RNA de padrão de escoamento atribuídos a cada adimensional.....	95
Tabela 8-6: Percentual de acertos e SSE do conjunto de dados alvo. ....	96
Tabela A-1: Propriedades acústicas de alguns materiais.....	111
Tabela A-2: Índice de reflexão e transmissão do feixe ultrassônico. ....	111
Tabela A-3: Dimensões da tubulação de referência. ....	115
Tabela B-1: Caminhos acústicos e tempos de trânsito para as ondas na tubulação de acrílico de duas polegadas usando óleo mineral como fase contínua.....	122

## SIMBOLOGIA

### Letras Latinas

A	Área da seção transversal do duto	[m <sup>2</sup> ]
A	Parâmetro acústico definido em Atkinson e Kytömaa [1]	[Pa.s.m <sup>-2</sup> ]
A	Parâmetro acústico definido em Isakovich [2]	[-]
a	Raio da partícula ou da bolha	[m]
a	Parâmetro de inclinação da função sigmoide	[-]
b	Viés aplicado aos neurônios da RNA	[-]
B	Parâmetro acústico definido em Atkinson e Kytömaa [1]	[kg.m <sup>-3</sup> ]
c	Velocidade de propagação da onda acústica	[m.s <sup>-1</sup> ]
c <sub>p</sub>	Calor específico à pressão constante	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
d	Diâmetro	[m]
E	Energia do pulso ultrassônico	[V <sup>2</sup> .s]
FVG	Fração volumétrica de gás	[%]
k	Número de onda	[m <sup>-1</sup> ]
k	Condutividade térmica	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
L	Comprimento	[m]
n	Vetor de onda térmico	[m <sup>-1</sup> ]
P	Pressão	[Pa]
p	Pressão acústica instantânea	[Pa]
R	Coefficiente de intensidade de reflexão	[m <sup>2</sup> ]
S	Área total de extinção	[Pa]
S	Tensão mecânica	[Pa]
S <sub>h</sub>	Limite de escoamento do material	[Pa]
t	Espessura da parede da tubulação	[m]
t	Tempo	[s]
T	Coefficiente de intensidade de transmissão acústica	[-]
u	Potencial de ativação dos neurônios das RNAs	[-]
V	Voltagem	[V]
w	Peso das sinapses das RNAs	[-]
x	Entrada da RNA	[-]
y	Saída da RNA	[-]
Z	Impedância acústica característica do meio	[N.s.m <sup>-3</sup> ]

## Letras Gregas

$\alpha$	Coeficiente de absorção acústica	[dB.m <sup>-1</sup> ]
$\beta$	Coeficiente de expansão térmica	[K <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	Coeficiente isentrópico	[-]
$\Gamma$	Área interfacial por unidade de volume	[m <sup>2</sup> .m <sup>-3</sup> ]
$\eta$	Coeficiente de viscosidade de cisalhamento	[Pa.s]
$\theta$	Ângulo	°
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
$\nu$	Fração em volume de partículas	[-]
$\rho$	Massa específica	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\bar{\rho}$	Densidade da suspensão	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho^*$	Parâmetro definido em Atkinson e Kytömaa [1]	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\varphi$	Função de ativação da RNA	-
$\omega$	Frequência angular	[rad.s <sup>-1</sup> ]

## 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, tem-se por objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre medidores multifásicos e redes neurais artificiais (RNA). Espera-se deste modo estabelecer o contexto no qual se insere esta dissertação. As seções a seguir se baseiam no trabalho de Figueiredo *et al.* [3], escrito e publicado como parte deste projeto de mestrado.

### 1.1 A MEDIÇÃO MULTIFÁSICA

Segundo Thomas [4], o petróleo na fase líquida é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e com a cor variando entre o negro e o castanho-claro. O petróleo é constituído basicamente por uma mistura de hidrocarbonetos formados pela decomposição de matéria orgânica. Em um poço de petróleo, hidrocarbonetos na fase líquida e gasosa coexistem. Sendo assim, durante a exploração, configura-se um escoamento multifásico na tubulação a jusante da cabeça de poço (Figura 1-1).

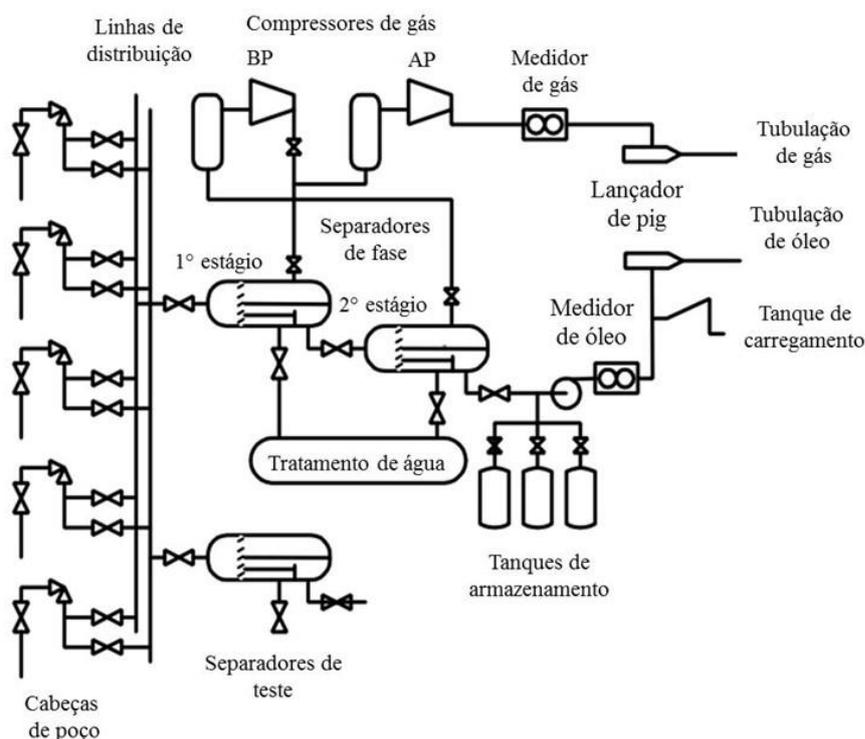


Figura 1-1: Visão geral de uma planta de produção de óleo e gás.  
Fonte: Devold [6].

Na Figura 1-1, apresenta-se um diagrama simplificado de uma planta de produção de óleo e gás. As cabeças de poço à esquerda alimentam os sistemas de teste e de produção. Frequentemente, de acordo com Falcone *et al.* [5], o escoamento a jusante da cabeça de poço será composto de uma grande variedade de hidrocarbonetos e componentes não desejados como

água, dióxido de carbono, sais, enxofre e areia. Esses componentes são separados usando separadores por gravidade. A necessidade de medidores de vazão multifásicos surge quando é necessário medir o escoamento a montante dos separadores. Medidores de vazão multifásicos permitem medir os produtos próximos às cabeças de poço, fornecendo monitoramento contínuo da produção do poço e uma melhor exploração e drenagem do reservatório.

Uma discussão detalhada sobre diferentes instrumentos e técnicas que vêm sendo consideradas para aplicação em medição multifásica pode ser encontrada em Falcone *et al.* [5] e Figueiredo *et al.* [3]. Estes instrumentos e técnicas, bem como os parâmetros de escoamento envolvidos e seus princípios de operação, são apresentados na Tabela 1-1. A coluna “Observações” resume informações encontradas em Falcone *et al.* [5] e Scheers [7] envolvendo a aplicação de técnicas para a medição multifásica. É possível ver que a maioria das técnicas necessita de pesquisa e desenvolvimento adicional antes de ser aplicada como medidor de vazão multifásico.

Segundo Falcone *et al.* [5], a densitometria gama é usada em diversos medidores de vazão multifásicos apesar de requerer rígido controle de segurança tanto na instalação como na operação do equipamento, pois operam com material radioativo. Arora [8] discutiu as vantagens em se utilizar técnicas não radioativas sobre as técnicas radioativas em medições multifásicas. Medidores não radioativos são mais baratos para construir e os gastos operacionais são menores devido aos enormes custos de medidores radioativos associados aos requisitos ambientais, de saúde e de segurança. Outra vantagem é que medidores não radioativos compactos podem ser utilizados em testes preliminares de produção de poços durante a fase de perfuração, não havendo a necessidade de atender a requisitos especiais de segurança associados à medidores radioativos.

Medidores por impedância, de acordo com Falcone *et al.* [5], vêm sendo utilizados desde 1960. Esta técnica tem sido utilizada também em medidores comerciais conforme descrito em Gonçalves *et al.* [9] e Scheers *et al.* [7]. No entanto, conforme Falcone *et al.* [5], a técnica por impedância é muito sensível ao padrão de escoamento e está sujeita ao problema de inversão das fases, por exemplo, quando a fase contínua muda de óleo para água. Quando esse fenômeno ocorre, o sistema de medição tem que mudar de capacitivo para condutivo. Além disso, o transdutor deve estar em contato direto com o fluido (técnica intrusiva), o que pode levar a dificuldades construtivas do medidor.

Tabela 1-1: Classificação de instrumentos e técnicas de medições multifásicas.

<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>	
Infravermelho	Usado principalmente na medição da concentração de água; pouca sensibilidade às mudanças de salinidade, densidade, temperatura e pressão; apresenta problemas para altos valores de FVG (> 20%).
Impedância elétrica	Deve-se saber a configuração das fases de antemão; apresenta problemas de inversão de fases em escoamentos óleo-água; problemas com mudança de salinidade.
Densitometria gama de sensor único	Sensível ao regime do escoamento; indicado para medição de gás em líquido (óleo + água); possui restrições de segurança.
Densitometria gama de múltiplos sensores	Bastante estabelecida na medição da FVG e padrões de escoamento; erros devido à distribuição das fases; conhecida como a mais precisa das técnicas adotadas pelos medidores multifásicos 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 se obter a FVG; improvável ser utilizada 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 deslizamento 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 deslizamento; partículas sólidas podem danificar as palhetas da turbina.
Vórtices	Usado normalmente na medição de gás úmido, sendo necessária a correção pelo 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 de sinais acústicos	A aferição do medidor no local da aplicação é essencial para garantir a precisão da medida da velocidade.
Ativação pulsada de nêutrons	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 à escoamentos bifásicos do tipo água-gás; não pode ser usada em escoamento monofásico de óleo ou de gás; apresenta problemas com a variação da salinidade.
Gama/nêutron, capacitância/condutância	Obtenção da velocidade do escoamento pela correlação cruzada de sinais.
<b>Medição da quantidade de movimento do fluido</b>	
Venturi	Em escoamentos trifásicos, este requer conhecimento prévio da concentração de óleo em água.
Diferencial de pressão	Dependente do padrão de escoamento; aplicações práticas requerem uma extensiva aferição no local.

Fonte: Figueiredo *et al.* [3].

Segundo Prasser *et al.* [10] e Da Silva *et al.* [11], a técnica de impedância por malha de eletrodos (*wire mesh*) pode ser usada para se determinar a distribuição de fração de vazio instantânea na seção transversal da tubulação. Esta técnica apresenta as vantagens de alta resolução temporal, baixo custo e simplicidade quando comparada com outros sistemas de imagem. No entanto, é uma técnica intrusiva e, de acordo com Falcone *et al.* [5], está sujeita ao problema de inversão das fases e sua resolução espacial é inferior ao tomógrafo nuclear.

Neste contexto, a técnica ultrassônica associada às redes neurais oferece uma solução para a medição da FVG e determinação do padrão de escoamento. A técnica é não intrusiva e não exige rígidos controles de segurança tanto na instalação como na operação do equipamento. As seções a seguir discutem o uso do ultrassom e de RNA na medição multifásica.

## 1.2 A TÉCNICA ULTRASSÔNICA

A técnica ultrassônica representa uma alternativa promissora em relação ao custo, à complexidade e aos perigos associados a outras técnicas conforme mostrado na Tabela 1-1. Os sensores podem ser montados externamente à tubulação, o que torna a técnica completamente não intrusiva e não invasiva. Uma revisão extensa sobre o uso da técnica ultrassônica no contexto de medidores multifásicos pode ser encontrada em Carvalho e Bannwart [12]. Sinais ultrassônicos são ricos em informações e a técnica pode cumprir os requisitos de monitoramento remoto, transmissão dos sinais ao longo de grandes distâncias e operação em ambientes hostis normalmente encontrados na indústria de óleo e gás. Segundo Bond *et al.* [13], os principais parâmetros ultrassônicos usados em processos de monitoramento, medição e controle são a amplitude do sinal e o tempo de trânsito da onda.

A técnica ultrassônica foi utilizada na caracterização de padrões de escoamentos horizontais bifásicos ar-água e na medição da espessura de filme em escoamentos bifásicos ar-mercúrio conforme trabalho desenvolvido por Chang *et al.* [14]. Jones *et al.* [15] utilizaram a atenuação acústica para medir a fração de vazio em escoamentos bifásicos água-ar no padrão bolhas dispersas. Um modelo semiempírico da interação da onda sonora com o escoamento bifásico foi desenvolvido.

A técnica ultrassônica também foi usada na medição da fração da fase dispersa em escoamentos trifásicos e bifásicos (ar-óleo, partículas de vidro-óleo e ar-partículas de vidro-óleo) conforme apresentado em Zheng e Zhang [16] e Vatanakul *et al.* [17]. Zheng e Zhang [16] observaram que a atenuação do sinal cresce exponencialmente com o aumento da área

interfacial de ambas as fases, sólidas e gasosas, e que as bolhas de ar causam o aumento do tempo de trânsito da onda acústica. Além de confirmar as observações em Zheng e Zhang [16], Vatanakul *et al.* [17] também verificaram que a dispersão estatística do tempo de trânsito e da amplitude do sinal aumenta com o aumento da vazão de gás.

Recentemente, Carvalho *et al.* [18] e Tanahashi [19] apresentaram uma discussão detalhada das formas de ondas dos sinais ultrassônicos e de como elas estão relacionadas com os parâmetros acústicos. Os autores então correlacionaram a atenuação dos sinais acústicos com a fração de vazão em escoamentos bifásicos água-ar em uma tubulação de acrílico de duas polegadas. Grangeiro [20] e Tanahashi [19] demonstraram que a técnica ultrassônica tem o potencial de fornecer em tempo real informação sobre a estrutura de escoamentos horizontais intermitentes bem como uma estimativa da vazão individual da fase contínua (água) e da fase dispersa (ar) para este padrão de escoamento em específico. Gonçalves [21] realizou medidas ultrassônicas em escoamentos verticais líquido-gás-sólido em tubos de acrílico de uma e duas polegadas. Óleo mineral foi utilizado como fase contínua e os padrões de escoamentos desenvolvidos foram de bolhas dispersas a anular.

Meribout *et al.* [22] usaram sensores ultrassônicos combinados com sensores de impedância para determinar a fração de óleo e água de escoamentos óleo-água-gás. A fração de gás foi obtida de um medidor Venturi aferido previamente e de medidores de pressão. O autor verificou que medições da vazão de óleo e água são mais precisas nas faixas de 33-46% e 82-100%. Nas outras faixas, os sensores capacitivos/condutivos forneceram resultados mais precisos. O tratamento dos dados para a obtenção da vazão individual foi feito utilizando (RNA).

A desvantagem em utilizar a técnica ultrassônica, como acontece para a maioria dos métodos de medição multifásica, é a necessidade de se aferir o sinal. Corneliussen *et al.* [23] discutiram sobre a necessidade de aferição em medidores de vazão para escoamentos multifásicos. Como discutido por estes autores, os elementos primários de medição que compõem um medidor de vazão multifásico geralmente podem ser aferidos de acordo com procedimentos convencionais, semelhantes aos utilizados para as medições de escoamentos monofásicos. No entanto, ao contrário do que acontece com os medidores monofásicos, a saída das medições primárias de um medidor multifásico é usada como entrada em algoritmos avançados de processamento de sinal para o cálculo da vazão de cada fase. A aferição é então

limitada, pois um produto específico usado como fluido de aferição para uma determinada aplicação pode não ser representativo para outro produto.

Em função dessas dificuldades de aferição, uma solução mais abrangente pode ser o uso das RNAs. Figueiredo *et al.* [3] fizeram uma revisão bibliográfica sobre a utilização de redes neurais na medição multifásicas e um resumo será apresentado na próxima seção.

### 1.3 REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

Segundo Falcone *et al.* [5], as RNAs são consideradas uma ferramenta alternativa para a identificação de padrões de escoamento. Conforme discutido em Bhat e McAvoy [24], desde a década de 80 RNAs têm sido usadas para aplicações como controle adaptativo, controle baseado em modelo, monitoramento de processos, detecção de falhas, modelamento dinâmico e na estimativa de parâmetros.

A RNA fornece um mapeamento não linear e correlação cruzada entre as variáveis de entrada e saída. Uma descrição detalhada sobre o uso de RNAs junto com medidores multifásicos, usando um tubo de Venturi e um medidor de densidade, pode ser encontrada em Falcone *et al.* [5]. Neste estudo, as redes neurais forneceram maior precisão na predição da vazão do que os modelos de mecânica de fluidos estudados. Shaikh e Al Dahhan [25] desenvolveram uma RNA para a predição da fração volumétrica de gás (FVG) em reatores do tipo coluna usando números adimensionais da mecânica dos fluidos como entrada. Rosa *et al.* [26] usaram três tipos de RNA para identificar padrões de escoamentos multifásicos: perceptron multicamada, MLP; função de base radial, RBF; e rede neural probabilística, PNN. Este estudo mostrou que os três tipos apresentaram desempenhos semelhantes, sendo o perceptron mais vantajoso comparado ao RBF e ao PNN. O RBF usa um algoritmo que frequentemente leva a um mínimo local enquanto o PNN exige um esforço computacional muito grande.

Filletti e Selegim [27] fizeram simulações numéricas da propagação de um pulso acústico através de uma mistura bifásica água-óleo. Os resultados das simulações numéricas foram utilizados para treinar uma rede neural para fornecer a fração da fase dispersa e a área interfacial. Inoue *et al.* [28] desenvolveram uma RNA para a identificação dos padrões desenvolvidos em escoamentos bifásicos (água-ar) horizontais e verticais tendo como entrada cinco grupos adimensionais. Uma base de dados inicial foi criada para o treinamento e validação da rede. Apesar de alguns erros, a RNA desenvolvida classificou de maneira satisfatória os padrões de escoamento. Nakashima [29] reviu e ampliou o conjunto de

adimensionais selecionados por Inoue *et al.* [28] e desenvolveu redes neurais baseadas em grupos adimensionais e medidas ultrassônicas para a determinação da FVG e do padrão de escoamento. Este propôs ainda um procedimento para combinação dos dois tipos de rede em um método único de medição multifásica.

Neste contexto, o objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um procedimento de medição multifásica capaz de medir a FVG e determinar o padrão de escoamento. Para isso, RNAs foram combinadas com medições ultrassônicas ou com números adimensionais conforme descrito no Capítulo 6.

#### **1.4 OBJETIVOS**

O objetivo geral desta dissertação é contribuir para o desenvolvimento de uma técnica de medição multifásica baseada em medidas ultrassônicas e números adimensionais. A técnica deve ser capaz de medir a FVG e determinar o padrão de escoamentos multifásicos presentes em diversas situações da indústria de petróleo e gás natural.

Este objetivo geral pode ser desdobrado nos seguintes objetivos específicos:

- Aprimorar o código computacional utilizado para tratamento dos dados ultrassônicos de modo a abarcar as novas situações tratadas nesta dissertação e otimizar o processo de tratamento de dados. Este código foi desenvolvido e modificado sucessivamente por Tanahashi [19], Grangeiro [30], Paiva [31] e Gonçalves [21];
- Aprimorar as redes neurais desenvolvidas em Nakashima [29] e Figueiredo *et al.* [3] de modo a melhorar seu desempenho;
- Projetar e construir um protótipo ultrassônico capaz de suportar condições operacionais comuns na indústria petrolífera. Este protótipo deverá ser utilizado na realização de medidas ultrassônicas em escoamentos reais;
- Proceder à caracterização de sinais ultrassônicos em testes preliminares com misturas de petróleo e gás e outros fluidos viscosos;
- Comparar o desempenho das RNAs baseadas em grupos adimensionais com programas computacionais de simulação numérica de escoamentos multifásicos.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 PADRÕES DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS LÍQUIDO-GÁS

Segundo Shoham [32], a diferença fundamental entre escoamentos monofásicos e escoamentos bifásicos líquido-gás é a existência de padrões de escoamento nestes últimos. Quando o gás e o líquido escoam simultaneamente na tubulação, as duas fases podem se distribuir em uma variedade de configurações geométricas denominadas padrões de escoamento (Figura 2-1).

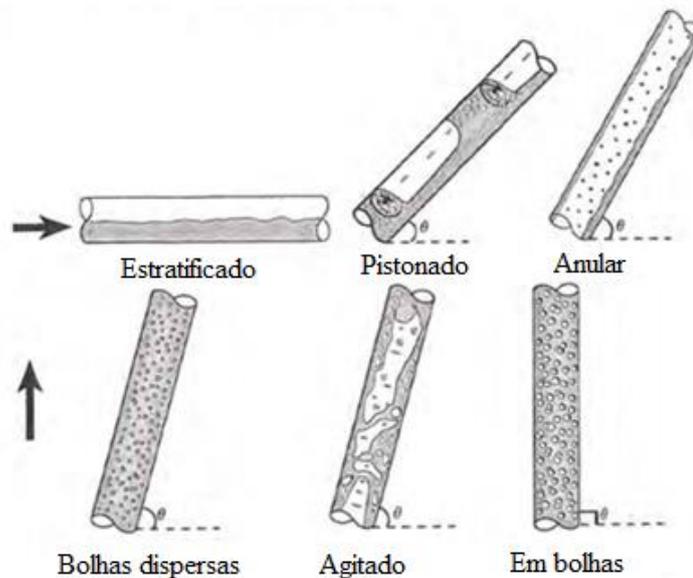


Figura 2-1: Padrões de escoamento em diferentes inclinações.

Fonte: Adaptado. de Shoham [32].

O padrão de escoamento desenvolvido em determinado escoamento bifásico dependerá das seguintes variáveis [32]:

- Condições operacionais como as vazões de gás e de líquido;
- Variáveis geométricas incluindo o diâmetro e o ângulo de inclinação da tubulação;
- Propriedades físicas das duas fases.

Diversos autores propuseram diferentes classificações para os padrões de escoamento. Shoham [32] os classificou para duas configurações distintas: escoamentos horizontais e quase horizontais e escoamentos verticais e quase verticais. Estas classificações são apresentadas nas seções que se seguem.

### 2.1.1 Padrões de escoamentos horizontais e quase horizontais

Shoham [32] classificou os padrões de escoamento desenvolvidos em tubulações horizontais e quase horizontais como estratificado (estratificado liso e ondulado), intermitente (pistonado e de bolhas alongadas), anular e de bolhas dispersas (Figura 2-2).

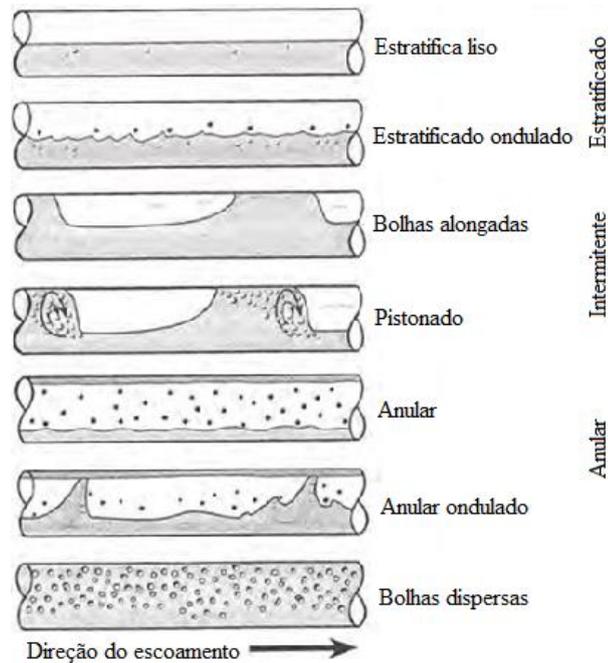


Figura 2-2: Padrões de escoamentos horizontais e quase horizontais.

Fonte: Adaptado de Shoham [32].

O padrão de escoamento estratificado ocorre quando há baixas vazões de gás e de líquido. As duas fases são separadas pela gravidade, sendo que a fase líquida escoava pela porção inferior da tubulação e a fase gasosa pela porção superior. O padrão de escoamento estratificado é, por sua vez, subdividido em estratificado liso e ondulado. O primeiro é caracterizado pela existência de uma interface líquido-gás lisa. Já o estratificado ondulado ocorre para vazões de gás relativamente maiores, sendo caracterizado pela existência de uma interface líquido-gás ondulada [32].

O padrão de escoamento intermitente é caracterizado pela alternância entre o escoamento de líquido e de gás. Pistões de líquido, que preenchem completamente a seção transversal da tubulação, são separados por bolsões de gás que contêm um filme fino de líquido escoando através da porção inferior da tubulação. O líquido no pistão pode conter pequenas bolhas que se concentram na parte frontal do pistão e na região superior da tubulação. O padrão de escoamento intermitente é subdividido em escoamento pistonado e de bolhas alongadas. O padrão de bolhas alongadas é considerado o caso limite do pistonado, quando o pistão de líquido

não contém bolhas pequenas. Isto ocorre para vazões de gás relativamente baixas, quando o escoamento não é agitado. Para vazões de gás mais altas, quando o escoamento na região anterior do pistão (esteira da bolha alongada) é caracterizado por turbilhões contendo pequenas bolhas, o escoamento é classificado como pistonado [32].

O padrão de escoamento anular ocorre quando a vazão de gás é alta comparada à vazão de líquido. A fase gasosa escoar na região central da tubulação a altas velocidades podendo conter pequenas gotas de líquido. O líquido escoar na forma de um filme fino na superfície da parede da tubulação. A interface líquido-gás é muito ondulada, resultado da alta tensão cisalhante sobre ela. A espessura do filme de líquido depende da magnitude relativa das vazões de gás e de líquido, sendo geralmente mais espesso na porção inferior do que na superior devido à ação da gravidade [32].

O padrão de escoamento bolhas dispersas ocorre quando a vazão de líquido é alta comparada à vazão de gás. A fase contínua é o líquido no qual a fase gasosa é dispersa na forma de bolhas discretas [32].

### 2.1.2 Padrões de escoamentos verticais e quase verticais

Segundo Shoham [32], em escoamentos verticais e quase verticais o padrão de escoamento estratificado desaparece e um novo padrão surge, denominado escoamento agitado. Sendo assim, os padrões de escoamento desenvolvidos para esta configuração são classificados como em bolhas, pistonado, agitado, anular e bolhas dispersas (Figura 2-3).

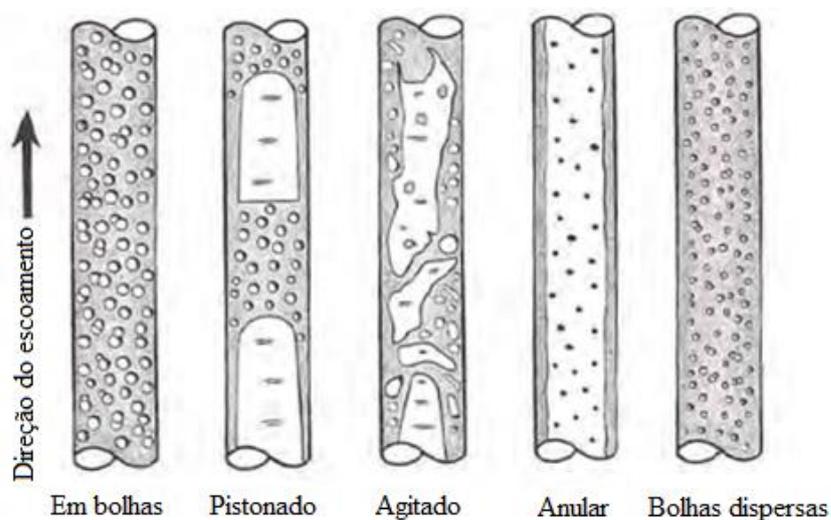


Figura 2-3: Padrões de escoamento verticais e quase verticais.

Fonte: Adaptado de Shoham [32].

No padrão de escoamento em bolhas, a fase gasosa é dispersa em pequenas bolhas discretas com movimento ascendente e de zigzag. Para escoamento vertical, a distribuição de bolhas na seção transversal da tubulação é aproximadamente homogênea. O escoamento borbulhado ocorre quando a vazão de líquido é relativamente baixa e há pouca turbulência. Ademais, é caracterizado pelo escorregamento entre as fases líquida e gasosa, ou seja, a fase gasosa tem velocidade maior do que a fase líquida [32].

O padrão de escoamento pistonado em tubulações verticais é simétrico em relação ao eixo da tubulação. A maior parte da fase gasosa está localizada em uma estrutura em forma de projétil denominada bolha de Taylor, com diâmetro ligeiramente menor que o diâmetro da tubulação. O escoamento consiste de sucessivas bolhas de Taylor e de pistões de líquido entre elas. Um fino filme de líquido escoam em contracorrente entre a bolha de Taylor e a parede da tubulação. Este filme penetra no pistão de líquido a montante e cria uma zona de mistura aerada por pequenas bolhas de gás [32].

O padrão de escoamento agitado é caracterizado pelo movimento oscilatório da fase líquida. Ele é similar ao pistonado, mas parece mais caótico, não existindo uma interface nítida entre as duas fases. Ele ocorre para vazões de gás mais altas, quando o pistão de líquido se torna mais curto e espumado. Esse pistão é então arrastado pela fase gasosa até se quebrar. Logo após, escoam em contracorrente e se junta com o pistão a montante. Como resultado, a bolha de Taylor é distorcida, que é uma característica do escoamento agitado [32].

O padrão de escoamento anular, assim como nas tubulações horizontais, é caracterizado pela fase gasosa escoando na região central da tubulação a altas velocidades, podendo conter pequenas gotas de líquido. A fase líquida escoam lentamente na forma de um filme líquido de espessura aproximadamente uniforme na superfície da parede da tubulação. A interface líquido-gás é ondulada, resultante da alta tensão de cisalhamento na interface [32].

O padrão de escoamento bolhas dispersas ocorre quando a vazão de líquido é relativamente alta e a fase gasosa é dispersa na forma de bolhas discretas na fase líquida. Para este padrão de escoamento, a fase líquida carrega as bolhas de gás e não há escorregamento entre as fases, ou seja, as fases líquida e gasosa possuem aproximadamente as mesmas velocidades [32].

### 2.1.3 Padrões de escoamentos multifásicos

O escoamento multifásico é definido como sendo duas ou mais fases com propriedades diferentes e imiscíveis que escoam simultaneamente em um duto ou canal. Na seção anterior, foram apresentados os padrões para escoamentos bifásicos líquido-gás. Nesta seção, são apresentados os principais aspectos discutidos por Gonçalves [21] sobre padrões de escoamentos bifásicos líquido-líquido, escoamentos trifásicos líquido-líquido-gás e líquido-sólido-gás e, finalmente, escoamentos quadrifásicos líquido-líquido-sólido-gás.

Segundo Bratland [33], o escoamento bifásico líquido-líquido de óleo e água não é totalmente diferente do escoamento líquido-gás. Porém, as diferenças de densidade, viscosidade e tensões superficiais dos líquidos promovem misturas e padrões diferentes, colocando estes escoamentos fora dos limites dos modelos matemáticos válidos para escoamentos líquido-gás já bem estabelecidos na literatura.

Com relação aos escoamentos trifásicos líquido-líquido-gás, foram encontrados alguns mapas na literatura como os de Lee [34] e Bratland [33]. Entretanto, estes padrões tornam-se limitados e de difícil generalização devido, principalmente, à influência do ângulo de inclinação da tubulação. Por outro lado, alguns modelos matemáticos, como aqueles propostos por Paladino [35] e Bratland [33], apresentam resultados satisfatórios considerando a fase líquida como uma emulsão homogênea de água e óleo. De forma geral, mesmo havendo a presença de três fases e a possibilidade de diversos padrões nestes escoamentos, os padrões trifásicos na indústria petrolífera se aproximam dos padrões bifásicos líquido-gás.

Com relação aos escoamentos trifásicos líquido-sólido-gás e quadrifásicos líquido-líquido-sólido-gás, na literatura existem modelos matemáticos que fornecem estimativas da velocidade mínima de deposição de sólidos e a perda de carga em tubulações, como por exemplo os trabalhos de Danielson [36], Bello [37] e Bratland [33].

Para as condições experimentais dos escoamentos multifásicos apresentados no Capítulo 3 deste trabalho 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 O ULTRASSOM

O ultrassom é definido como uma onda mecânica com frequência acima de 20kHz que se propaga em meios materiais. As ondas mecânicas podem ser classificadas em quatro tipos

diferentes em função da direção de deslocamentos das partículas materiais: ondas transversais ou cisalhantes, longitudinais, superficiais e de placa. Este trabalho focará principalmente nas ondas longitudinais, pois são estas que se propagam através de meios fluidos.

As ondas longitudinais são ondas que se propagam na mesma direção do movimento das partículas do meio (Figura 2-4). Essas ondas podem ocorrer em meios sólidos, líquidos e gasosos e são, dos quatro tipos de ondas apresentados, as que possuem maior velocidade de propagação. Ao se propagar em um meio qualquer, as ondas acústicas podem ser atenuadas por diversos mecanismos.

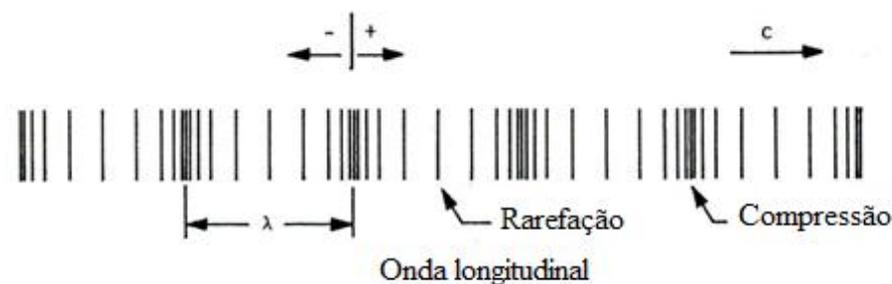


Figura 2-4: Desenho esquemático de uma onda acústica longitudinal.

A atenuação acústica em meios fluidos monofásicos ocorre devido principalmente à viscosidade e à condução térmica. Em fluidos não metálicos, principalmente líquidos, a atenuação devido à condução térmica é desprezível quando comparada àquela causada pela viscosidade [38]. Para a maioria dos fluidos à temperatura ambiente, quando o produto da frequência angular pelo tempo de relaxamento for muito menor que a unidade ( $\omega\tau \ll 1$ ), Cheeke [39] mostra que o coeficiente de atenuação acústica devido à viscosidade pode ser calculado conforme a Equação (2-1):

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

No caso de meios gasosos, cuja viscosidade dinâmica é baixa, a contribuição da condução térmica passa a ser expressiva e deve ser levada em consideração. A Equação (2-2) deve ser usada para o cálculo do coeficiente de atenuação acústica em meios gasosos:

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

Vale notar que a atenuação acústica é proporcional à viscosidade e ao quadrado da frequência angular do pulso ultrassônico. Sendo assim, pulsos ultrassônicos de alta frequência deverão sofrer forte atenuação em fluidos de alta viscosidade.

Em escoamentos multifásicos, além da atenuação viscosa e térmica na fase contínua (atenuação intrínseca), fenômenos de interface associados às fases dispersas podem também causar a atenuação dos pulsos ultrassônicos. Quando um pulso ultrassônico atravessa a interface entre dois meios, ocorrem fenômenos de reflexão e transmissão descritos pela lei de Snell-Descartes. As razões de pressão, intensidade e energia das ondas transmitidas e refletidas nas interfaces dependem da velocidade de propagação e da impedância acústica característica de cada meio bem como do ângulo entre a interface e a direção de propagação da onda incidente [38].

A impedância acústica característica de um meio pode ser calculada pelo produto da velocidade de propagação da onda no meio pela sua massa específica conforme Equação (2-3):

$$Z = \rho_0 c \quad (2-3)$$

Considerando uma onda harmônica plana incidente em uma interface plana entre dois fluidos de impedância acústica diferentes, os coeficientes de reflexão e transmissão de intensidade podem ser calculados pelas Equações (2-4) e (2-5), respectivamente.

$$R_I = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (2-4)$$

$$T_I = \frac{4Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2-5)$$

Segundo a lei de Snell, os ângulos de reflexão e transmissão podem ser calculados conforme Equações (2-6) e (2-7), respectivamente.

$$\text{sen}\theta_i = \text{sen}\theta_r \quad (2-6)$$

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{c_1} = \frac{\text{sen}\theta_t}{c_2} \quad (2-7)$$

A partir dos conceitos apresentados acima, Figueiredo *et al.* [3] fizeram uma análise dos fenômenos acústicos envolvendo escoamentos bifásicos líquido-gás. A Figura 2-5 apresenta quatro situações de grande importância no presente estudo: (a) quando a seção transversal da tubulação está pouco povoada por pequenas bolhas dispersas; (b) quando a seção transversal está densamente povoada por bolhas dispersas; (c) quando grandes estruturas gasosas estão presentes como calotas e bolhas de Taylor incipientes; (d) quando a fase gasosa do escoamento anular ocupa a maior parte da seção transversal, deixando apenas um fino filme de líquido na superfície interna da tubulação. Nos desenhos esquemáticos, o emissor do pulso ultrassônico é o transdutor a  $0^\circ$ .

No caso de poucas bolhas de gás dispersas no líquido (Figura 2-5a), somente uma pequena parcela da energia do pulso ultrassônico irá se espalhar para as laterais. A energia não é uniformemente espalhada, pois as reflexões são mais intensas para trás. Devido à baixa densidade populacional das bolhas, a maior parcela de energia do pulso ultrassônico atravessa a seção transversal. Ao encontrar a interface líquido-parede do lado oposto da tubulação, uma parcela do sinal é transmitida para o sensor a  $180^\circ$  e a outra refletida de volta para o sensor a  $0^\circ$ . Quando a seção transversal fica mais povoada com bolhas um pouco maiores (Figura 2-5b), a energia espalhada para os lados aumenta e o campo de espalhamento acústico como um todo é menos afetado pela aleatoriedade do movimento das bolhas. Sendo assim, a energia transmitida diretamente pela fase contínua irá diminuir, diminuindo as parcelas de energia que atingem os transdutores a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .

Quando a seção transversal começa a ser povoada por estruturas gasosas coalescidas (Figura 2-5c) como calotas gasosas e bolhas de Taylor, o campo acústico assume uma forma diferente. O campo acústico é formado por reflexões do feixe ultrassônico nas interfaces líquido-gás e líquido-parede interna da tubulação. Novamente, a intensidade acústica não é uniforme ao longo da circunferência da tubulação, sendo maior nas regiões próximas ao transdutor emissor do pulso. A parcela de energia transmitida através da fase contínua diminui com o aumento das estruturas gasosas coalescidas, diminuindo ainda mais a energia que atinge o sensor a  $180^\circ$ . No entanto, a parcela de energia refletida pelas interfaces líquido-gás aumenta, aumentando a energia recebida pelo sensor a  $0^\circ$ .

Finalmente, o mecanismo de dissipação para o padrão de escoamento anular pode ser entendido como a evolução do mecanismo descrito acima. Como mostrado na Figura 2-5d, o filme líquido na parede da tubulação é mais fino do que nos casos anteriores e o feixe

ultrassônico é refletido várias vezes até atingir os sensores laterais. Consequentemente, ele é atenuado mais rapidamente. A parcela do sinal ultrassônico refletida na interface líquido-gás de volta para o transmissor será maior do que no caso anterior.

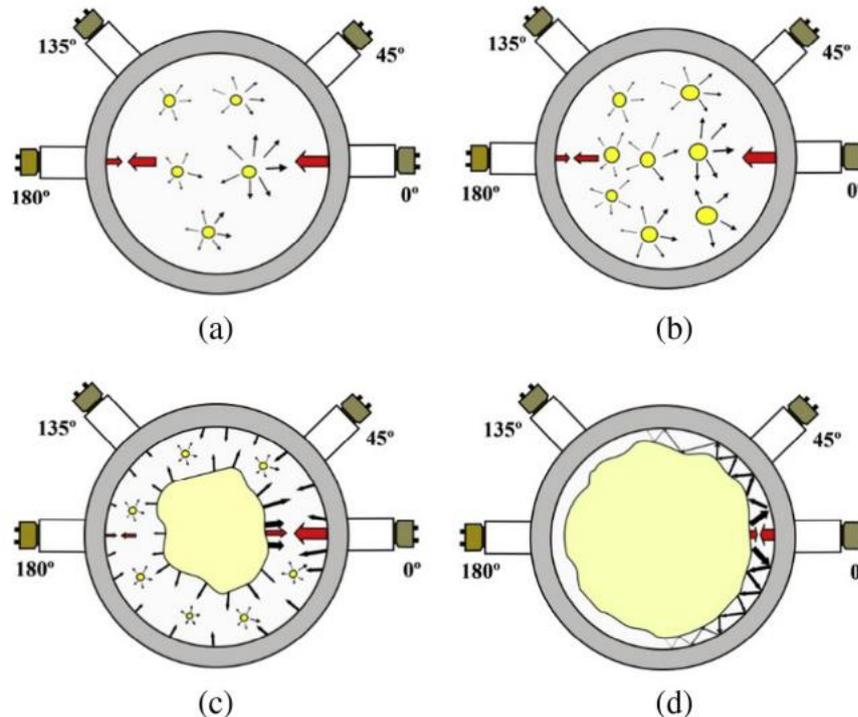


Figura 2-5: Representação esquemática do campo acústico no escoamento: (a) de bolhas dispersas (baixa densidade); (b) de bolhas dispersas (alta densidade); (c) de calotas e bolhas de Taylor incipientes; (d) anular. Fonte: Figueiredo *et al.* [3].

Estas vistas esquemáticas dos mecanismos de dissipação são coerentes com as tendências dos dados ultrassônicos para os vários sensores que serão discutidas nas Seções 4.2.2 e 4.2.3.

## 2.3 CONCEITOS BÁSICOS DE REDES NEURAIS

Falcone *et al.* [5] destacam que um dos maiores obstáculos para se obter informações confiáveis de escoamentos multifásicos é a sua natureza não linear. Neste contexto, as redes neurais se apresentam como uma ferramenta reconhecida pela sua capacidade em lidar com fenômenos não lineares.

Segundo Haykin [40], o neurônio é a unidade de processamento de informação fundamental para a operação de uma rede neural. O diagrama de blocos da Figura 2-6 apresenta o modelo de um neurônio. Três elementos básicos formam o modelo neural:

- Um conjunto de sinapses ou elos de ligação caracterizados por pesos. Especificamente, um sinal  $x_j$  na entrada da sinapse  $j$  conectado ao neurônio  $k$  é multiplicado pelo peso da sinapse,  $w_{kj}$ ;
- Um adicionador para somar os sinais de entrada modificados pelos pesos das respectivas sinapses do neurônio;
- Uma função de ativação para limitar a amplitude da saída do neurônio.

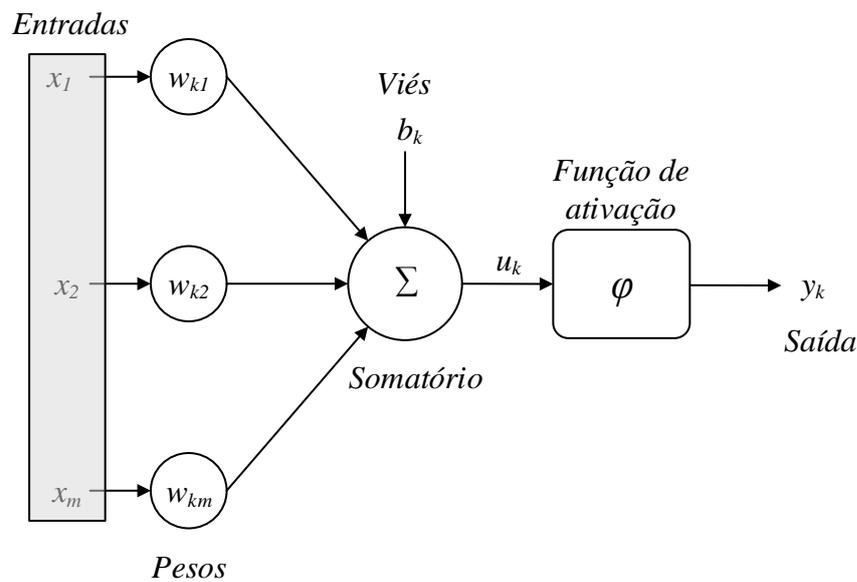


Figura 2-6: Modelo não linear de um neurônio.

Fonte: Adaptado de Haykin [40].

O modelo neural da Figura 2-6 também inclui um viés (*bias*) aplicado externamente ( $b_k$ ). O viés tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada da rede na função de ativação. Em termos matemáticos, pode-se descrever o neurônio  $k$  pelas Equações (2-8) e (2-9) [40].

$$u_k = \sum_{j=1}^n w_{kj} x_j \quad (2-8)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (2-9)$$

Segundo Haykin [40], a função de ativação  $\varphi$  é responsável por introduzir a não linearidade no sistema, sendo a função sigmoide a mais comum. Seu gráfico tem a forma de “s” e a função é definida como estritamente crescente. Ademais, a função possui um bom equilíbrio

entre o comportamento linear e não linear. Sua característica mais importante é ser continuamente diferenciável, exigência fundamental para o algoritmo de retropropagação de erro. Um exemplo de função sigmoide é a função logística da Equação (2-10).

$$\varphi(u_k) = \frac{1}{1 + \exp(-au_k)} \quad (2-10)$$

A RNA usada nesse trabalho é do tipo *perceptron* de múltiplas camadas conforme apresentado na Figura 2-7. Esta consiste de uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída. O sinal de entrada se propaga através de cada neurônio, passando por todas as camadas [40].

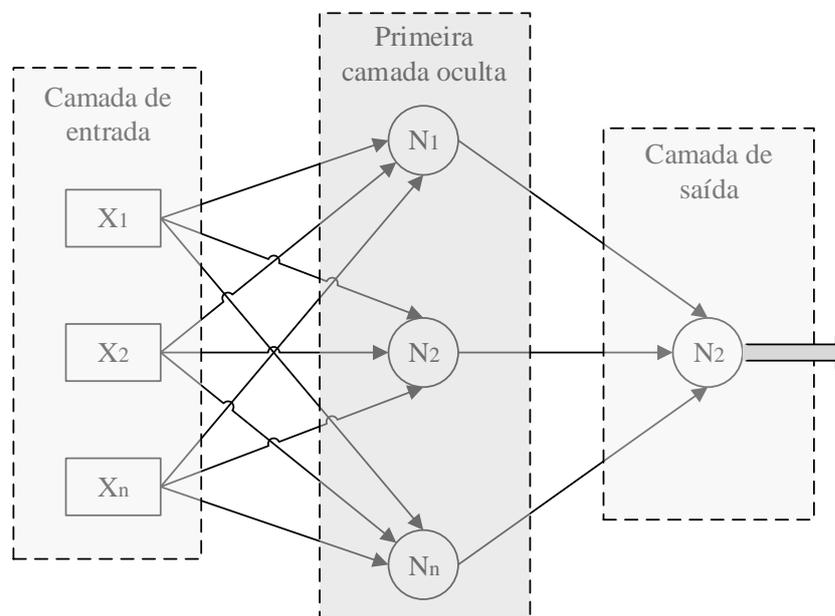


Figura 2-7:Arquitetura da RNA perceptron de múltiplas camadas.

Um *perceptron* de múltiplas camadas tem três características distintas [40]:

- O modelo de cada neurônio da rede inclui uma função de ativação não-linear. A presença de não linearidade é importante porque, do contrário, a relação de entrada-saída da rede poderia ser reduzida àquela de um perceptron de camada única;
- A rede contém uma ou mais camadas de neurônios ocultos. Estes neurônios ocultos capacitam a rede a aprender tarefas complexas, extraíndo progressivamente as características mais significativas dos padrões de entrada;

- A rede exibe um alto grau de conectividade determinado pelas suas sinapses. Uma modificação na conectividade da rede requer uma mudança nas conexões sinápticas ou de seus pesos.

Neste trabalho, redes neurais foram associadas às medidas ultrassônicas e aos números adimensionais para fornecer medidas da fração de vazão de gás e determinar o padrão de escoamento em escoamentos multifásicos.

### 3. DISPOSITIVOS EXPERIMENTAIS E PROCEDIMENTOS DE TESTE

Nesta seção, são apresentados os dois dispositivos experimentais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, que são a montagem vertical simplificada utilizada nos testes preliminares com o protótipo ultrassônico em escoamento bifásicos líquido-gás e o circuito de escoamentos multifásicos UNIFEI.

A Seção 3.1 apresenta o sistema de aquisição de dados ultrassônicos, que é comum aos quatro dispositivos experimentais.

#### 3.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS ULTRASSÔNICOS

Medições ultrassônicas foram realizadas utilizando um sistema de medição composto por quatro transdutores acústicos, um sistema de aquisição de dados (PXI), um pulsador e um computador para tratamento posterior dos dados (Figura 3-1). Esses componentes são explicados com mais detalhes nas seções que se seguem.

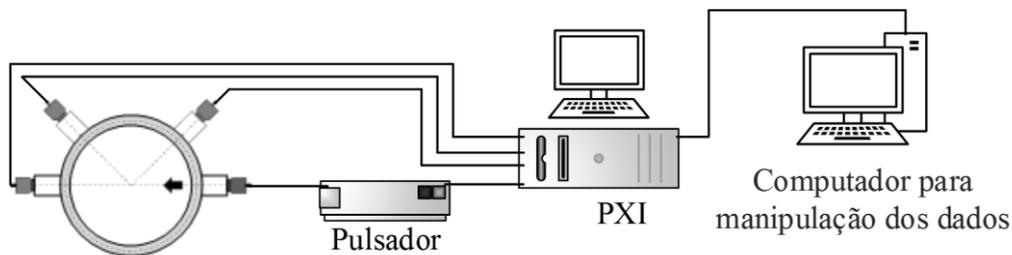


Figura 3-1: Esquema do sistema de medição ultrassônico.

##### 3.1.1 Transdutores ultrassônicos

Para a geração dos pulsos ultrassônicos, foram utilizados transdutores do fabricante Panametrics. São transdutores cujos elementos ativos são cristais piezelétricos ou ferroelétricos que se deformam quando submetidos a uma determinada tensão elétrica. Esta deformação é então para o material com o qual está em contato, gerando pulsos ultrassônicos. Na Figura 3-2, é apresentado o esquema de um transdutor ultrassônico.

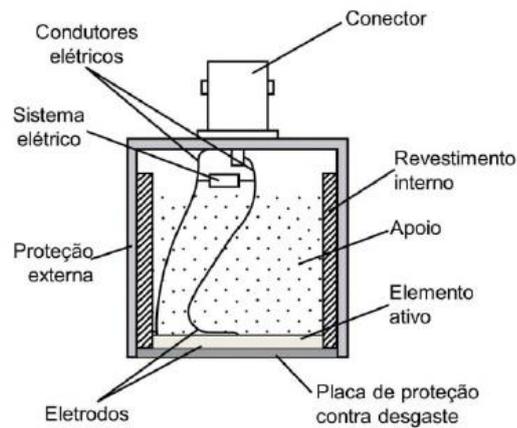


Figura 3-2: Desenho esquemático de um transdutor ultrassônico.  
Fonte: Panametrics [41].

Para a realização das medições, foram selecionados transdutores do tipo Videoscan de 2,25 MHz e diâmetro nominal de  $\frac{1}{2}$  polegada, especificado conforme o código V106-SM. Foram escolhidos transdutores do tipo Videoscan por possuírem uma melhor relação sinal ruído do que os transdutores do tipo Accuscan e Centrascan e serem indicados para operação em meios causadores de espalhamento acústico. Na Figura 3-3, são apresentados os espectros de frequência e as formas dos sinais de cada um desses transdutores.

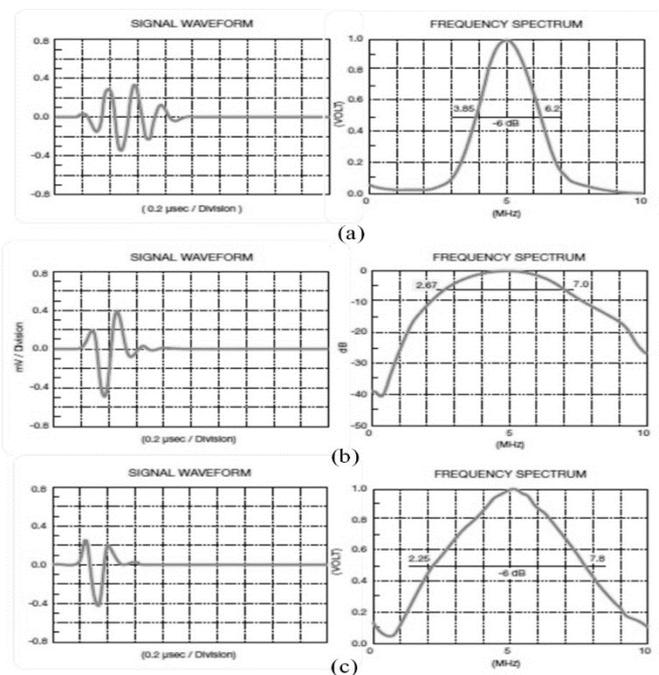


Figura 3-3: Tipos de transdutores ultrassônicos: (a) Accuscan; (b) Centrascan e (c) Videoscan.  
Fonte: Panametrics [41].

Os transdutores ultrassônicos podem ser usados tanto como geradores de pulsos ultrassônicos ou receptores. Dessa maneira, não se fez necessário selecionar transdutores

diferentes para gerar e receber pulsos. Na Figura 3-4, são apresentadas as dimensões do transdutor selecionado. Foi solicitado ao fabricante que fornecesse o mesmo transdutor com conexão traseira em vez de lateral, pois isto facilitaria o encaixe no protótipo ultrassônico desenvolvido neste trabalho.

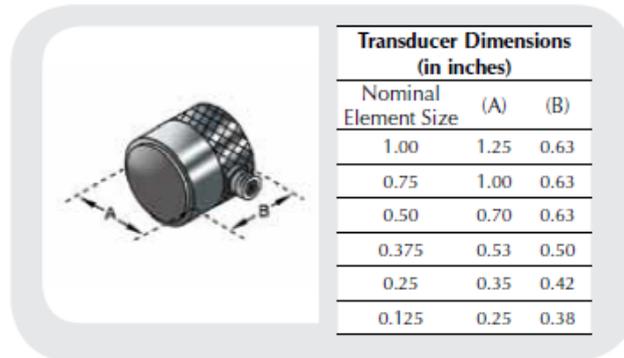


Figura 3-4: Transdutores ultrassônicos Panametrics Videoscan de 2,25 MHz.  
Fonte: Panametrics [41].

### 3.1.2 Sistema de aquisição de dados

Para aquisição dos sinais ultrassônicos, utilizou-se um digitalizador microprocessado do fabricante *National Instruments*, modelo PXIe-1062Q. Este digitalizador está equipado com uma placa de aquisição também do fabricante *National Instruments*, modelo PXI-5105, com oito canais, capaz de realizar amostragens a taxas de até 60 MHz usando oito canais simultaneamente. A placa é operada por um programa escrito em LabView, versão 8.6. Na Figura 3-5, mostra-se o digitalizador utilizado.



Figura 3-5: Digitalizador PXIe-1062Q.

Para atender ao requisito imposto pelo teorema de *Nyquist*, os sistemas eletrônicos de aquisição de sinais devem adquirir os pontos da curva a uma taxa de amostragem no mínimo duas vezes maior do que a frequência de vibração do transdutor. Como os transdutores possuem

frequência de 2,25 MHz, a frequência mínima para se evitar problemas de *aliasing* é de 4,5 MHz. Para este trabalho, adotou-se uma frequência de aquisição de 20 MHz, pois o equipamento tinha capacidade suficiente para adquirir dados a esta velocidade e os sinais assim digitalizados seriam uma representação mais fiel dos sinais originais.

### 3.1.3 Pulsador

Foi utilizado um gerador de pulsos do fabricante Panametrics Olympus, modelo 5077PR, como mostrado na Figura 3-6. Este pulsador tem 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 da imagem ultrassônica das estruturas do escoamento. Porém, valores altos da taxa de aquisição geram arquivos grandes, aumentando o tempo de processamento dos dados. Já valores altos de voltagem podem danificar os cristais por aquecimento excessivo. Por estas razões, foi adotada uma frequência de pulsação de 2 kHz, utilizando uma tensão de 300 Volts.



Figura 3-6: Gerador de pulsos Panametrics, modelo 5077PR.

## 3.2 MONTAGEM EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA PARA MEDIÇÕES ULTRASSÔNICAS EM MISTURAS LÍQUIDO-GÁS

Foram realizados experimentos visando analisar os sinais ultrassônicos em misturas bifásicas líquido-gás tendo líquidos viscosos como fase contínua. Estes experimentos foram realizados em uma montagem vertical simplificada utilizando misturas bifásicas de petróleo e ar e soluções aquosas de glicerina e ar. Detalhes da montagem e do procedimento experimental serão apresentados nas seções a seguir.

### 3.2.1 Dispositivo Experimental

Uma montagem experimental simplificada foi construída no Laboratório de Estudos de Sistemas Químicos (LESQ-FEQ-UNICAMP) conforme mostrado na Figura 3-7. Esta montagem consiste de uma tubulação vertical de duas polegadas (diâmetro interno de 52,5 mm) e de 2,5 m de comprimento na qual a fase líquida é mantida em repouso. O ar é injetado pela extremidade inferior usando um bico dispersor conhecido comercialmente com *pedra de aquário* (Figura 3-8). A vazão de ar foi medida por um rotâmetro com escala de 1 a 10 litros por minuto e precisão de  $\pm 0,1$  LPM. A temperatura ambiente foi monitorada usando um termômetro de bulbo com precisão de  $\pm 0,5$  °C. Uma escala milimétrica foi usada para medida da variação no nível da coluna fluida, o que permite o cálculo do volume percentual da fase dispersa na mistura pela Equação (3-1):

$$FVG = 100 \left( \frac{L_{2\phi} - L_{1\phi}}{L_{2\phi}} \right) \quad (3-1)$$

A fração de gás na mistura, calculada pela equação acima, não é necessariamente igual à fração de vazio no protótipo ultrassônico, pois a distribuição da fase gasosa na coluna não é necessariamente uniforme ao longo de sua altura. De qualquer modo, esta equação permite obter valores médios de FVG para correlação com os sinais ultrassônicos e, assim, identificar condições de operação associadas a particularidades nos sinais.

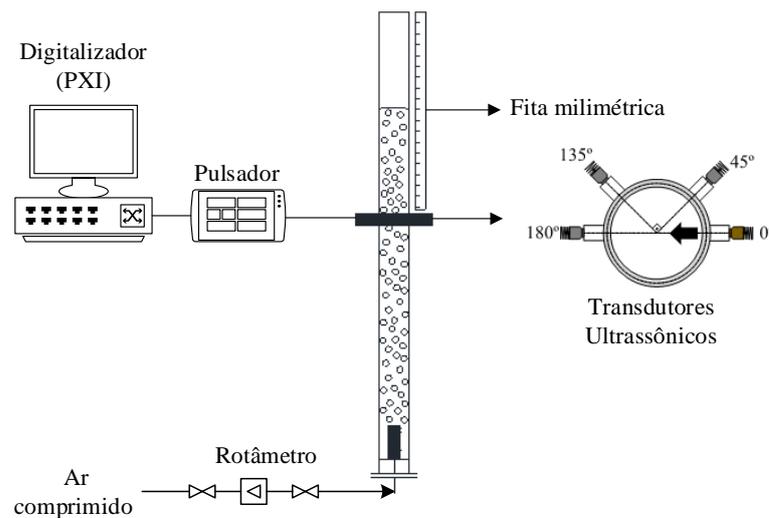


Figura 3-7: Vista esquemática da montagem experimental simplificada para teste de misturas bifásicas líquido-gás.



Figura 3-8: Bico difusor para injeção do ar comprimido.

As medições ultrassônicas foram realizadas utilizando um protótipo de medidor multifásico ultrassônico. O protótipo, doravante denominado apenas “carretel ultrassônico”, foi projetado e construído conforme apresentado no Anexo A, visando a realização de medições ultrassônicas em ambientes industriais. Os testes aqui descritos permitiram a antecipação, e eventual solução, de problemas antes da realização de experimentos futuros em instalações de grande porte. Na Figura 3-9, é apresentada a seção transversal do carretel ultrassônico com os quatro transdutores utilizados. O transdutor a  $0^\circ$  foi configurado para operar como emissor e receptor de pulsos ultrassônicos. Já os transdutores a  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  e  $180^\circ$  foram configurados para operar somente como receptores.

A Figura 3-10 apresenta a montagem experimental. Nas medições com soluções aquosas de glicerina como fase contínua, foi instalado um transdutor ultrassônico (emissor-receptor) próximo à extremidade inferior da montagem vertical (Estação 2). Este sensor foi usado para monitoração da formação de microbolhas, assunto este tratado com mais detalhes na Seção 4.1.

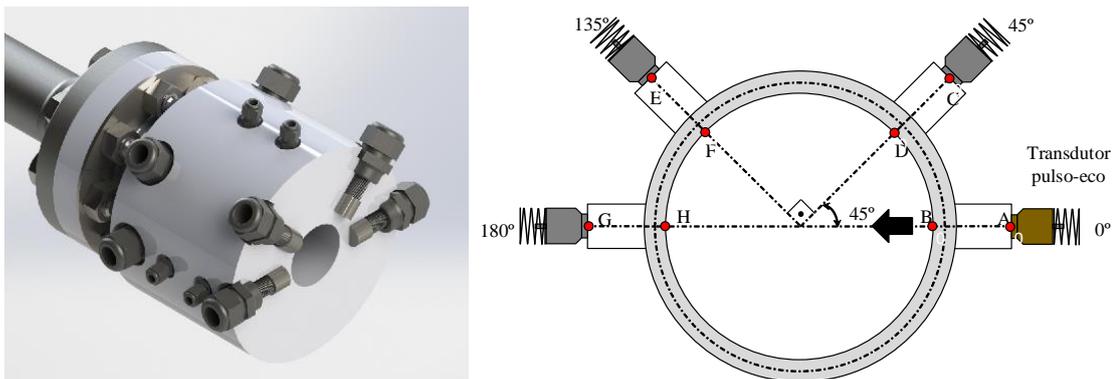


Figura 3-9: Vista esquemática da seção transversal do carretel ultrassônico.



Figura 3-10: Fotografia da montagem experimental simplificada para medição de FVG utilizando o carretel ultrassônico.

### 3.2.2 Procedimento experimental

Foi elaborado um procedimento para a realização dos experimentos conforme mostrado na Figura 3-11. Primeiramente, a tubulação era preenchida com o fluido a ser testado até completar o nível de 218 cm, o que assegurava que toda a seção interna do protótipo ultrassônico ficava preenchida com a fase contínua. Foi estabelecido um tempo de espera de dois minutos para que o ar se desprendesse do fluido. Verificou-se experimentalmente que tempos de espera maiores não levavam a nenhuma diferença mensurável na razão de energia, por exemplo entre 2, 10 e 25 minutos. Logo após este tempo de espera, eram realizadas as medições ultrassônicas da fase contínua sem injeção de ar, denominadas *pontos de controle*. Os *pontos de controle* foram utilizados para monitorar a presença de microbolhas na fase contínua durante a realização dos experimentos.

Em seguida, a vazão do ar comprimido era regulada para o valor desejado usando o rotâmetro. Aguardava-se então 1 minuto até que o escoamento entrasse em regime permanente,

constatado visualmente pela distribuição de bolhas na coluna de líquido e pela estabilização da interface livre. Novamente eram feitas medidas ultrassônicas, agora do escoamento de ar passando pela fase contínua. Ao mesmo tempo, media-se o aumento de nível da coluna de líquido e a temperatura ambiente. Encerradas as medições, a válvula da linha de fornecimento de ar comprimido era fechada e o ciclo se iniciava novamente, agora para um novo valor da vazão de ar comprimido. Os ciclos eram repetidos até que a matriz de teste fosse completada.

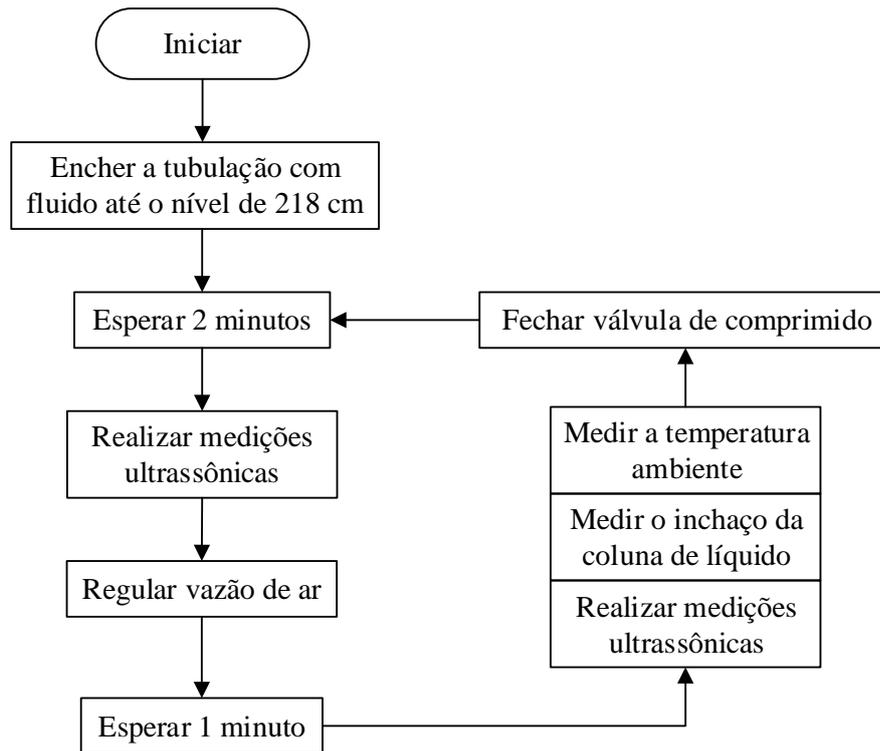


Figura 3-11: Procedimento experimental para a montagem simplificada para a medição de FVG.

O sistema de aquisição foi configurado para operar com a taxa de aquisição de 20 MHz e com uma frequência de pulsação de 2 KHz. Foram capturados um total de 20.000 pulsos por amostra, o que corresponde a um tempo de amostragem de 10 s. A tensão do pulsador foi configurada em 300 V e o ganho em 40dB.

### 3.2.3 Matriz de testes para misturas petróleo-ar

Duas amostras de petróleo foram cedidas pelo LabPetro-UNICAMP, uma de óleo pesado (34.000 cP) e outra de óleo leve (22 cP). A viscosidade do óleo pesado é muito alta, dificultando o seu manuseio e impossibilitando a passagem de bolhas de ar por ele neste experimento simplificado. Por esta razão, o petróleo pesado foi então diluído com óleo diesel a fim de reduzir sua viscosidade.

A viscosidade das amostras de petróleo pesado diluído com óleo diesel foi obtida de maneira empírica. O LabPetro-UNICAMP forneceu sete pontos experimentais conforme apresentado na Tabela 3-1 e, a partir desses pontos, fez-se um ajuste polinomial de segunda ordem. A equação obtida, Equação (3-2), permite calcular o valor da viscosidade de uma amostra qualquer a partir do percentual de diesel em volume (PDV) na mistura. O coeficiente de determinação obtido foi de 0,999. Esta equação foi utilizada no planejamento do experimento, porém os valores apresentados na Tabela 3-2 da viscosidade e densidade foram medidos diretamente no LabPetro-UUNICAMP a partir de amostras coletadas ao final das medições. A quinta amostra se refere ao petróleo leve.

$$\mu = 6,5366 \times \text{PDV}^2 - 8,5446 \times \text{PDV} + 4,5351 \quad (3-2)$$

Tabela 3-1: Viscosidades medidas para diferentes proporções de mistura petróleo pesado-óleo diesel.

% Diesel em volume	Viscosidade [mPa.s]
0%	34.192
5%	13.316
10%	5.546
15%	2.532
20%	1.281
25%	594
30%	375

Tabela 3-2: Composições e propriedades das fases contínuas utilizadas nos experimentos com petróleo como fase contínua a 20°C.

Amostra	Composição da fase contínua	$\mu$ [cP]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	Petróleo pesado + 25,3% diesel	1209	944,0
2	Petróleo pesado + 31,3% diesel	590	937,4
3	Petróleo pesado + 36,8% diesel	311	931,5
4	Petróleo pesado + 41,9% diesel	189	923,4
5	Petróleo leve	27	879,1

A Tabela 3-3 apresenta a matriz de teste usada. Foram realizadas cinco medições ultrassônicas por vazão de ar, permitindo assim avaliar a dispersão estatística dos resultados. Para os *pontos de controle*, foram realizadas duas medições por grupo.

Tabela 3-3: Matriz de testes para os experimentos usando petróleo como fase contínua.

Grupo	Pontos	Pontos de controle	Vazão de ar [LPM]
0	1 a 5	-	0,00
1	6 a 10	1 e 2	1,00
2	11 a 15	3 e 4	1,50
3	16 a 20	5 e 6	2,00
4	21 a 25	7 e 8	2,50
5	26 a 30	9 e 10	3,00
6	31 a 35	11 e 12	3,50
7	36 a 40	13 e 14	4,00
8	41 a 45	15 e 16	4,50
9	46 a 50	17 e 18	5,00
10	51 a 55	19 e 20	5,50

### 3.2.4 Matriz de testes para misturas de soluções aquosas de glicerina e ar

Conforme se verá mais adiante, os experimentos usando petróleo como fase contínua foram afetados pelo surgimento de microbolhas que ficavam aprisionadas no meio fluido. Essas microbolhas atenuavam o sinal ultrassônico causando um erro sistemático nas medições. Por esta razão, para os experimentos com soluções aquosas de glicerina, foi instalado na extremidade inferior da tubulação, aproximadamente 32 cm após o ponto de injeção de ar, um sensor ultrassônico para monitoramento do avanço de microbolhas (Figura 3-12). Este sensor corresponde ao sensor a 0° no protótipo. A combinação de informações dos sensores a 0° no protótipo e em baixo permitiu observar o efeito da interface livre e do meio poroso na geração de microbolhas.



Figura 3-12: Transdutor ultrassônico instalado na seção inferior da tubulação (estação 2).

Os experimentos foram realizados utilizando oito amostras diferentes para a fase contínua. A primeira foi água monofásica e as outras sete amostras eram soluções aquosas de glicerina em diferentes concentrações. Para o cálculo da viscosidade das soluções durante a fase de planejamento dos experimentos, foi utilizada a Equação (3-3) proposta por Cheng [42]. As propriedades apresentadas na Tabela 3-4 correspondem a valores medidos em laboratório de amostras coletadas durante a realização dos experimentos.

$$\mu = \mu_w \left\{ \frac{\ln(\mu/\mu_g)}{\ln(\mu_w/\mu_g)} \right\} \times \mu_g \left\{ 1 - \frac{\ln(\mu/\mu_g)}{\ln(\mu_w/\mu_g)} \right\} \quad (3-3)$$

Tabela 3-4: Composições e propriedades físicas dos fluidos utilizados nos experimentos com soluções aquosas de glicerina (T = 21°C).

<b>Amostra</b>	<b><math>\mu_{mistura}</math> [cP]</b>	<b><math>\rho_{mistura}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Fração de água [%]</b>	<b>Fração de glicerina [%]</b>
1	1,00	999,5	100,0	0,0
2	1,14	1007,7	96,3	3,7
3	1,39	1032,7	86,9	13,1
4	1,98	1053,5	79,0	21,0
5	3,66	1096,4	62,8	37,2
6	7,99	1131,1	49,8	50,2
7	12,03	1150,1	42,6	57,4
8	15,88	1161,8	38,2	61,8

A Tabela 3-5 apresenta a matriz de testes usada. Foram realizadas cinco medições ultrassônicas por vazão de ar, permitindo assim avaliar a dispersão estatística dos resultados. Para os *pontos de controle 1 e 2*, foram realizadas duas medições por grupo. Os *pontos de controle 2* são as medições ultrassônicas da fase contínua utilizando o sensor instalado na extremidade inferior da tubulação, realizadas logo após a aquisição dos *pontos de controle 1*. Desta maneira, espera-se identificar se as microbolhas são geradas primordialmente pela *pedra de aquário* ou pela interface livre da fase contínua.

Tabela 3-5: Matriz de testes para os experimentos usando soluções aquosas de glicerina como fase contínua.

<b>Grupo</b>	<b>Pontos</b>	<b>Pontos de Controle 1</b>	<b>Pontos de Controle 2</b>	<b>Vazão de ar [LPM]</b>
1	1 a 5	-	-	0,00
2	6 a 10	1 e 2	1 e 2	1,00
3	11 a 15	3 e 4	3 e 4	1,50
4	16 a 20	5 e 6	5 e 6	2,00
5	21 a 25	7 e 8	7 e 8	2,50
6	26 a 30	9 e 10	9 e 10	3,00
7	31 a 35	11 e 12	11 e 12	3,50
8	36 a 40	13 e 14	13 e 14	4,00
9	41 a 45	15 e 16	15 e 16	4,50
10	46 a 50	17 e 18	17 e 18	5,00
11	51 a 55	19 e 20	19 e 20	5,50
12	56 a 60	21, 22	21, 22	6,00
13	61 a 65	23, 24	23, 24	6,50
14	66 a 70	25, 26	25, 26	7,00
15	71 a 75	27, 28	27, 28	7,50
16	76 a 80	29, 30	29, 30	8,00
17	81 a 85	31, 32	31, 32	8,50
18	86 a 90	33, 34	33, 34	9,00
19	91 a 95	35, 36	35, 36	9,50
20	96 a 100	37, 38	37, 38	10,00

### **3.3 CIRCUITO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS UNIFEI**

Os dados coletados no circuito de testes multifásicos, instalado no Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração (LRF-UNIFEI), foram analisados com vistas à determinação da fração de gás em escoamentos líquido-gás-sólidos. Detalhes da montagem e do procedimento experimental são apresentados nas seções a seguir.

#### **3.3.1 Dispositivo experimental**

O circuito de testes de escoamento multifásicos UNIFEI, também instalado no LRF, é apresentado na Figura 3-13. Neste circuito, é possível simular escoamentos bifásicos óleo-ar, óleo-água e óleo-sólidos bem como escoamentos trifásicos e quadrifásicos (óleo-água-ar-

sólidos) em diferentes padrões de escoamento. Os experimentos podem ser realizados em tubulações de acrílico verticais de 1 ou duas polegadas. A estação ultrassônica é posicionada a 6 m da extremidade inferior da tubulação vertical. Um sistema com válvulas de fechamento rápido é utilizado para as medições da FVG. Este sistema enclausura aproximadamente um metro de tubulação e foi instalado em uma linha paralela à estação de medição ultrassônica. Uma câmera de filmagem rápida foi instalada a jusante da estação de medição ultrassônica, permitindo a filmagem do escoamento neste ponto.

Foram instalados um tanque para armazenamento de água e outro para óleo. Um terceiro tanque, que possui um misturador, foi usado para as suspensões. As respectivas bombas são controladas por inversores de frequência, o que permite variar a vazão dos fluidos armazenados. Ar é injetado no escoamento através de um elemento poroso na extremidade inferior de cada tubulação de acrílico.

A vazão de líquido é medida por um medidor do tipo Coriolis (Rheonik RHM12) com faixa operacional de 0,75 a 100 kg/min e precisão de  $\pm 0,2\%$ . Este medidor inclui ainda um termômetro com precisão de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . A vazão de ar é medida por um rotâmetro (Cole-Parmer) capaz de medir vazões de 3 a 30 LPM com precisão de  $\pm 0,1$  LPM. A pressão da tubulação vertical é medida por um manômetro do tipo Bourdon capaz de medir pressões de 0 a 4 psi com precisão de  $\pm 0,2$  psi. A pressão atmosférica foi medida com um barômetro. Foi considerado que o ar no ponto de injeção possuía a mesma temperatura do ar ambiente, que foi medida com um termômetro de bulbo com precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Essa consideração subestima a temperatura do ar comprimido, mas o erro no cálculo da vazão volumétrica de ar na estação ultrassônica não é significativo. A câmera de filmagem rápida utilizada é o modelo RED-LAKE Motion Pro X4, capaz de filmar a 5000 fps com resolução de até 512x512 pixels.

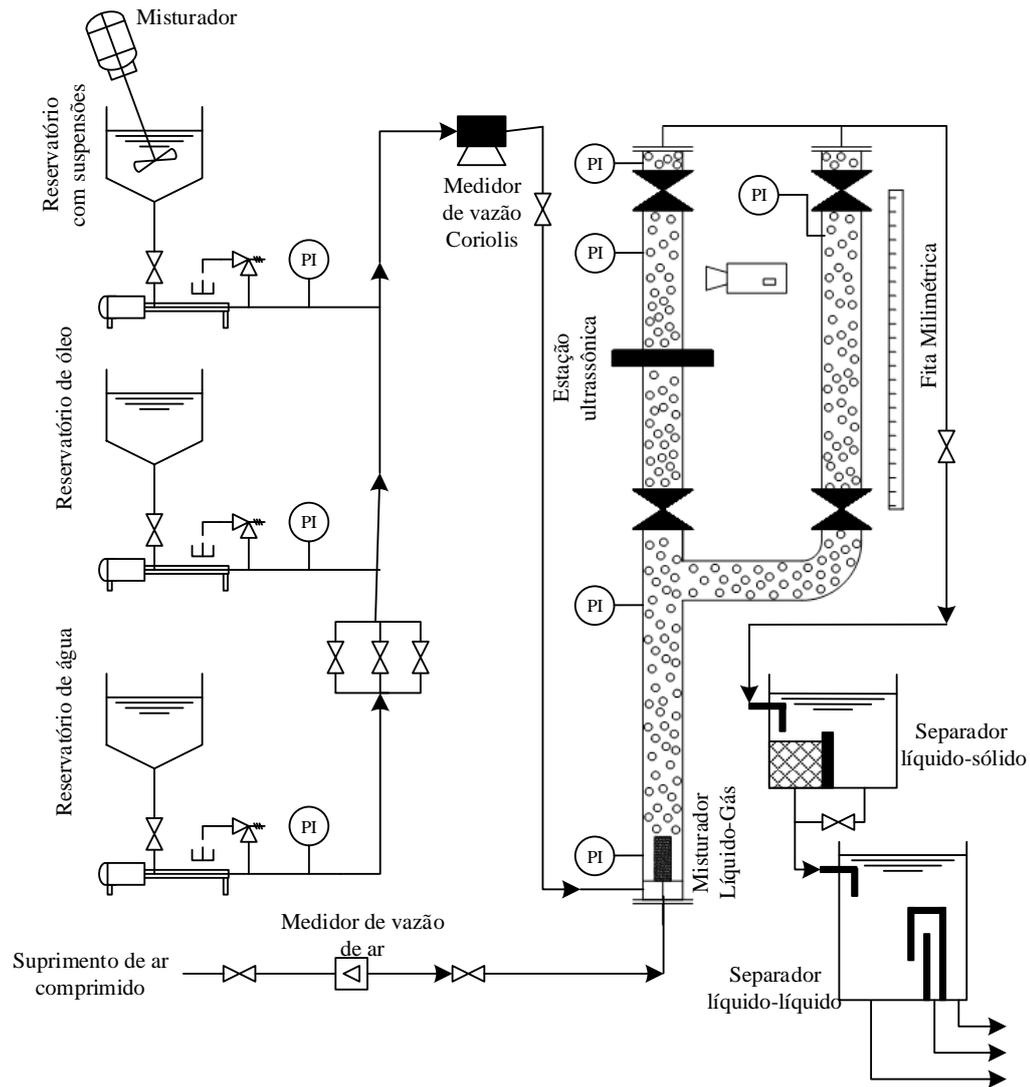


Figura 3-13: Vista esquemática do circuito de testes de escoamentos multifásico (LRF-UNIFEI).

### 3.3.2 Procedimento experimental

A Tabela 3-6 mostra os tipos de escoamentos testados. Foram obtidos dados em tubulações de 1 e duas polegadas para várias combinações de fases. Partículas de poliamidas foram utilizadas com a intenção de medir a velocidade da fase contínua com a técnica Doppler. Porém, a análise destas medidas não faz parte do presente trabalho. A Tabela 3-7 apresenta a faixa das condições operacionais testadas. A FVG variou entre 0 e 85% para a tubulação de uma polegada e de 0 a 35% para duas polegadas devido às restrições operacionais do circuito. Os experimentos foram executados utilizando o óleo mineral como fase contínua ( $\rho=814.5$  kg/m<sup>3</sup> e  $\mu=41.36$  mPa.s a 20 °C). Partículas de vidro, com 80-600  $\mu$ m de diâmetro, foram utilizadas para simular areia. Os valores para as velocidades superficiais do líquido,  $j_l$ , são aproximados, pois as partículas sólidas escoam junto com o líquido através do medidor Coriolis.

O sistema de aquisição foi configurado para operar com a taxa de aquisição em 20 MHz e com uma frequência de pulsação em 2 kHz. Foram capturados um total de 15.000 pulsos por amostra, o que gera um tempo de amostragem de 7,5 s.

Tabela 3-6: Tipos de escoamentos testados no circuito de testes de escoamentos multifásicos (LRF-UNIFEI).

Diâmetro do tubo [pol]	Tipo de escoamento (1)	Componentes				
		Óleo mineral	Ar	Poliamida (0,1% m/m)	Areia (1% m/m)	Água (10% m/m)
1	O-A	X	X			
	O-A-P	X	X	X		
	O-A-P-S	X	X	X	X	
	O-A-P-S-W	X	X	X	X	X
2	O-A	X	X			
	O-A-W	X	X	X		
	O-A-W-S	X	X		X	X

(1) O: Óleo; A: ar; P: Poliamida; S: Areia; W: Água.

Tabela 3-7: Condições operacionais dos experimentos realizados no circuito de testes de escoamentos multifásicos (LRF-UNIFEI).

Diâmetro do tubo [pol]	Tipo de escoamento (1)	Parâmetro				
		FVG [%]	$j_l$ [m/s]	$j_g$ [m/s]	$T_{oil}$ [°C]	$p_{seção\ de\ teste}$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]
1	O-A	0 – 83	0,10 – 0,30	0 – 0,17	24	0.5
	O-A-P	0 – 85	0,10 – 0,26	0 – 0,37	22	0.4
	O-A-P-S	0 – 84	0,10 – 0,30	0 – 0,10	21	0.4
	O-A-P-S-W	0 – 82	0,10 – 0,28	0 – 0,16	24	0.7
2	O-A	1 – 33	0,05 – 0,17	0 – 0,02	30	0.4
	O-A-W	0 – 36	0,04 – 0,17	0 – 0,04	31	0.5
	O-A-W-S	0 – 36	0,04 – 0,17	0 – 0,02	27	0.5

(1) O: Óleo; A: ar; P: Poliamida; S: Areia; W: Água.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE ATENUAÇÃO ACÚSTICA

Neste capítulo, são apresentados os resultados de atenuação dos sensores ultrassônicos em função da FVG. O método de tratamento dos dados ultrassônicos é explicado no Anexo B. Os resultados aqui apresentados referem-se aos dispositivos experimentais apresentados no Capítulo 3.

A razão de energia para qualquer transdutor foi definida como a energia carregada por um pulso individual dividida pela energia carregada pelo sinal de referência, isto é, a energia máxima a ser recebida por aquele mesmo transdutor. Para os sensores a 0° e a 180°, o sinal de referência corresponde ao sinal adquirido somente com a fase contínua monofásica (óleo mineral). A Equação (4-1) apresenta a fórmula utilizada para o cálculo da razão de energia.

$$\frac{E_{n\phi}}{E_{1\phi}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (V_{multifásico})^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} (V_{monofásico})^2 dt} \quad (4-1)$$

Para os sensores a 45° e 135°, não existe energia refletida quando a tubulação está preenchida somente com a fase contínua. Neste caso, o denominador da equação acima foi substituído com a condição para a qual as reflexões laterais eram mais intensas no escoamento bifásico óleo-ar. Essa condição, que foi experimentalmente verificada, ocorreu aproximadamente em 28% de FVG. Enfatiza-se que este valor se refere especificamente aos experimentos aqui descritos, podendo sofrer variações em função das propriedades físicas da fase contínua e do diâmetro da tubulação.

#### 4.1 MEDIÇÕES ULTRASSÔNICAS NA MONTAGEM EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA COM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS LÍQUIDO-GÁS

##### 4.1.1 Misturas bifásica petróleo-ar

Conforme explicado no procedimento experimental, *pontos de controle* são medições ultrassônicas da fase contínua quando não há injeção de ar comprimido. Essas medições eram realizadas entre as medições ultrassônicas com injeção de ar.

Os gráficos para os *pontos de controle* dos transdutores a 180 e 0° são mostrados na Figura 4-1 e na Figura 4-2, respectivamente. As abscissas referem-se aos valores de FVG imediatamente antes de se interromper a vazão de ar para obtenção dos *pontos de controle*. As ordenadas referem-se aos valores de razão de energia do sensor. Observa-se que a intensidade

do sinal no transdutor a  $180^\circ$  (Figura 4-1) decai exponencialmente para todas as amostras e, a partir de aproximadamente 7%, praticamente já não há mais sinal mensurável neste sensor. Ou seja, a fase contínua das cinco amostras usadas alterou-se durante a realização do experimento, causando a diminuição da energia do pulso ultrassônico que atravessa a seção da tubulação e atinge o transdutor a  $180^\circ$ . Aparentemente, microbolhas se formaram durante a passagem do ar pela fase contínua e permaneceram aprisionadas no meio fluido devido à sua alta viscosidade.

No transdutor a  $0^\circ$  (Figura 4-2), as razões de energia passam por um mínimo localizado aproximadamente em 5%. Segue-se então uma região de razão de energia crescente que ultrapassa até mesmo o valor unitário. Ao que tudo indica, inicialmente, quando a densidade de microbolhas é pequena, as microbolhas causam o espalhamento do sinal reduzindo a razão de energia nos sensores a  $0$  e  $180^\circ$ . Porém, ao se atingir um valor crítico da densidade de microbolhas, seu efeito passa a ser também de reflexão do feixe acústico, aumentando a energia que chega no transdutor a  $0^\circ$ . Isto é, ao se tornarem muito numerosas, agem em bloco como grandes superfícies refletoras mais do que como espalhadores individuais do feixe sonoro.

A Figura 4-3 e a Figura 4-4 mostram os pontos de controle para os sensores laterais. Nota-se um comportamento distinto entre os dois sensores. Enquanto o sensor a  $45^\circ$  apresenta uma tendência geral crescente, o sensor a  $135^\circ$  apresenta a tendência inversa. Este comportamento parece indicar mais uma vez que as microbolhas agem em bloco como superfícies refletoras. É curioso ainda que, no sensor a  $135^\circ$ , o sinal nunca chega a se anular como ocorreu para o sensor a  $180^\circ$ .

Do ponto de vista prático, medidas da FVG seriam possíveis, mas teriam que ser corrigidas devido ao erro sistemático introduzido pelas microbolhas. Todavia, esta correção requer o conhecimento da densidade populacional e distribuição de tamanho das microbolhas. Estas informações podem não estar disponíveis facilmente.

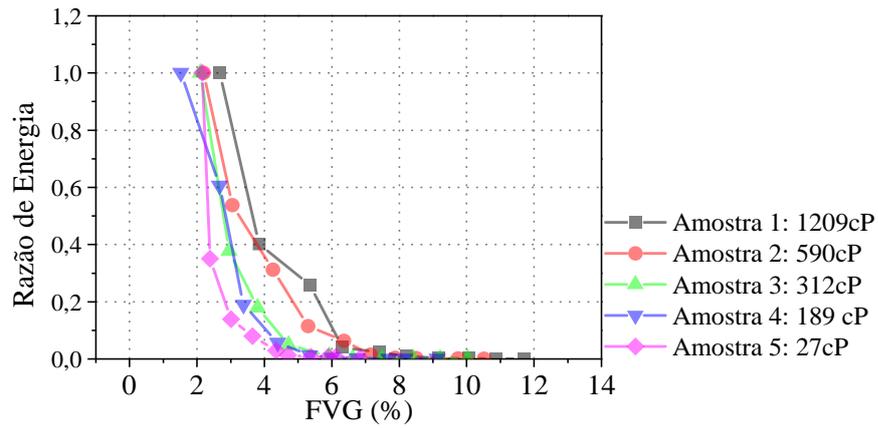


Figura 4-1: Pontos de controle do transdutor a 180° no protótipo.

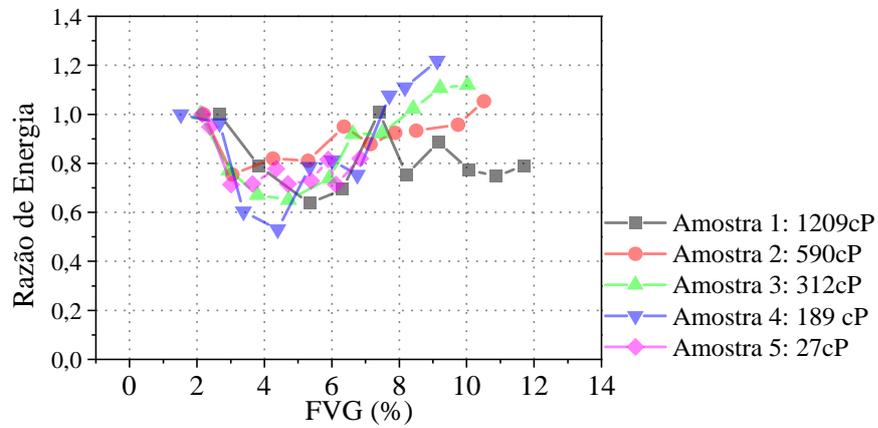


Figura 4-2: Pontos de controle do transdutor a 0° no protótipo.

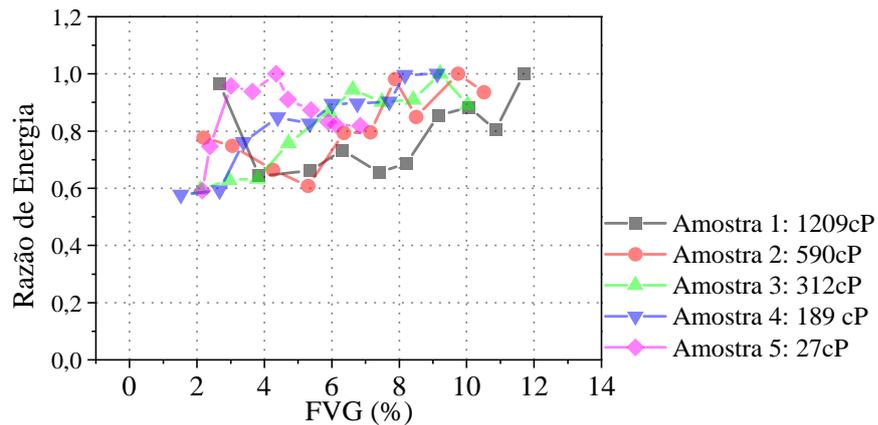


Figura 4-3: Pontos de controle do transdutor a 45° no protótipo.

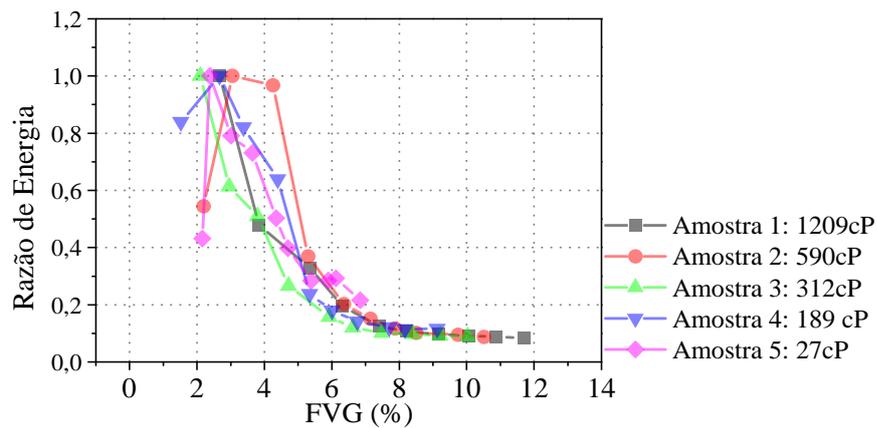


Figura 4-4: Pontos de controle do transdutor a 135° no protótipo.

A Figura 4-5 à Figura 4-8 apresentam os resultados, para cada transdutor, dos testes de medição da FVG para as várias amostras testadas. Observa-se que o sensor a 180° (Figura 4-5) apresentou um decaimento mais gradual quando houve a injeção de ar do que o apresentado nos *pontos de controle*. Ou seja, além dos efeitos causados pelas microbolhas, estruturas gasosas dispersas estão refletindo o sinal, diminuindo ainda mais a parcela que chega ao sensor a 180°. Deve-se notar também que não houve efeito sensível da viscosidade, tendo todos os dados seguido a mesma tendência. Este é um fator favorável às medidas ultrassônicas de FVG, pois permite estabelecer uma relação única, sem correções em função da viscosidade, entre a razão de energia e a FVG.

O sensor a 0° (Figura 4-6) apresentou grande sensibilidade à FVG em toda a faixa testada, pois, como se viu acima, as microbolhas jamais anulam o sinal neste sensor. Novamente, observa-se que o sensor a 0°, além de captar os efeitos causados pela presença das microbolhas, também captou efeitos da presença de estruturas gasosa dispersas na fase contínua. A partir de aproximadamente 5%, as curvas apresentaram um ponto de mínimo, tão mais acentuado quanto menor a viscosidade da amostra. Este comportamento é compatível com o efeito das microbolhas verificado no gráfico para os *pontos de controle* da Figura 4-2. A significativa estratificação das curvas a partir do ponto de mínimo concorda com a estratificação verificada nos pontos de controle da Figura 4-2.

Os sensores laterais (Figura 4-7 e Figura 4-8) seguiram o comportamento determinado pelas microbolhas. Diferentemente do que ocorreu para os sensores a 0 e 180°, esses sensores não sofreram influência significativa da passagem de estruturas gasosas. Por conseguinte, qualquer tentativa de medição da FVG na presença das microbolhas deverá prever a remoção deste erro sistemático dos resultados. Todavia esta correção requer a modelagem do

comportamento acústico das microbolhas e informações empíricas sobre sua densidade populacional.

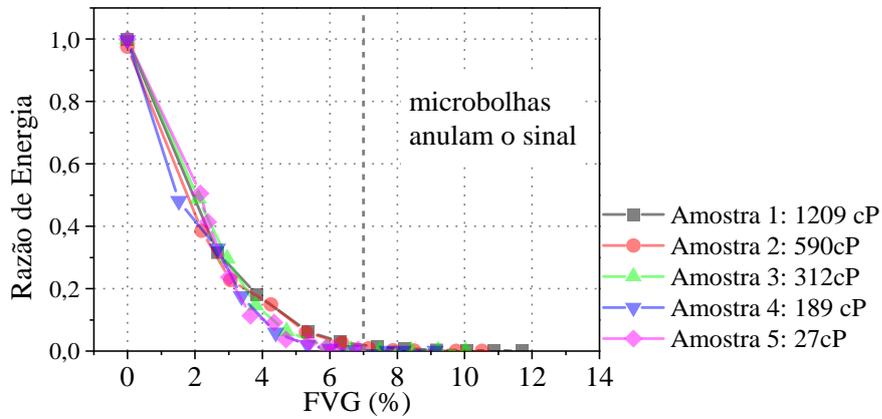


Figura 4-5: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 180°.

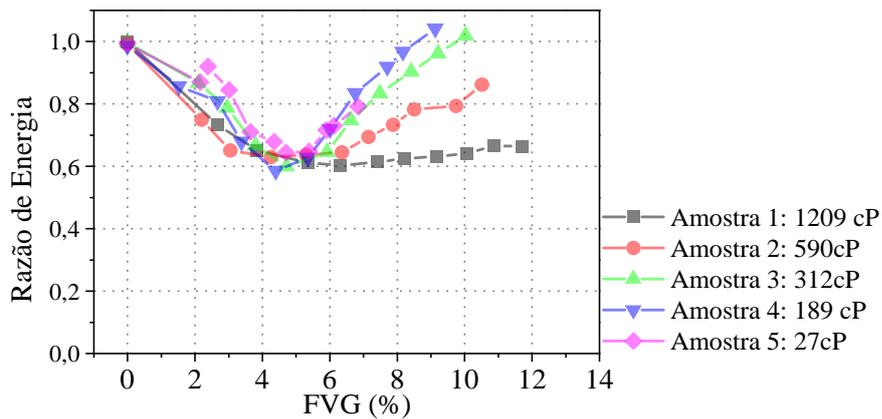


Figura 4-6: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 0°.

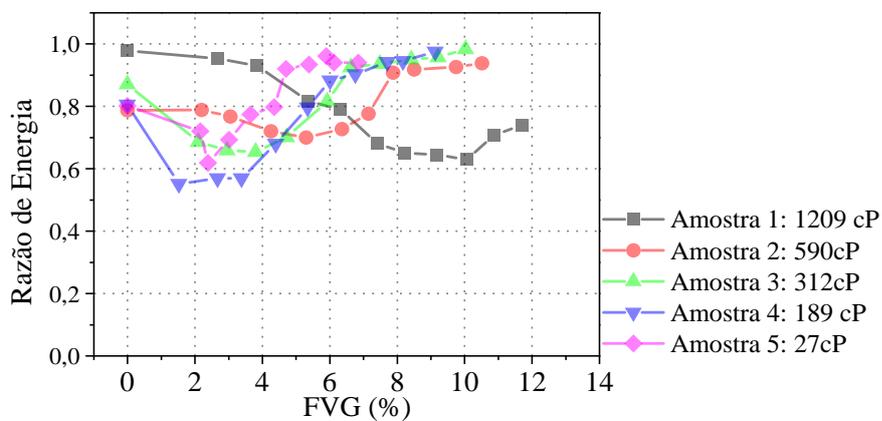


Figura 4-7: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 45°.

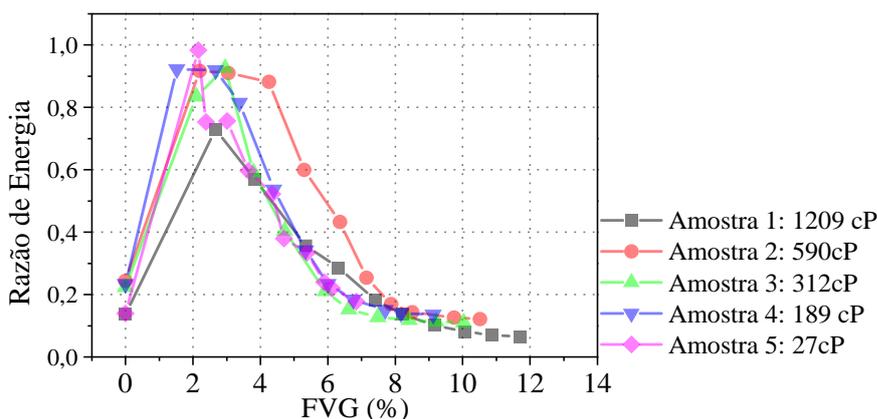


Figura 4-8: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 135°.

#### 4.1.2 Misturas bifásicas de soluções aquosas de glicerina e ar

A Figura 4-9 e a Figura 4-10 mostram os resultados para os pontos de controle nos transdutores a 0° no protótipo ultrassônico e na extremidade inferior da tubulação, respectivamente. Assim como explicado na seção anterior, os valores de FVG na abscissa dos gráficos referem-se na verdade às condições experimentais imediatamente antes de se fechar a vazão de ar para obtenção dos *pontos de controle*.

Nota-se de imediato um comportamento distinto entre os dois gráficos, o que indica um efeito diferente da interface livre e do elemento poroso na geração de microbolhas. Conforme mostra a Tabela 4-1, para as amostras 1, 2, 3 e 4, o transdutor da extremidade inferior não registrou a presença de microbolhas. Já o transdutor do protótipo registrou a presença de microbolhas a partir de 21 e 18% de FVG para as amostras 3 e 4, respectivamente. Portanto, esses resultados indicam que a interface livre ou é a maior geradora de microbolhas ou as microbolhas tendem a se acumular próximo a ela.

O aparecimento de microbolhas é evidenciado por um início de queda na intensidade do sinal (Figura 4-9) e tem perfeita correlação com a viscosidade do líquido, sendo que, quanto mais viscosa a fase contínua, mais cedo aparecem microbolhas. Somente para a água e para a solução de 1,1 cP não foi observada a formação significativa de microbolhas na faixa de FVG testada. Mais ainda, para as três viscosidades mais altas (8, 12 e 16 cP) o efeito das microbolhas variou com o aumento da FVG. Ocorreu primeiramente uma deterioração brusca da razão de energia seguida de um ponto de mínimo e recuperação rápida. Este mesmo efeito foi evidenciado no sensor a 0° nos experimentos com petróleo, exceto que, para o petróleo, todas as amostras sofreram forte influência da presença de microbolhas em toda a faixa de vazão.

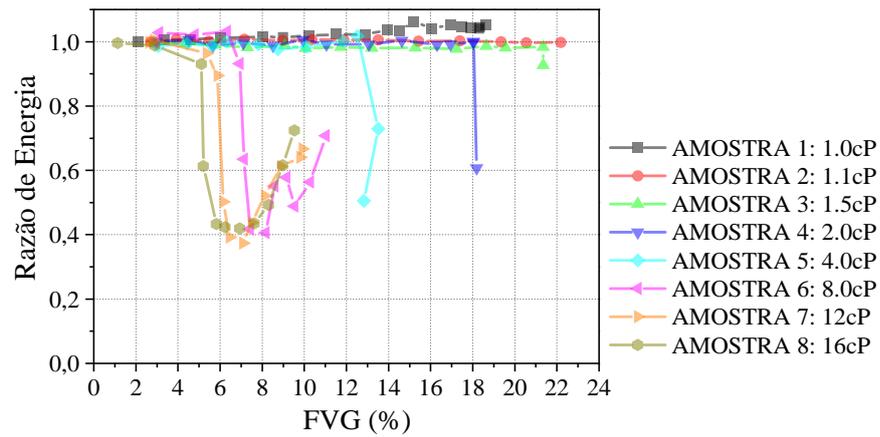


Figura 4-9: Pontos de controle do transdutor a 0° no protótipo ultrassônico.

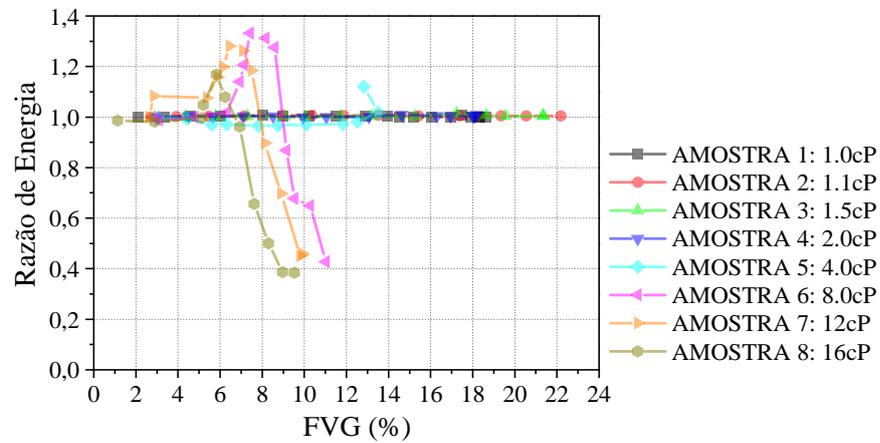


Figura 4-10: Pontos de controle do transdutor a 0° na extremidade inferior da tubulação.

Tabela 4-1: Dados relativos aos pontos de controle para monitoramento das microbolhas.

N° Amostra	$\mu$ [cP]	FVG (%) Aparecimento Microbolhas	
		Protótipo	Extremidade Inferior
1	1,0	-	-
2	1,1	-	-
3	1,5	21	-
4	2,0	18	-
5	4,0	12	13
6	8,0	7	7
7	12,0	5	3
8	16,0	5	5

Os pontos de controle para as posições 45°, 135° e 180° só existem para os transdutores no protótipo (Figura 4-11 a Figura 4-13). No sensor a 180° (Figura 4-11), a influência das

microbolhas é evidenciada pela queda do sinal para abaixo do valor unitário. Verifica-se que isto ocorre na ordem decrescente das viscosidades, isto é, ocorre mais cedo para as soluções mais viscosas.

Para os sensores laterais, teoricamente a intensidade do sinal deveria ser nula, pois não deveria haver espalhadores acústicos. Todavia, a Figura 4-12 e a Figura 4-13 mostram que as microbolhas presentes espalham parte da energia do feixe acústico em todas as condições testadas. Em valores absolutos, a parcela espalhada não é muito alta como comprovam os resultados para os transdutores a  $0^\circ$  e a  $180^\circ$ , que nunca chegam próximo de zero (Figura 4-9 e Figura 4-11). Espera-se, portanto, que o erro sistemático introduzido nas medições acústicas não seja alto.

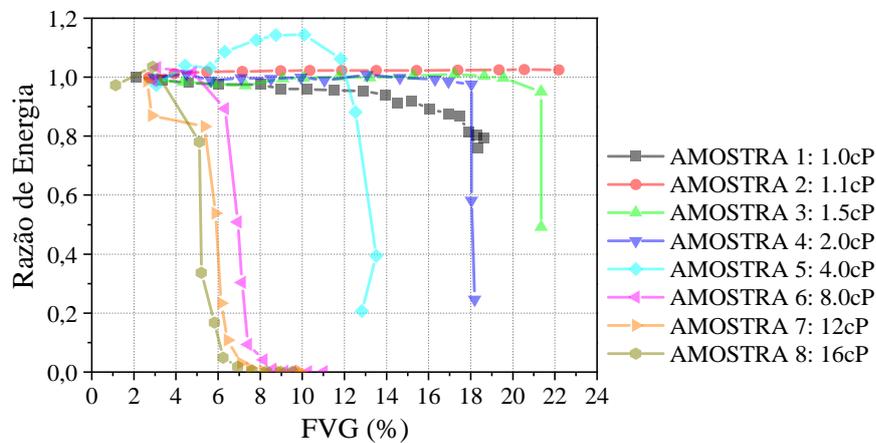


Figura 4-11: Pontos de controle do transdutor a  $180^\circ$  no protótipo.

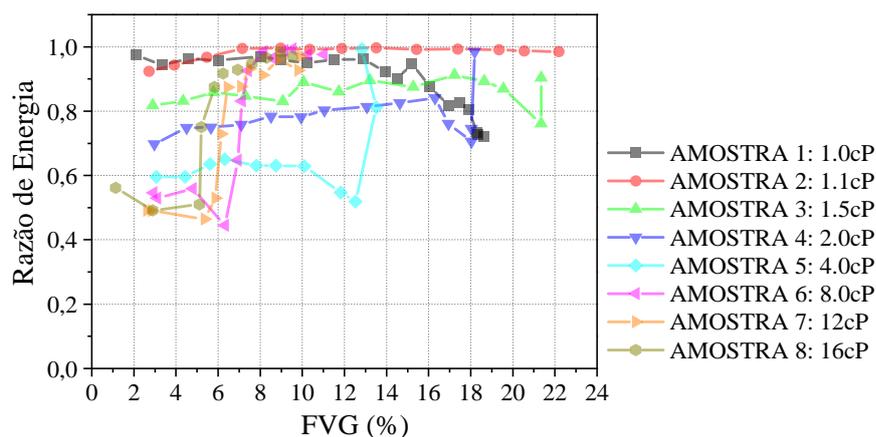


Figura 4-12: Pontos de controle do transdutor a  $45^\circ$  no protótipo.

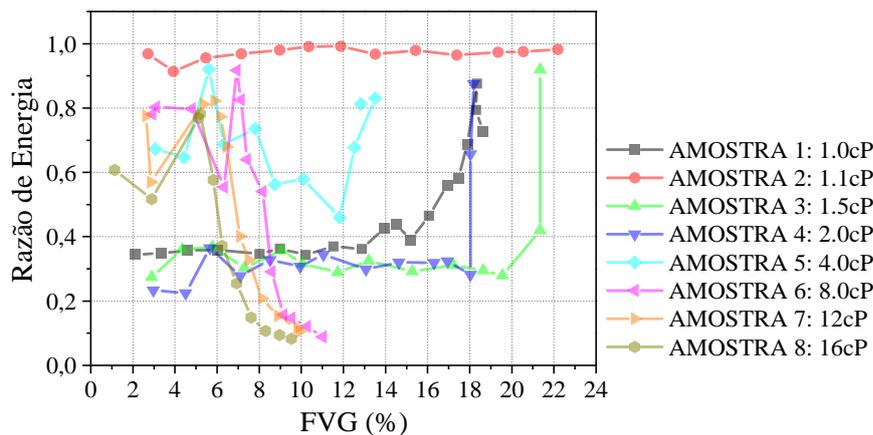


Figura 4-13: Pontos de controle do transdutor a 135° no protótipo.

Uma vez identificada a influência de microbolhas nos resultados de atenuação acústica, foram obtidos os gráficos para a razão de energia em função da FVG nos vários sensores do protótipo ultrassônico (Figura 4-14 a Figura 4-17). Deve-se ressaltar que, para estes gráficos, o ar estava sendo borbuhlado na fase líquida quando foram coletadas as várias amostras.

No gráfico para o transdutor a 180° (Figura 4-14), observa-se uma acentuada diminuição na razão de energia com o aumento da FVG, resultando em pouca sensibilidade nesse sensor para valores de FVG maiores do que 2%. Para a amostra 1, água pura, essa queda foi menos acentuada, sendo que o sensor perde sensibilidade para valores de FVG maiores do que 8%. No entanto, esse resultado mostra que, apesar da presença de microbolhas no escoamento, o transdutor a 180° foi fortemente afetado pela presença de estruturas gasosas na fase contínua.

O sensor a 0° (Figura 4-15) apresentou grande sensibilidade à FVG na faixa de 0 a 6% de FVG, onde houve uma queda acentuada da razão de energia em função do aumento da FVG. Acima de 6%, para as amostras com viscosidade de até 4 cP, ocorreu um leve aumento na razão de energia com o aumento da FVG, contrariando o efeito causado pelas microbolhas que tendem a diminuir a razão de energia (Figura 4-9). Isso mostra que o sensor a 0°, apesar de sofrer influência da presença de microbolhas nas fases contínua, também foi capaz de captar a presença de estruturas gasosas. No entanto, para as amostras com viscosidades superiores a 4 cP, o sensor a 0° parece ser mais afetado pelas microbolhas do que pelas estruturas dispersas.

Os transdutores a 45° (Figura 4-15) e a 135° (Figura 4-16) apresentam bastante sensibilidade a variações da FVG. Todavia, conforme mostrado na Figura 4-12 e na Figura 4-13, a influência das microbolhas nestes sensores se estendeu por toda a faixa de FVG testada.

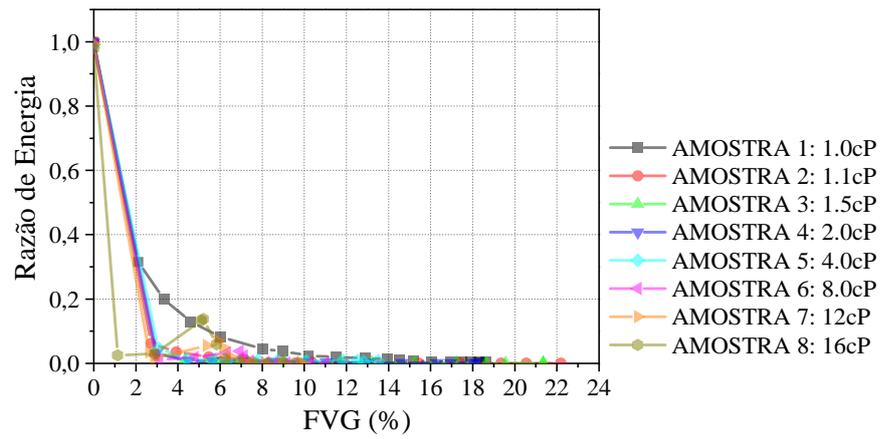


Figura 4-14: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 180°.

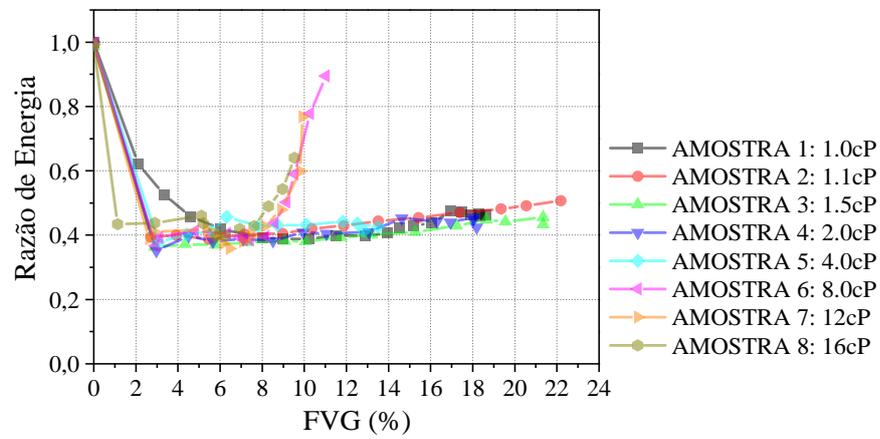


Figura 4-15: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 0°.

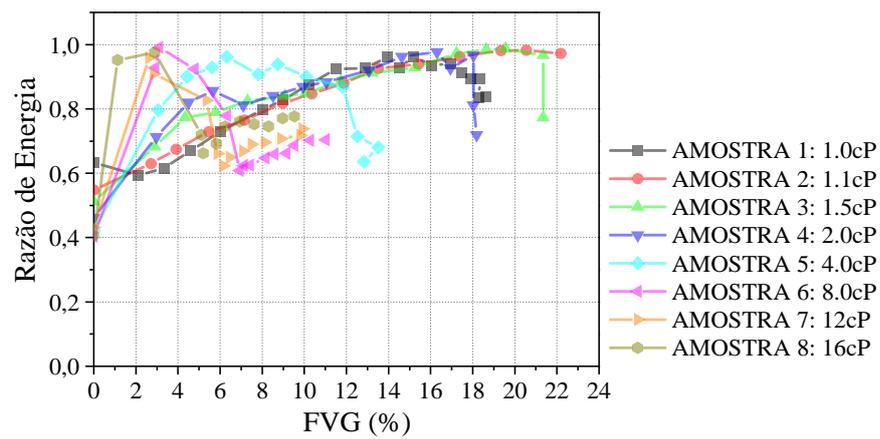


Figura 4-16: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 45°.

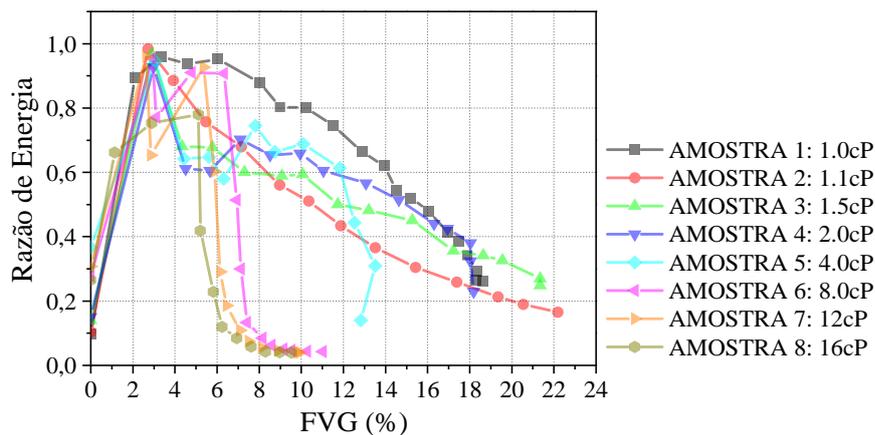


Figura 4-17: Razão de energia em função de FVG no transdutor a 135°.

#### 4.1.3 Avaliação geral do efeito das microbolhas sobre as medições multifásicas

Do exposto acima sobre os experimentos com soluções aquosas de glicerina e misturas de petróleo e óleo diesel, verifica-se a grande influência que microbolhas podem ter sobre medições ultrassônicas em escoamentos multifásicos. As microbolhas podem impedir completamente a transmissão do sinal e, antes mesmo desta situação extrema, elas introduzem um erro sistemático nas medições cuja estimativa depende de variáveis difíceis de serem obtidas na prática.

Carvalho [43] realizou uma pesquisa bibliográfica a fim de se saber da eventual presença de microbolhas em oleodutos ou outros pontos possíveis de aplicação do protótipo ultrassônico aqui desenvolvido. Não foram encontradas informações sobre a presença de microbolhas em escoamentos de óleos leves. Os artigos encontrados tratam de microbolhas em situações específicas envolvendo óleos pesados.

Sheika e Pooladi-Darvish [44] investigaram a existência e importância de microbolhas na recuperação de óleos pesados movidos por gás em solução. Os experimentos foram divididos em “rápidos” e “lentos” em função dos valores do gradiente de pressão ( $\nabla p$ ), alto ou baixo, respectivamente, aplicado a um meio poroso preenchido com óleo. Foi também investigado, de maneira independente, o efeito da taxa de extração de óleo durante a recuperação que, por sua vez, leva a valores determinados da taxa de decaimento da pressão ( $dp/dt$ ). Nos experimentos lentos, não foi possível confirmar a existência de microbolhas em solução no óleo. Nos experimentos rápidos, verificou-se que as microbolhas se formam na rocha porosa e se movem com o óleo, nem mais lentas nem mais rápidas, atuando como agentes de deslocamento e permitindo valores mais altos de recuperação. Em resumo, os resultados experimentais

indicaram que os altos valores do gradiente de pressão nos experimentos rápidos são um fator importante na criação de microbolhas que fluem com o óleo e permitem aumentar os níveis de recuperação. Por outro lado, variações na taxa de decaimento da pressão não afetaram as diferenças de comportamento entre os experimentos rápidos e lentos.

Claridge e Pratts [45] postularam que bolhas formadas sob pressões abaixo do ponto de bolha se tornam estáveis devido à separação de partículas de asfaltenos do óleo. As microbolhas movem-se então com o óleo, que adquire valores de viscosidade efetiva bastante reduzidos. Bora *et al.* [46] realizaram uma série de experimentos para visualização de microbolhas e análise de seu efeito sobre a recuperação de óleos pesados movidos por gás em solução. Nestes experimentos, foram usados óleos crus com e sem asfaltenos, bem como óleo mineral sintético. Os testes realizados não permitiram a confirmação da existência de microbolhas estáveis nem da possível ação de asfaltenos como estabilizadores de microbolhas. Em um estudo posterior, Bora *et al.* [47] concluíram que o aumento dos níveis de recuperação de óleos pesados poderia estar ligado à ação de microbolhas menores do que 2  $\mu\text{m}$ .

Em vista destes resultados muitas vezes contraditórios, Sheika e Pooladi-Darvish [44] concluíram que as divergências entre diferentes autores sobre a existência e importância de microbolhas se devem às diferentes condições experimentais nos vários estudos. Mais ainda, as afirmações feitas são de caráter qualitativo e não permitem, portanto, estabelecer critérios práticos acerca das microbolhas. De qualquer maneira, foi feita uma comparação entre os gradientes de pressão nos experimentos de Sheika e Pooladi-Darvish [44] e o gradiente no elemento poroso usado para borbulhamento de ar nos experimentos realizados no LESQ-FEQ-UNICAMP. No primeiro caso, o gradiente de pressão no empacotamento de areia varia entre 3,3 e 9,6 psi/cm entre os experimentos lentos e rápidos. Nos experimentos no LESQ-FEQ-UNICAMP, o gradiente de pressão no elemento poroso é estimado em 8,0 psi/cm, compatível portanto com os experimentos rápidos de Sheika e Pooladi-Darvish [44] e a consequente formação de microbolhas.

Desta pesquisa bibliográfica, Carvalho [43] tirou as seguintes conclusões:

- A excessiva formação de microbolhas nos experimentos no LESQ-FEQ-UNICAMP com soluções aquosas de glicerina parece estar ligada às limitações do próprio experimento em que fase líquida não escoou.

- O gradiente de pressão no elemento poroso nos experimentos realizados no LESQ-FEQ-UNICAMP é compatível com a formação de microbolhas conforme descrito em Sheika e Pooladi-Darvish [44].
- A medição ultrassônica da FVG em óleos pesados deve passar preliminarmente pela verificação da possível coexistência de microbolhas e massas gasosas maiores naquela situação específica. Caso existam, o efeito das microbolhas deve ser levado em conta nos resultados, o que pode ser uma tarefa muito complexa.
- Não foram encontradas referências sobre a existência de microbolhas em óleos leves, o que pode indicar que elas não ocorram nestas situações.
- Em experimentos realizados com escoamentos bifásicos de óleo mineral e ar [3], o comportamento verificado é semelhante qualitativamente àquele observado em escoamentos bifásicos de água e ar [48]. Estes resultados apontam para influência pequena, caso exista, nos experimentos com óleo mineral apesar da viscosidade relativamente alta, 33 cP.
- Em situações onde a fase gasosa esteja presente somente sob a forma de microbolhas, isto é, sem a existência de massas gasosas maiores, a técnica ultrassônica pode ser aplicada para medição da FVG de maneira bastante eficaz. Isto se deve ao fato de microbolhas serem ressonantes para as frequências normalmente usadas nas medições ultrassônicas, o que as torna facilmente detectáveis.

Finalizando, não parece ser possível antecipar se haverá ou não presença de microbolhas nos experimentos com escoamentos bifásicos de óleos leves e gás. As evidências aqui levantadas apontam para a sua ausência, mas somente a efetiva experimentação poderá dizê-lo com certeza.

## **4.2 CIRCUITO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS UNIFEI**

### **4.2.1 Análise das filmagens rápidas**

O conhecimento dos padrões de escoamento simplifica a análise e o entendimento dos resultados apresentados pelos sinais ultrassônicos. A Figura 4-18 apresenta os padrões de escoamento observados na tubulação de uma polegada para o escoamento bifásico óleo-ar. O padrão bolhas dispersas foi observado para valores de FVG entre 0 e 4% (Figura 4-18a); as

bolhas possuíam aproximadamente 2 mm de diâmetro. Para valores da FVG próximos de 4%, as bolhas começaram a coalescer formando as primeiras calotas gasosas. As bolhas dispersas e as calotas coexistiram até FVT de aproximadamente 14% (Figura 4-18*b*). As calotas possuíam aproximadamente 20 mm de diâmetro. Para valores de FVG entre 14 e 30%, observou-se o padrão pistonado com interface suave e estável (Figura 4-18*c*); as bolhas de Taylor possuíam aproximadamente 20 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. No pistão de líquido, as bolhas dispersas permaneceram com mesmo tamanho de antes. Para a faixa de 30 a 45% de FVG, as interfaces das bolhas de Taylor tornaram-se irregulares e começaram a se quebrar em bolhas menores de aproximadamente 2 mm de diâmetro (Figura 4-18*d*). Para a faixa de 45 a 75% de FVG, foi observado o escoamento agitado (Figura 4-18*e*). Acima de 75% de FVG, observou-se o escoamento anular (Figura 4-18*f*). O filme líquido tinha aproximadamente 2,5 mm de espessura e as bolhas dispersas muito pequenas, com diâmetros na faixa de 0,2 a 0,8 mm. Nos experimentos trifásicos, óleo-ar-sólidos, e quadrifásicos, óleo-água-ar-sólidos, os padrões observados foram praticamente os mesmos que nos escoamentos óleo-ar.

Na tubulação de duas polegadas, os padrões foram difíceis de identificar devido à emulsificação da água no óleo. No entanto, devido à maior turbulência, as bolhas coalesciam mais facilmente do que na tubulação de uma polegada, formando calotas pequenas (Figura 4-19*a*). Essas calotas cresceram em tamanho até 12% de FVG (Figura 4-19*b*). As bolhas de Taylor com interface suave começaram a aparecer com 14% de FVG (Figura 4-19*c*) e cresceram até 35% de FVG (Figura 4-19*d*).

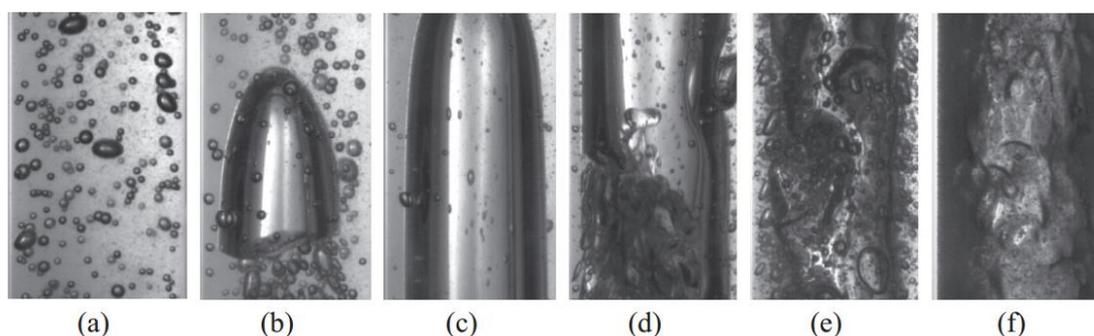


Figura 4-18: Padrões de escoamento para o escoamento bifásico óleo-ar na tubulação de uma polegada: (a) bolhas dispersas; (b) calotas gasosas; (c) pistonado estável; (d) pistonado instável; (e) agitado; (f) anular.

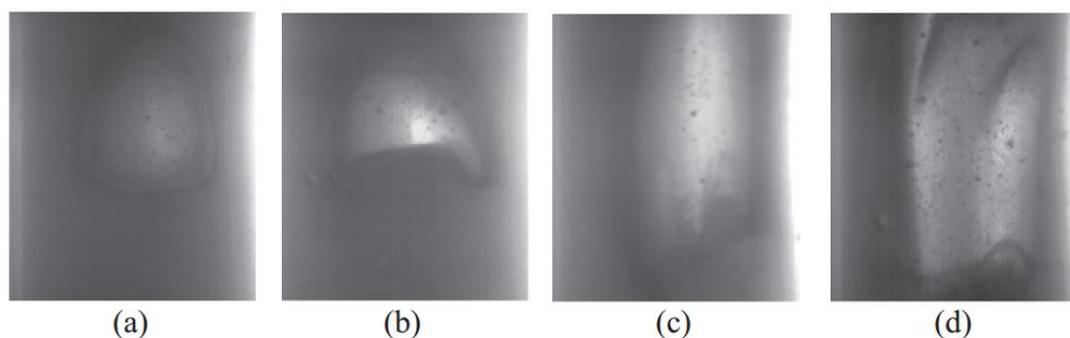


Figura 4-19: Padrões de escoamento para o escoamento bifásico óleo-ar na tubulação de duas polegadas: (a) pequenas calotas; (b) grandes calotas; (c) pistonado estável; (d) pistonado instável.

Para cada condição operacional, o padrão de escoamento foi identificado pela análise das imagens. Escoamentos que possuíam pequenas bolhas discretas e pequenas calotas foram classificados como *bolhas dispersas*. Escoamentos com calotas maiores, que ocupavam uma porção maior da seção transversal da tubulação, e o escoamento pistonado estável e instável foram classificados como *escoamentos intermitentes*. Quando as bolhas alongadas começavam a se quebrar em bolhas menores e todo o escoamento possuía um comportamento pulsante, foi usada a classificação de *escoamento agitado*. Finalmente, quando o gás escoava no interior de um filme de líquido contínuo na superfície interna da tubulação, a classificação utilizada foi *escoamento anular*. Essas quatro classificações foram utilizadas para a identificação dos padrões de escoamento pelas redes neurais (Capítulo 7).

#### 4.2.2 Resultados para a tubulação de uma polegada

A Figura 4-20 à Figura 4-23 apresentam os gráficos da razão de energia em função da FVG para todos os escoamentos multifásicos (Tabela 3-7) utilizando a tubulação de uma polegada. A barra de erro horizontal representa o desvio padrão para a média dos valores de FVG, que foram medidos com sistema de válvulas de fechamento rápido. A barra de erro vertical representa o desvio padrão da média das razões de energia, o que representa a variação nos fenômenos acústicos. É possível notar que o desvio padrão para a FVG é muito baixo para escoamentos de bolhas dispersas. Com o aparecimento de calotas e pistões, o desvio aumenta, atingindo os maiores valores nos padrões pistão instável e agitado. Já para o padrão anular, o desvio diminui. Este comportamento reflete a repetibilidade das amostras dos escoamentos aprisionadas no sistema de válvulas de fechamento rápido.

No sensor a  $180^\circ$  (Figura 4-20), a FVG é o principal parâmetro que controla a atenuação acústica, fato este constatado pela proximidade dos pontos de todos os tipos de escoamento. A

grande dispersão nos resultados pra FVG < 15% pode ser explicada pela baixa concentração de bolhas de ar, que diminui a importância das reflexões da interface óleo-ar, permitindo que os efeitos causados pela presença das fases dispersas água e sólidos se tornem mais significativos.

A razão de energia para os sensores a 0°, 45° e 135° (Figura 4-21 a Figura 4-23) possui uma tendência crescente com o aumento da FVG. Para o sensor a 0°, essa tendência é explicada pelo aumento do número de interfaces que refletem o sinal ultrassônico. Já para os sensores a 45° e 135°, a tendência é explicada também pelo aumento das interfaces óleo-ar que aumenta o espalhamento feixe ultrassônico. No entanto, para o sensor a 180°, a razão de energia decai exponencialmente com o aumento da FVG, pois o aumento da reflexão e espalhamento do feixe acústico diminui a energia que atinge este sensor. É importante notar a estratificação dos dados no sensor a 0°, especialmente para FVG < 50%. Isto indica o efeito das partículas suspensas e gotas de água na atenuação dos sinais. Para este sensor, o percurso percorrido pela onda acústica é duas vezes maior do que para o sensor a 180°, o que intensifica o efeito das fases dispersas. De uma maneira geral, pode-se dizer que quanto menor a FVG maior será a estratificação dos dados em função do tipo de escoamento (número de fases).

De um modo geral, pode-se concluir que os transdutores ultrassônicos são sensíveis à variação da FVG e do padrão de escoamento. Porém, não é possível aferir os sensores para todas as situações possíveis de serem encontradas na indústria. Por esta razão, redes neurais artificiais foram utilizadas tendo como entrada as razões de energia e como saída o padrão de escoamento ou a FVG. A aplicação de RNA na previsão da FVG e do padrão de escoamento será explicada com mais detalhes na Seção 6.1.

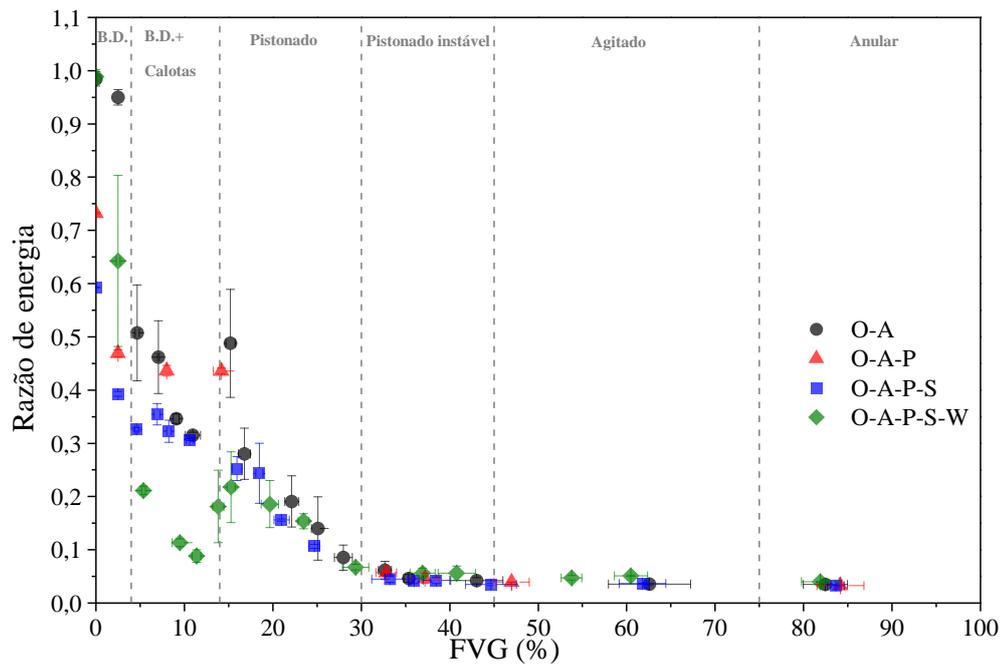


Figura 4-20: Razão de energia para o sensor 180° para escoamentos multifásicos na tubulação de uma polegada.

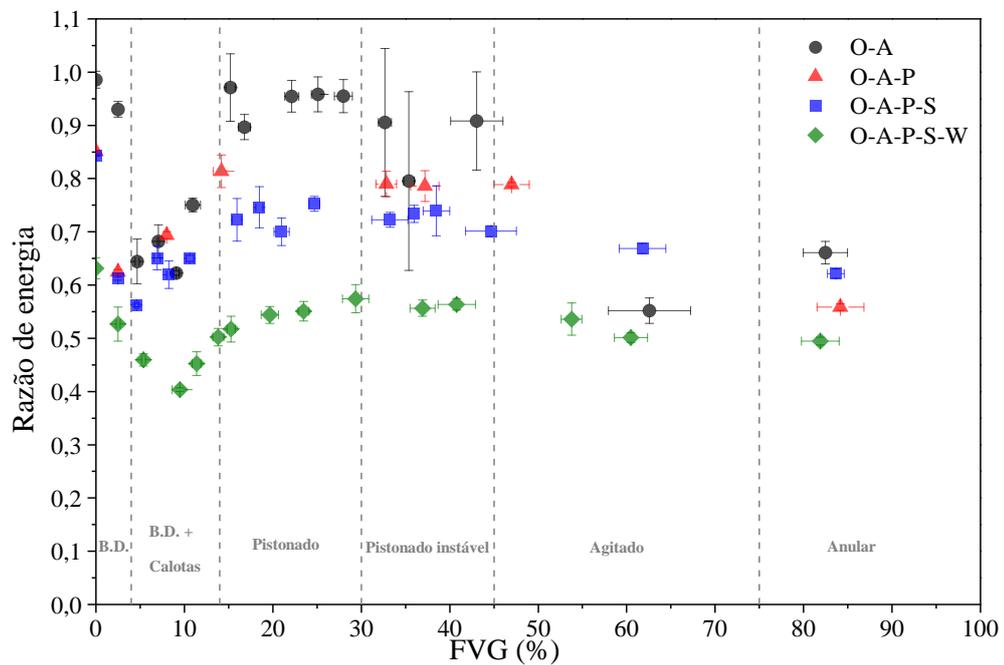


Figura 4-21: Razão de energia para o sensor 0° para escoamentos multifásicos na tubulação de uma polegada.

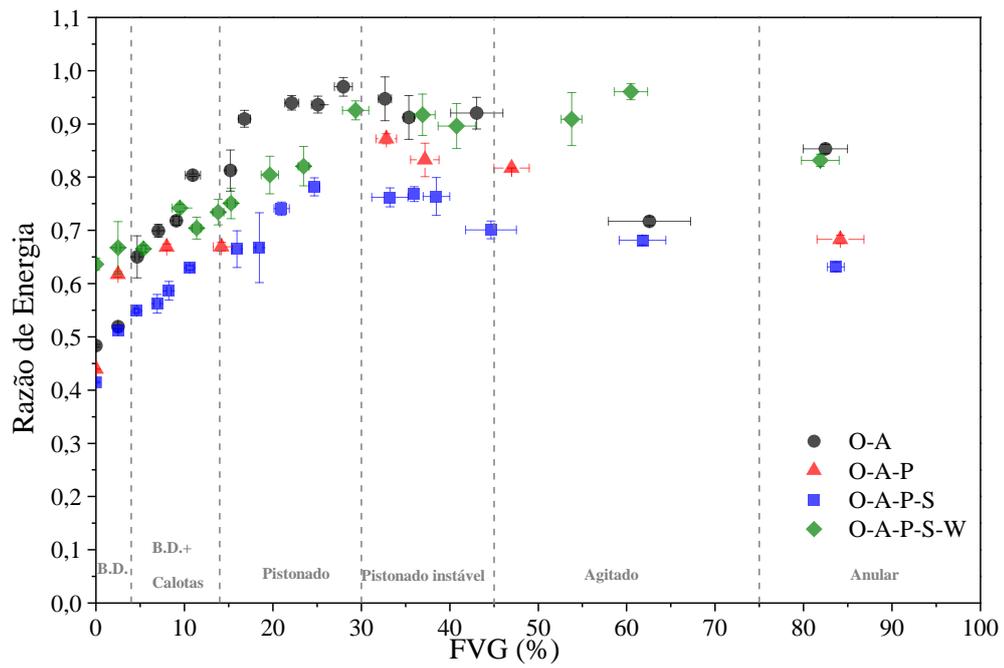


Figura 4-22: Razão de energia para o sensor 45° para escoamentos multifásicos na tubulação de uma polegada.

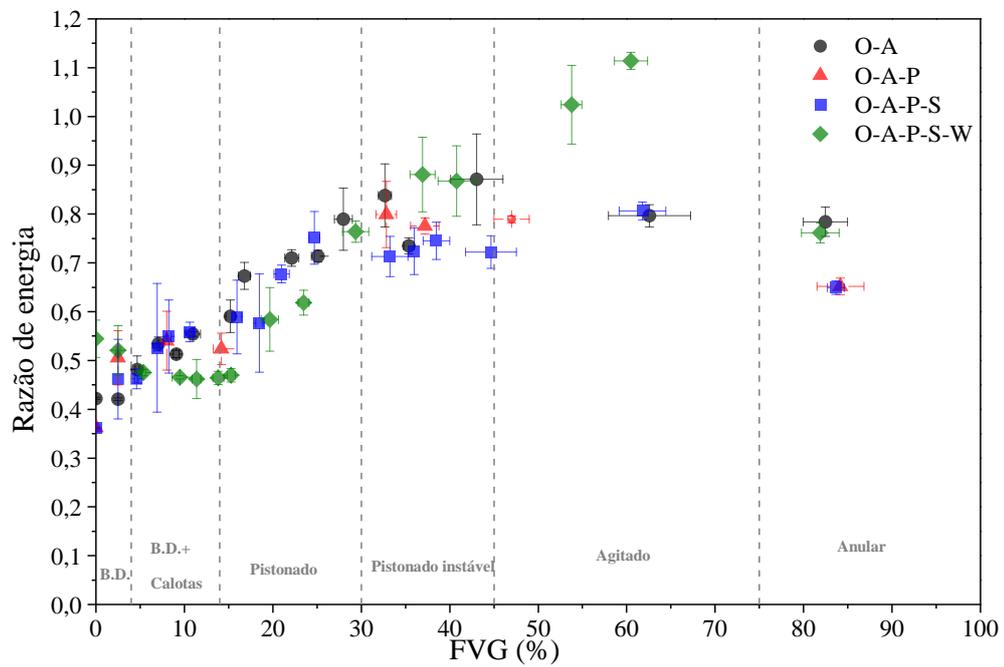


Figura 4-23: Razão de energia para o sensor 135° para escoamentos multifásicos na tubulação de uma polegada.

### 4.2.3 Resultados para a tubulação de duas polegadas

A Figura 4-24 à Figura 4-27 apresentam os gráficos da razão de energia em função da FVG para todos os escoamentos multifásicos utilizando a tubulação de duas polegadas (Tabela 3-7). O desvio padrão da FVG é pequeno quanto existem somente bolhas dispersas e calotas no escoamento e cresce com o aparecimento e crescimento das bolhas de Taylor. Novamente, este comportamento reflete a repetibilidade da amostra do escoamento aprisionada no sistema de válvulas de fechamento rápido. Quando estruturas gasosas grandes estão presentes, a repetibilidade diminui.

O gráfico para todos os tipos de escoamento multifásicos para o sensor a  $180^\circ$  (Figura 4-24) mostra que a estratificação dos dados devido a presença de água e sólidos na fase contínua ocorreu somente para o escoamento óleo-ar com  $FVG < 13\%$ . A maior parte da energia acústica recebida por este sensor vem da transmissão direta do pulso ultrassônico através da fase líquida. Portanto, existirão poucas obstruções na seção transversal para baixos valores de FVG e uma quantidade substancial de energia acústica irá atingir o sensor a  $180^\circ$ . Se a fase contínua contiver partículas suspensas e gotículas de água, o efeito causado por elas na dissipação acústica será mais perceptível. Conforme o número e o tamanho das interfaces gasosas aumentam na seção transversal, menos energia atingirá o sensor a  $180^\circ$  e, conseqüentemente, a estratificação dos dados será menos perceptível.

Para o sensor a  $0^\circ$  (Figura 4-25), a estratificação dos dados para o escoamento bifásico óleo-ar ocorreu em toda a faixa de FVG testada. As reflexões dos feixes ultrassônicos nas interfaces líquido-gás são tão importantes neste caso quanto a transmissão da energia acústica pela seção transversal tubulação. Para baixos valores de FVG, a transmissão direta prevalece e os efeitos causados pela presença de partículas sólidas e gotas de água são similares aos observados para o sensor a  $180^\circ$ . Em resumo, a maior estratificação para o sensor a  $0^\circ$  pode ser devido ao longo caminho percorrido pelo pulso ultrassônico, duas vezes maior do que para o sensor a  $180^\circ$ , o que aumenta a atenuação causada pelas fases dispersas.

Para os sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$  (Figura 4-26 e Figura 4-27), a recepção de energia depende totalmente do espalhamento do feixe acústico pelas bolhas e outras heterogeneidades no escoamento. O caminho acústico na fase líquida é curto e a quantidade de energia recebida por esses sensores é menor do que aquela recebida pelos sensores a  $0$  e  $180^\circ$ . Portanto, não era esperado que ocorresse estratificação significativa dos dados para estes sensores, o que foi confirmado pelos resultados experimentais.

Finalmente, o desvio padrão da razão de energia foi geralmente pequeno exceto para o escoamento óleo-ar na presença de calotas. Isto está de acordo com o fato de que calotas aparecem mais aleatoriamente e podem alterar significativamente a importância relativa das reflexões acústicas e do espalhamento.

Como foi o caso para a tubulação de uma polegada, os transdutores ultrassônicos se mostraram sensíveis à variação de FVG e à mudança de padrão de escoamento. Conforme explicado na Seção 6.1, redes neurais serão utilizadas para correlacionar os sinais dos transdutores ultrassônicos com a FVG e o padrão de escoamento.

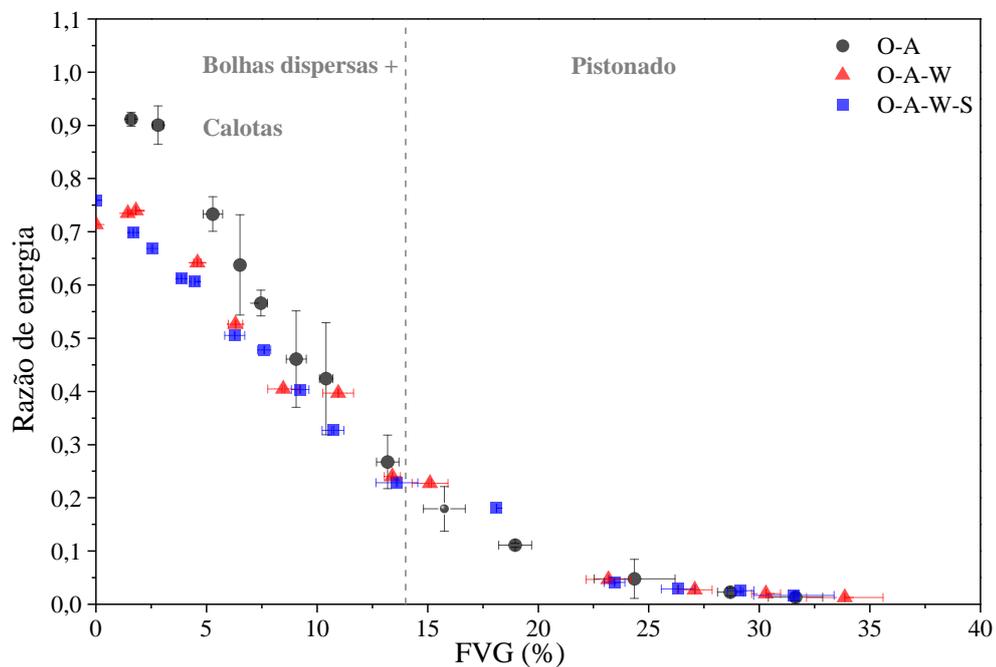


Figura 4-24: Razão de energia para o sensor 180° para escoamentos multifásicos na tubulação de duas polegadas.

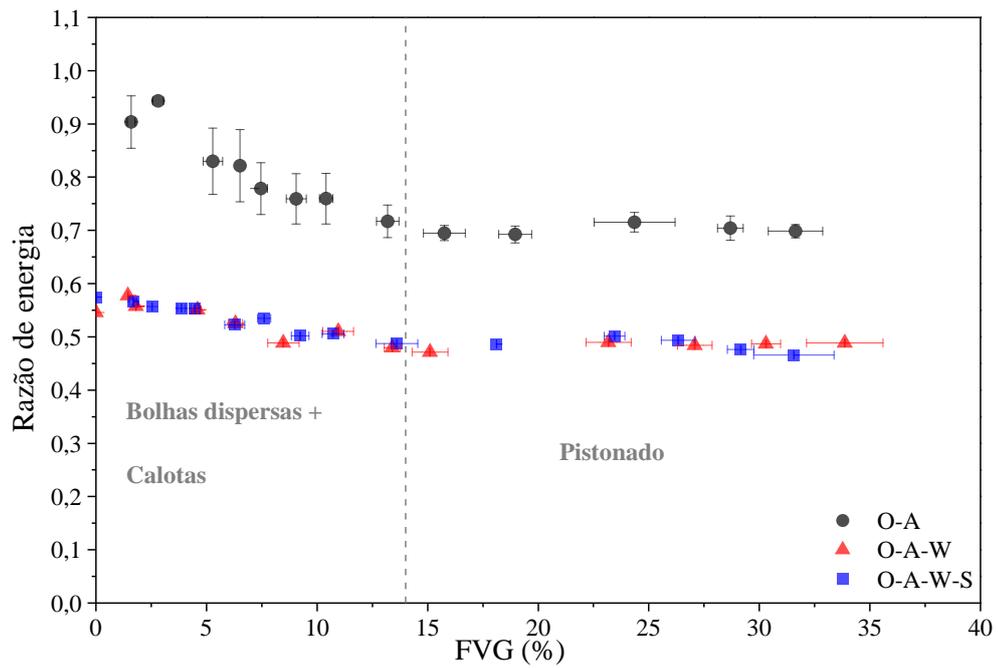


Figura 4-25: Razão de energia para o sensor 0° para escoamentos multifásicos na tubulação de duas polegadas.

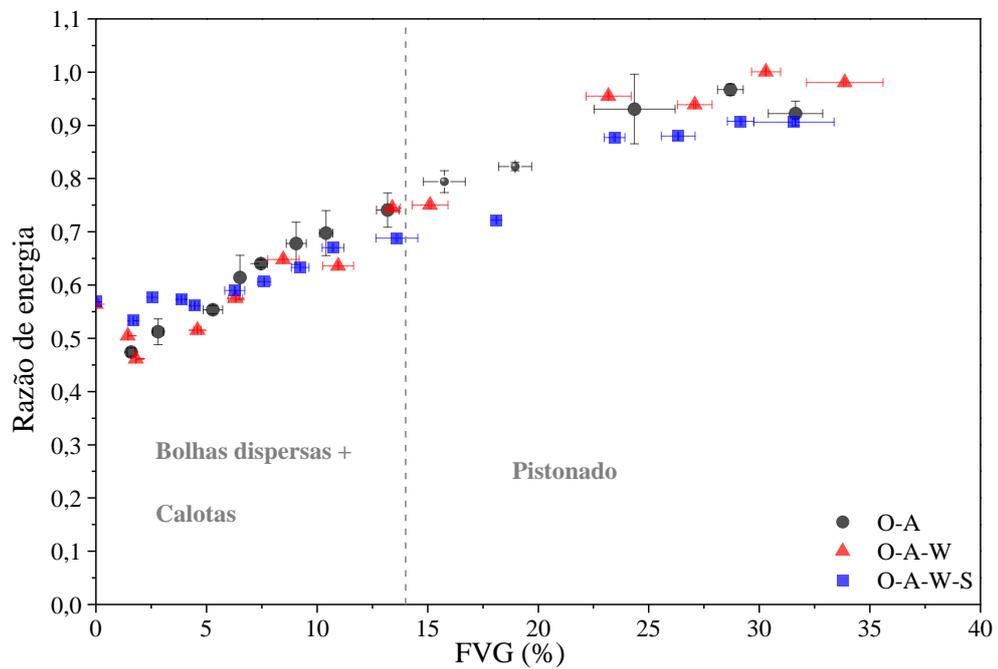


Figura 4-26: Razão de energia para o sensor 45° para escoamentos multifásicos na tubulação de duas polegadas.

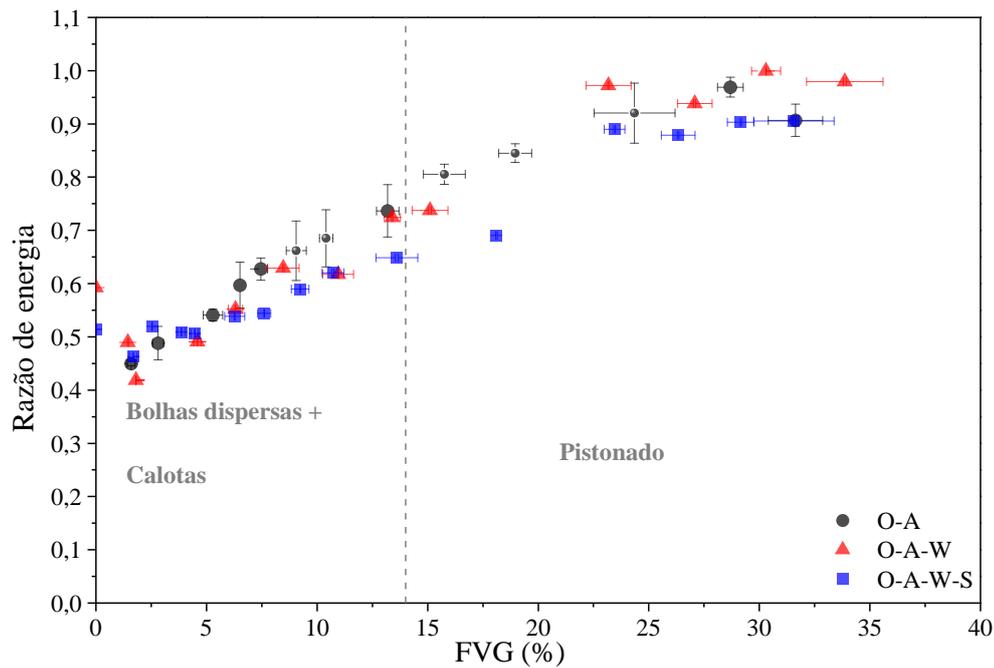


Figura 4-27: Razão de energia para o sensor 135° para escoamentos multifásicos na tubulação de duas polegadas.

#### 4.2.4 Mecanismos de dissipação acústica

Figueiredo *et al.* [3] fizeram um levantamento das teorias existentes para o cálculo da dissipação acústica nos experimentos realizados no circuito de escoamentos multifásicos UNIFEI. Nesta seção, os coeficientes de absorção acústica da fase contínua e das fases dispersas são calculados usando modelos matemáticos. Para o cálculo, foi considerado o óleo mineral a 20 °C como fase contínua. A frequência do pulso ultrassônico adotada foi de 2,25 MHz.

Conforme explicado em Figueiredo *et al.* [3], o coeficiente de absorção acústica da fase contínua foi calculado com base na teoria acústica clássica, conforme Equação (4-2), que considera somente absorção viscosa e térmica. O valor encontrado para o pulso de 2,25 MHz foi de 20,6 dB/m. Os cálculos foram refeitos para um pulso de 1 MHz e o resultado foi de 4,06 dB/m, o que é consistente com o valor experimental para uma amostra de óleo leve (4,33 dB/m) medido por Kalivoda [49].

$$\alpha_c = \alpha_s + \alpha_k = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \left[ \frac{4}{3} \eta + \frac{(\gamma - 1)k}{c_p} \right] \quad (4-2)$$

Jones *et al.* [15] apresentaram um modelo para interação da onda ultrassônica com bolhas dispersas na fase contínua. Este modelo deve ser usado somente quando a frequência do pulso

ultrassônico for maior do que a frequência de ressonância. Sendo assim, o pulso será refletido e difratado e não espalhado. Esse modelo foi utilizado no cálculo do coeficiente de absorção acústica das bolhas dispersas — Equação (4-3) — considerando a FVG de 2,5%, sendo este o menor valor medido experimentalmente. O diâmetro médio das bolhas foi de 1,3 mm obtido pela análise das imagens capturadas durante o experimento. A frequência de ressonância para a bolha de 1,3 mm é de aproximadamente 2,7 kHz, calculada pela Equação (4-4). Dessa maneira, a frequência do pulso ultrassônico (2,25 MHz) é cerca de mil vezes maior do que a frequência de ressonância das bolhas, o que confirma a possibilidade de utilização do modelo. O valor encontrado para o coeficiente de absorção foi de 20,3 dB/m.

$$\alpha = \frac{\Gamma S}{16 A} \quad (4-3)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{3\gamma P_b}{\rho_0}} \quad (4-4)$$

Atkinson e Kytömaa [1] desenvolveram um modelo matemático para a interação da onda acústica com partículas sólidas dispersas na fase contínua. Este modelo foi aplicado no cálculo dos coeficientes de absorção das partículas de vidro e de poliamida no presente trabalho. Foram utilizadas as Equações (4-5), (4-6) e (4-7) nos cálculos. Para as partículas de vidro, utilizou-se a distribuição do tamanho de partículas apresentada na Tabela 4-2. O coeficiente médio de absorção acústica obtido foi de 6,64 dB/m. Já para as partículas de poliamida, utilizou-se o valor médio de 200  $\mu\text{m}$  para o diâmetro da partícula e o valor obtido para o coeficiente de absorção foi de 0,14 dB/m.

$$\alpha = \frac{\mathcal{F}(k^2)}{2\sqrt{\mathcal{R}(k^2)}} \quad (4-5)$$

$$\mathcal{R}(k^2) = \frac{\omega^2 A^2 \bar{\rho} + \omega^2 [B + (1 - \nu)\rho^*][B\bar{\rho} + \rho_s \rho_l (1 - \nu)]}{\bar{k} A^2 + \omega^2 [B + (1 - \nu)\rho^*]^2} \quad (4-6)$$

$$\mathcal{F}(k^2) = \frac{\omega^2 A \omega (1 - \nu) (\rho_s \rho_l - \bar{\rho} \rho^*)}{\bar{k} A^2 + \omega^2 [B + (1 - \nu)\rho^*]^2} \quad (4-7)$$

Tabela 4-2: Distribuição do tamanho das partículas para a concentração de 1% w/w de partículas de vidro no óleo mineral.

Faixa de diâmetro das partículas [µm]	Distribuição [%]
590-595	0,6
425-590	54,3
212-425	38,2
150-212	6,0
<150	0,9

Fonte: Figueiredo *et al.* [3].

Para o cálculo do coeficiente de absorção das gotas de água dispersas na fase contínua, utilizou-se o modelo de Isakovich [2]. Este autor desenvolveu uma formulação do efeito termoelástico nos casos onde outras perdas podem ser desprezadas. No caso de partículas esféricas, Isakovich [2] apresenta as Equações (4-8), (4-9) e (4-10) para o cálculo do vetor da onda acústica. A propagação da onda é controlada pelo coeficiente de atenuação, dado pela parte imaginária do vetor (K). Para os cálculos aqui apresentados, foi considerada diluição de 10% v/v de água no óleo mineral e diâmetro médio das bolhas de 100 µm. O valor encontrado para o coeficiente de absorção acústica foi de 1,23 dB/m. A

Tabela 4-3 apresenta de forma resumida os resultados discutidos nesta seção.

$$K(\omega) = \frac{\omega}{c} \left[ 1 + j \frac{3\nu\rho_0 c^2}{a^2 \omega} T_0 \left( \frac{\beta_1}{\rho_1 c_{p1}} - \frac{\beta_2}{\rho_2 c_{p2}} \right)^2 A \right]^{1/2} \quad (4-8)$$

$$A = \frac{k_1 k_2 [(1-j)n_2 a + 1] \{(1-j)n_1 a - \tanh[(1-j)n_1 a]\}}{k_1 \{(1-j)n_1 a - \tanh[(1-j)n_1 a]\} + k_2 \tanh[(1-j)n_1 a] [(1-j)n_2 a + 1]} \quad (4-9)$$

$$n_j = \sqrt{\frac{\omega \rho_i c_{pi}}{k_i}} \quad (4-10)$$

Tabela 4-3: Contribuição individual dos mecanismos de absorção acústica para a dissipação total de um pulso ultrassônico de 2,25 MHz.

<b>Tipo de perda</b>	<b><math>\alpha_s</math> [dB/m]</b>	<b><math>\alpha_{\text{espalhamento}}</math> [dB/m]</b>	<b>%</b>
Dissipação intrínseca do óleo mineral	20,6	-	42,1
Bolhas de ar no óleo mineral	-	20,3	41,5
Partículas de vidro no óleo mineral	-	6,64	13,6
Partículas de poliamida no óleo mineral	-	0,14	0,3
Gotas de água no óleo mineral	-	1,23	2,5
<b>Total</b>	<b>20,6</b>	<b>28,31</b>	<b>100</b>

Fonte: Figueiredo *et al.* [3].

Analisando os resultados apresentados na

Tabela 4-3, é possível notar que a dissipação acústica intrínseca do óleo mineral e o espalhamento causado pelas bolhas dispersas, mesmo para baixos valores de FVG (2,5%), foram os mecanismos mais importantes na dissipação total do sinal ultrassônico. Estes contribuíram com aproximadamente 84% do coeficiente de absorção total, sendo 42% a contribuição de cada mecanismo. A contribuição das partículas de vidro foi a terceira mais importante, representando aproximadamente 14% do total. As gotas de água diluídas no óleo mineral contribuíram com cerca de 1% do total enquanto as partículas de poliamida tiveram uma contribuição desprezível. Dos resultados apresentados, pode-se concluir que variações na FVG terão um efeito significativo na dissipação acústica em escoamentos multifásicos para baixos valores da concentração das demais fases dispersas. Além disso, o aumento da FVG irá aumentar a contribuição da fase gasosa enquanto a dissipação intrínseca no óleo mineral e pelas outras fases dispersas permanecerão constantes.

Estes resultados corroboram as tendências apresentadas pelos gráficos dos sensores a 180° (Figura 4-20 e Figura 4-24). Este sensor capta o feixe ultrassônico que percorreu toda a seção transversal da tubulação e foi atenuado pela fase contínua e pelas fases dispersas no escoamento, sendo assim o mais apropriado para a comparação. Na Figura 4-20, é possível perceber uma maior dispersão nos dados para FVG < 15%. Nota-se que a presença das outras fases dispersas aumenta a atenuação do sinal. Entretanto, para valores acima de 15%, a contribuição das demais fases dispersas se torna desprezível diante da contribuição da fase

gasosa, pois os dados para os diferentes tipos de escoamento se encontram praticamente sobrepostos.

Isto mostra que medições ultrassônicas da FVG em escoamentos multifásicos podem ser realizadas mesmo com a presença de outras fases dispersas em baixas concentrações. No entanto, deve-se ter cuidado especial em situações envolvendo baixos valores de FVG, pois a contribuição das outras fases para a atenuação do sinal poderá ser significativa. Uma solução é a adoção de modelos matemáticos, como os apresentados por Figueiredo *et al.* [3], para a correção dos resultados com base na contribuição individual de cada fase dispersa para a atenuação total causada pela mistura multifásica.

Quando a concentração das demais fases dispersas não for baixa, a interação acústica entre heterogeneidades no escoamento deve ser levada em conta. Os modelos matemáticos se tornam não lineares e muito complexos, não permitindo cálculos analíticos simples como os que foram apresentados neste trabalho. São então necessários programas computacionais bastante avançados e informações empíricas a fim de se obter os valores dos coeficientes de absorção acústica. Experimentos com concentrações de moderadas a altas das fases dispersas, principalmente água e ar, combinados com a análise matemática de modelos não lineares representativos destas situações permitiriam avançar no entendimento da interação entre a onda sonora e estes escoamentos. Seria assim estabelecido o alicerce para o desenvolvimento de RNAs que estenderiam estes resultados às várias situações práticas da indústria petrolífera. Esta é, todavia, sugestão para trabalhos futuros.

## 5. BANCO DE DADOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta seção, são apresentados o banco de dados experimentais e as simulações unidimensionais utilizando o pacote computacional OLGA [50]. O banco de dados foi utilizado no treinamento das redes neurais de previsão do padrão de escoamento e da fração volumétrica de gás. Todos os pontos do banco de dados foram simulados numericamente para confrontação com as predições das redes neurais.

### 5.1 BANCO DE DADOS DA LITERATURA

Um banco de dados experimentais foi estabelecido com a colaboração do Professor Nicolas Rios Ratkovich (*Universidad de los Andes*, Bogotá, Colômbia). Os dados experimentais foram retirados de publicações científicas envolvendo escoamentos bifásicos líquido-gás, tendo sido obtidos 8.751 pontos de 43 conjuntos de dados diferentes. A Figura 5-1 apresenta um histograma no qual a abcissa mostra as diversas combinações líquido-gás dos conjuntos de dados e as ordenadas o respectivo número de pontos. Dos 8.751 pontos, 4.649, ou seja, aproximadamente 53%, são pontos relativos a experimentos que possuem algum tipo de óleo como fase líquida.

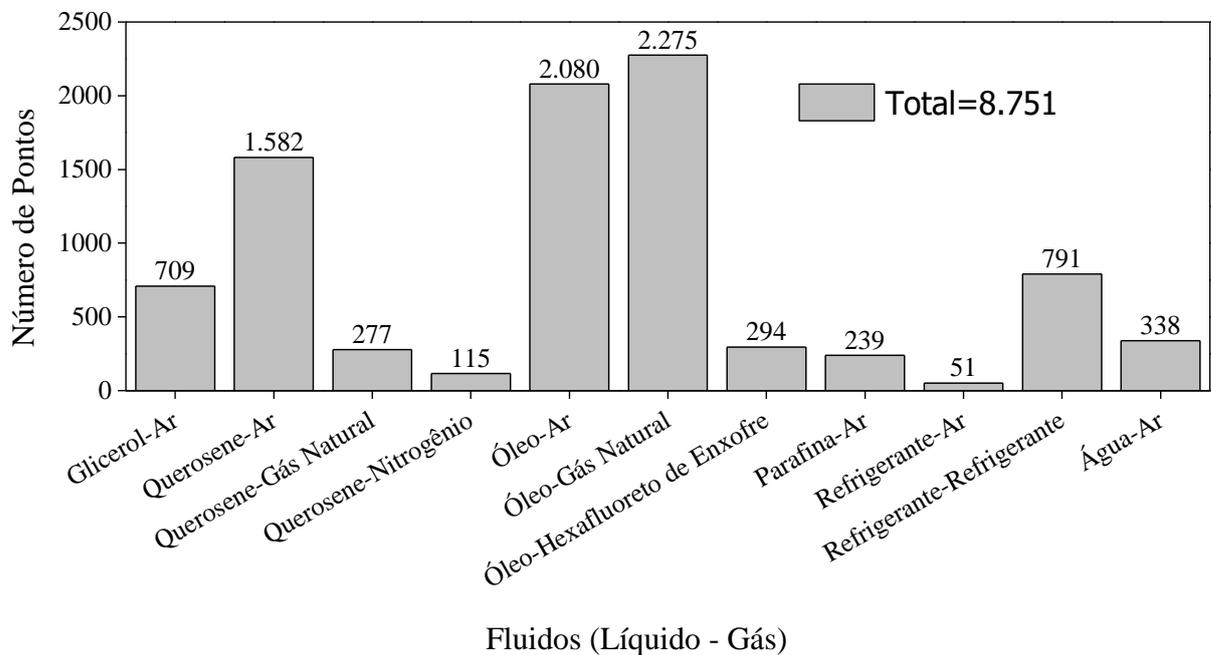


Figura 5-1: Histograma do banco de dados experimentais para as diversas combinações líquido-gás utilizadas.

O banco de dados abrange escoamentos horizontais, quase horizontais, inclinados, quase verticais e verticais, utilizando tubulações de 5 a 150 mm de diâmetro interno. Para o presente trabalho, foram selecionados dados relativos a escoamentos horizontais e quase horizontais, com diâmetros que variam de 50 a 60 mm e óleo como fase líquida e ar ou gás natural como fase gasosa. Essas restrições resultaram em 2.114 pontos para o padrão de escoamento e 1.801 para a fração volumétrica de gás (Tabela 5-1). Os padrões de escoamento presentes são bolhas dispersas (B.D.), estratificado (Est.), intermitente (Int.) e anular (An.).

Tabela 5-1: Banco de dados de escoamentos horizontais e quase horizontais, com diâmetro interno entre 50 a 60mm e fase líquida óleo.

Autor	Fluido		Padrão de escoamento					FVG				
	Líqu.	Gás	B.D.	Est.	Int.	An.	Tot.	Min.	Máx.	Tot.	Tec.(1)	Cal.(2)
Asante [51]	Óleo	Ar	0	63	0	49	<b>112</b>	0,964	1,000	<b>112</b>	S.C.(3)	S.V.F.R(4)
Brito [52]	Óleo	Ar	20	69	251	6	<b>346</b>	0,010	0,890	<b>346</b>	S.C.	S.V.F.R
Chupin [53]	Óleo	Ar	0	47	1	48	<b>61</b>	0,776	0,998	<b>61</b>	S.V.F.R	-
Ekinci [54]	Óleo	G.N.	11	0	502	7	<b>520</b>	0,100	0,654	<b>460</b>	S.C.	S.V.F.R
Gokcal [55]	Óleo	Ar	0	3	320	33	<b>356</b>	0,010	0,890	<b>356</b>	S.C.	S.V.F.R
Gregory [56]	Óleo	Ar	0	0	98	0	<b>98</b>	0,002	0,658	<b>98</b>	S.C.	S.V.F.R
Jeyachandra [57]	Óleo	Ar	0	0	123	0	<b>123</b>	0,040	0,390	<b>123</b>	S.C.	S.V.F.R
Kokal [58]	Óleo	Ar	-	-	-	-	-	0,630	0,950	<b>14</b>	S.C.	S.V.F.R
Kora [59]	Óleo	G.N.	0	0	144	0	<b>144</b>	-	-	-	-	-
Manabe [60]	Óleo	G.N.	0	75	89	0	<b>164</b>	-	-	-	-	-
Meng [61]	Óleo	Ar	0	203	0	0	<b>203</b>	0,786	0,999	<b>194</b>	S.V.F.R	-
Mukherjee [62]	Óleo	Ar	-	-	-	-	-	0,030	0,840	<b>37</b>	S.C.	S.V.F.R
<b>TOTAL</b>			<b>31</b>	<b>460</b>	<b>1.528</b>	<b>95</b>	<b>2.114</b>			<b>1.801</b>		

(1)Tec: Técnica utilizada na medição da fração de gás; (2)Cal: Aferição da técnica; (3)S.C.: Sensor capacitivo; (4) S.V.F.R.: Sistema de válvulas de fechamento rápido.

Com a finalidade de avaliar a coerência entre as medidas da FVG, realizou-se um levantamento sobre as técnicas de medição utilizadas pelos autores na Tabela 5-1. Verificou-se

que oito dos doze autores utilizaram medidores capacitivos aferidos com um sistema de fechamento rápido de válvulas. Já Chupin [53] e Meng [61] utilizaram um sistema de fechamento rápido de válvulas para executar as medidas de fração volumétrica de gás diretamente. Portanto, todas as medidas de fração de gás ou foram medidas diretamente por um sistema de válvulas de fechamento rápido ou se valeram de um sensor capacitivo aferido por este sistema. Logo, pode-se afirmar que os valores de fração de gás obtidos pelos diferentes autores podem ser comparados entre si, pois em última instância se referem todos a uma mesma definição da fração de gás, qual seja, o valor médio volumétrico em um trecho de tubulação.

## 5.2 SEPARAÇÃO DOS CONJUNTOS DE DADOS

Os dados experimentais selecionados na Seção 5.1 foram separados em dois grupos denominados *treinamento* e *alvo*. Utilizou-se o conjunto *treinamento* para treinar a rede. No treinamento da rede, o conjunto *treinamento* foi, por sua vez, subdividido em *treinamento*, contendo 75% dos dados, e *teste*, com 25%, conforme descrito na Seção 6.2. O conjunto *alvo* tem por objetivo testar o comportamento da RNA quando exposta a um experimento que não fez parte, em nenhum momento, do seu treinamento. As redes para predição do padrão de escoamento e da FVG possuem conjuntos distintos de *treinamento* e *alvo*, conforme apresentado na Tabela 5-2.

Tabela 5-2: Conjuntos de dados para as redes de predição do padrão de escoamento e FVG.

RNA para predição do Padrão de Escoamento		RNA para predição da FVG			
Treinamento		Alvo	Treinamento		Alvo
Treinamento (75%)	Teste (25%)		Treinamento (75%)	Teste (25%)	
Asante [51], Brito [52], Chupin [53], Gokcal [55], Gregory [56], Jeyachandra [57], Kora [59] e Manabe [60]		Ekinci [54] e Meng [61]	Asante [51], Brito [52], Chupin [53], Ekinci [54], Gokcal [55], Gregory [56], Meng [61] e Mukherjee [62].		Jeyachandra [57] e Kokal [58]

A determinação dos dados utilizados como *alvo* atendeu a dois requisitos: (i) os números adimensionais dos pontos experimentais do conjunto *alvo* devem estar dentro da faixa dos adimensionais dos pontos do conjunto de *treinamento*; (ii) os pontos do conjunto *alvo* devem cobrir toda a faixa de FVG ou de padrões de escoamento. Os números adimensionais usados no desenvolvimento deste trabalho são apresentados em detalhes na seção 6.2.2.

A Tabela 5-3 apresenta os valores máximos e mínimos dos adimensionais usados na RNA de predição da FVG. Todos os pontos do conjunto *alvo* se encontram dentro da faixa dos adimensionais do conjunto *treinamento*, conforme apresentado na Figura 5-2. Já, para a RNA de predição do padrão de escoamento (Tabela 5-4) existem dados do conjunto *alvo* com valores de razão de pressão menores que os valores do conjunto *treinamento*, conforme mostrado na Figura 5-3. Estes dados somam um total de 26 pontos retirados do trabalho de Ekinci [54]. Tais pontos irão extrapolar a faixa de operação da RNA e estarão sujeitos à erros de predição.

Os dados usados para a predição do padrão de escoamento, tanto para treinamento quanto para o alvo, estão distribuídos em quatro padrões: (i) bolhas dispersas; (ii) estratificado; (iii) intermitente e (iv) anular. A distribuição dos pontos para o treinamento da rede de padrão de escoamento é menos uniforme do que no caso da FVG, conforme mostrado na Figura 5-4 e na Figura 5-5, havendo uma grande concentração no padrão intermitente, cerca de 74%. Os padrões estratificado, anular e bolhas dispersas possuem aproximadamente 18, 6 e 2% dos pontos, respectivamente. Essa grande concentração de pontos no padrão intermitente pode influenciar no comportamento da rede, favorecendo a predição desse padrão sobre os outros.

Tabela 5-3: Faixas dos dimensionais para predição da FVG dos grupos de treinamento e alvo.

		Treinamento									Alvo		
Adimensionais		Asante [51]	Brito [52]	Chupin [53]	Ekinci [54]	Gokcal [55]	Gregory [56]	Meng [61]	Mukherjee [62]	Min./Max.	Jeyachandra [57]	Kokal [58]	Min/Max
FVG	Min.	0,964	0,010	0,776	0,100	0,010	0,002	0,786	0,030	<b>0,002</b>	0,040	0,630	<b>0,040</b>
	Máx.	1,000	0,890	0,998	0,654	0,890	0,658	0,999	0,840	<b>1,000</b>	0,390	0,950	<b>0,950</b>
R.P.	Min.	2,7E+00	1,0E+00	1,0E+00	8,2E-01	7,5E+00	2,5E+00	3,9E+00	1,9E+00	<b>8,2E-01</b>	1,3E+00	2,5E+00	<b>1,3E+00</b>
	Máx.	2,7E+00	2,1E+00	1,0E+00	1,2E+01	7,5E+00	2,5E+00	3,9E+00	5,7E+00	<b>1,2E+01</b>	1,4E+00	3,4E+00	<b>3,4E+00</b>
ReG	Min.	5,1E+04	6,5E+02	2,0E+04	8,0E+02	2,3E+03	1,5E+02	6,2E+04	6,5E+02	<b>1,5E+02</b>	4,1E+02	1,0E+04	<b>4,1E+02</b>
	Máx.	1,0E+05	5,0E+04	1,2E+05	5,7E+04	5,1E+05	5,1E+04	3,4E+05	3,4E+06	<b>3,4E+06</b>	1,5E+04	9,8E+04	<b>9,8E+04</b>
ReL	Min.	6,7E-01	2,6E+00	8,0E+00	7,8E+00	7,5E-01	4,0E+02	9,6E+00	4,6E+02	<b>6,7E-01</b>	1,2E+01	1,3E+02	<b>1,2E+01</b>
	Máx.	1,3E+02	3,2E+03	1,1E+03	2,3E+02	4,3E+02	1,5E+04	4,8E+02	4,6E+04	<b>4,6E+04</b>	2,1E+02	5,3E+02	<b>5,3E+02</b>
ReBF	Min.	1,0E+05	3,4E+01	1,3E+05	2,5E+01	1,1E+01	1,4E+03	3,8E+04	2,2E+04	<b>1,1E+01</b>	2,4E+01	5,4E+03	<b>2,4E+01</b>
	Máx.	2,0E+05	8,2E+03	7,9E+05	1,6E+03	5,1E+03	1,1E+05	2,4E+05	8,2E+05	<b>8,2E+05</b>	1,0E+03	5,1E+04	<b>5,1E+04</b>
WeL	Min.	1,5E-05	1,9E-01	1,8E-04	1,5E+01	1,6E+00	5,4E+00	2,3E-03	1,2E+00	<b>1,5E-05</b>	1,9E+01	1,3E+00	<b>1,3E+00</b>
	Máx.	5,8E-01	1,7E+04	3,1E+00	9,7E+02	1,1E+05	7,9E+03	3,9E+00	5,7E+03	<b>1,1E+05</b>	1,3E+03	2,0E+01	<b>1,3E+03</b>
WeBF	Min.	3,7E+03	1,1E+00	3,9E+03	9,2E-01	1,2E-01	5,2E+01	1,5E+03	7,6E+02	<b>1,2E-01</b>	7,8E-01	2,0E+02	<b>7,8E-01</b>
	Máx.	7,5E+03	2,7E+02	2,3E+04	5,8E+01	3,8E+01	4,1E+03	9,5E+03	2,9E+04	<b>2,9E+04</b>	3,3E+01	1,9E+03	<b>1,9E+03</b>
R.V.	Min.	3,3E-06	1,3E-03	2,0E-05	2,0E-02	4,9E-04	3,1E-02	4,9E-05	4,8E-03	<b>3,3E-06</b>	2,7E-02	2,6E-03	<b>2,6E-03</b>
	Máx.	1,3E-03	9,7E-01	7,0E-03	8,7E-01	9,5E-01	9,3E-01	1,1E-02	9,4E-01	<b>9,7E-01</b>	8,9E-01	4,9E-02	<b>8,9E-01</b>
FrBF	Min.	4,5E+02	2,9E-02	4,1E+01	2,0E-01	2,4E-02	9,3E-02	4,7E+01	1,7E+00	<b>2,4E-02</b>	8,0E-02	3,0E+00	<b>8,0E-02</b>
	Máx.	1,8E+03	1,2E+02	1,5E+03	6,9E+01	9,1E+02	5,8E+02	1,4E+03	2,6E+03	<b>2,6E+03</b>	3,7E+01	2,6E+02	<b>2,6E+02</b>

Tabela 5-4: Faixas dos adimensionais para predição do padrão de escoamento dos grupos de treinamento e alvo.

Adimensionais		Treinamento								Alvo			
		Asante [51]	Brito [52]	Chupin [53]	Gokcal [55]	Gregory [56]	Jeyachandra [57]	Kora [59]	Manabe [60]	Min/Max	Ekinci [54]	Meng [61]	Min/Max
<b>R.P.</b>	<b>Min.</b>	2,7E+00	1,0E+00	1,0E+00	7,5E+00	2,5E+00	1,3E+00	1,1E+00	1,3E+01	<b>1,0E+00</b>	8,0E-01	3,9E+00	<b>8,0E-01</b>
	<b>Máx.</b>	2,7E+00	2,1E+00	1,0E+00	7,5E+00	2,5E+00	1,4E+00	2,9E+00	3,3E+01	<b>3,3E+01</b>	1,3E+01	3,9E+00	<b>1,3E+01</b>
<b>ReG</b>	<b>Min.</b>	5,1E+04	6,5E+02	2,0E+04	2,3E+03	1,5E+02	4,1E+02	3,6E+02	7,4E+02	<b>1,5E+02</b>	7,3E+02	6,2E+04	<b>7,3E+02</b>
	<b>Máx.</b>	1,0E+05	5,0E+04	1,2E+05	5,1E+05	5,1E+04	1,5E+04	3,4E+04	2,1E+05	<b>5,1E+05</b>	6,2E+04	3,4E+05	<b>3,4E+05</b>
<b>ReL</b>	<b>Min.</b>	6,7E-01	2,6E+00	8,0E+00	7,5E-01	4,0E+02	1,2E+01	7,5E+00	5,2E+02	<b>6,7E-01</b>	7,7E+00	9,6E+00	<b>7,7E+00</b>
	<b>Máx.</b>	1,3E+02	3,2E+03	1,1E+03	4,3E+02	1,5E+04	2,1E+02	2,0E+02	1,2E+04	<b>1,5E+04</b>	2,3E+02	4,8E+02	<b>4,8E+02</b>
<b>ReBF</b>	<b>Min.</b>	1,0E+05	3,4E+01	1,3E+05	1,1E+01	1,4E+03	2,4E+01	1,6E+01	2,6E+03	<b>1,1E+01</b>	1,9E+01	3,8E+04	<b>1,9E+01</b>
	<b>Máx.</b>	2,0E+05	8,2E+03	7,9E+05	5,1E+03	1,1E+05	1,0E+03	1,1E+03	9,8E+04	<b>7,9E+05</b>	1,6E+03	2,5E+05	<b>2,5E+05</b>
<b>WeL</b>	<b>Min.</b>	1,5E-05	1,9E-01	1,8E-04	1,6E+00	5,4E+00	1,9E+01	1,4E+01	4,3E+00	<b>1,5E-05</b>	1,5E+01	2,3E-03	<b>2,3E-03</b>
	<b>Máx.</b>	5,8E-01	1,7E+04	3,1E+00	1,1E+05	7,9E+03	1,3E+03	9,6E+02	2,3E+03	<b>1,1E+05</b>	9,7E+02	3,9E+00	<b>9,7E+02</b>
<b>WeBF</b>	<b>Min.</b>	3,7E+03	1,1E+00	3,9E+03	1,2E-01	5,2E+01	7,8E-01	6,0E-01	6,5E+01	<b>1,2E-01</b>	7,0E-01	1,5E+03	<b>7,0E-01</b>
	<b>Máx.</b>	7,5E+03	2,7E+02	2,3E+04	3,8E+01	4,1E+03	3,3E+01	4,0E+01	2,5E+03	<b>2,3E+04</b>	6,0E+01	9,8E+03	<b>9,8E+03</b>
<b>R.V.</b>	<b>Min.</b>	3,3E-06	1,3E-03	2,0E-05	4,9E-04	3,1E-02	2,7E-02	3,8E-02	1,1E-02	<b>3,3E-06</b>	2,0E-02	4,9E-05	<b>4,9E-05</b>
	<b>Máx.</b>	1,3E-03	9,7E-01	7,0E-03	9,5E-01	9,3E-01	8,9E-01	8,3E-01	8,8E-01	<b>9,7E-01</b>	8,8E-01	1,1E-02	<b>8,8E-01</b>
<b>FrBF</b>	<b>Min.</b>	4,5E+02	2,9E-02	4,1E+01	2,4E-02	9,3E-02	8,0E-02	8,0E-02	6,7E-02	<b>2,4E-02</b>	8,6E-02	4,7E+01	<b>8,6E-02</b>
	<b>Máx.</b>	1,8E+03	1,2E+02	1,5E+03	9,1E+02	5,8E+02	3,7E+01	3,7E+01	9,6E+01	<b>1,8E+03</b>	6,9E+01	1,4E+03	<b>1,4E+03</b>

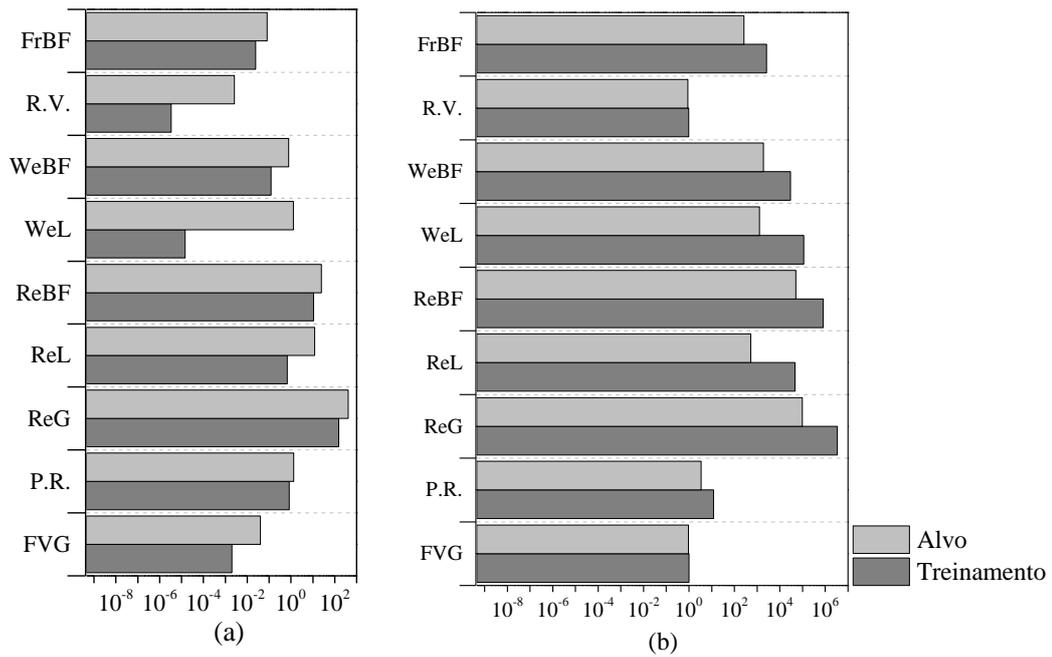


Figura 5-2: Histograma das faixas cobertas pelos adimensionais da RNA de predição da FVG para os valores: (a) mínimos; (b) máximos.

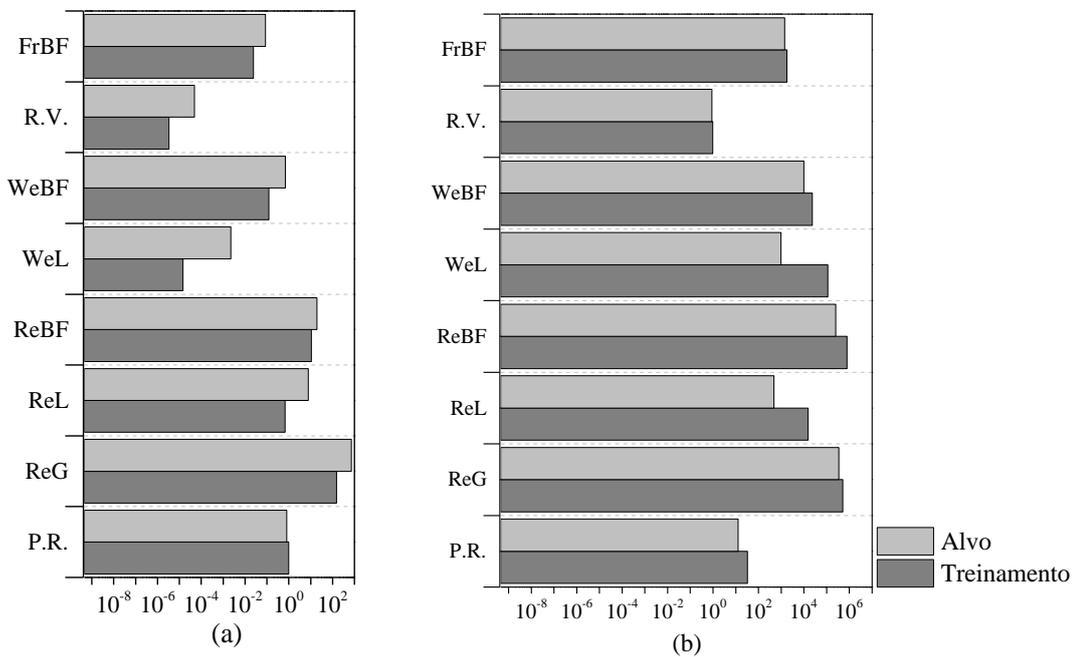


Figura 5-3: Histograma das faixas cobertas pelos adimensionais da RNA de predição do padrão de escoamento para os valores: (a) mínimos; (b) máximos.

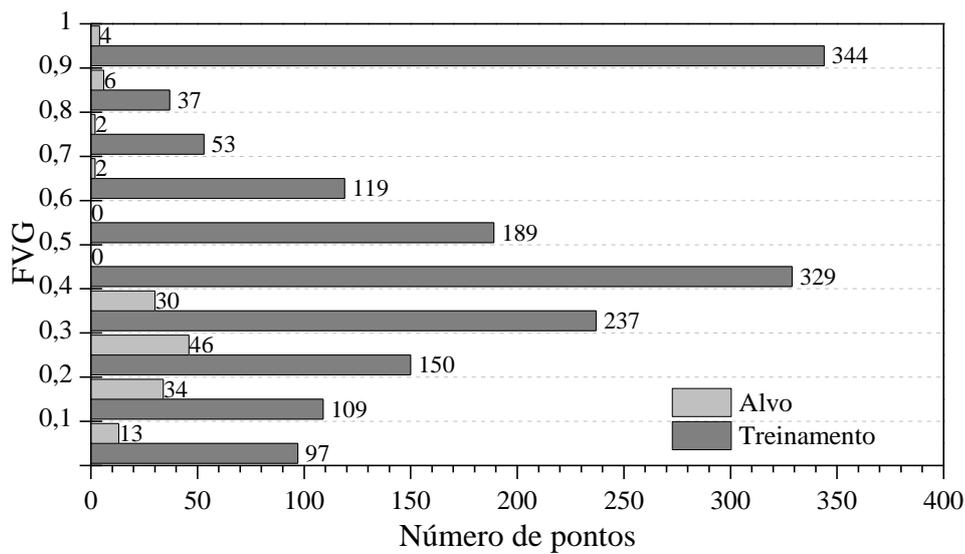


Figura 5-4: Histograma do número de pontos por faixa de FVG para os grupos de treinamento e alvo.

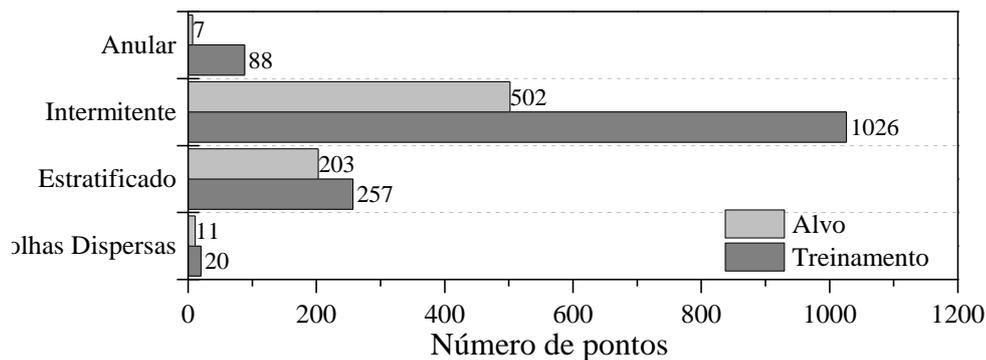


Figura 5-5: Histograma do número de pontos por padrão de escoamento para os grupos de treinamento e alvo.

### 5.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS UNIDIMENSIONAIS

Simulações numéricas unidimensionais (OLGA) do banco de dados experimentais foram realizadas pelo Professor Nicolas Rios Ratkovich (*Universidad de los Andes*, Bogotá, Colômbia) e seus colaboradores. Os resultados das simulações foram confrontados com os resultados das previsões das redes neurais de maneira a avaliar o desempenho das redes. Estes resultados são apresentados na Seção 8.3.

Foi usado o programa computacional OLGA [50], amplamente utilizado na indústria petrolífera para modelagem numérica de escoamentos multifásicos. O simulador OLGA é chamado *OLGA Point Model* ou *OLGAS* [63] e é parte do *OLGA® Multiphase Toolkit* e do simulador OLGA versão 7.3.3. Somente o processador de regime permanente e unidimensional foi usado nas simulações. Informações sobre as equações utilizadas na modelagem e sobre o

OLGA podem ser encontradas em Bendiksen *et al.* [64]. As informações contidas em Bendiksen *et al.* [64] são limitadas porque o programa é comercial.

Todos os pontos do banco, tanto para a fração volumétrica de gás quanto para o padrão de escoamento, foram simulados. A Figura 5-6 apresenta o gráfico comparativo entre os resultados experimentais e numéricos (OLGA) para a fração volumétrica de gás. É possível notar uma grande dispersão dos resultados para os modelos de Gregory [56] e Jeyachandra [57]. Esses resultados possuem uma certa tendência, o que sugere um erro sistemático para esses autores.

A Figura 5-7 mostra o gráfico comparativo para os diversos padrões de escoamento. O OLGA se mostrou eficiente em identificar o pontos dos padrões bolhas dispersas, estratificados e intermitentes, apesar de apresentar alguns erros. Entretanto, foi ineficaz na identificação de pontos do escoamento anular, errando em todas as simulações.

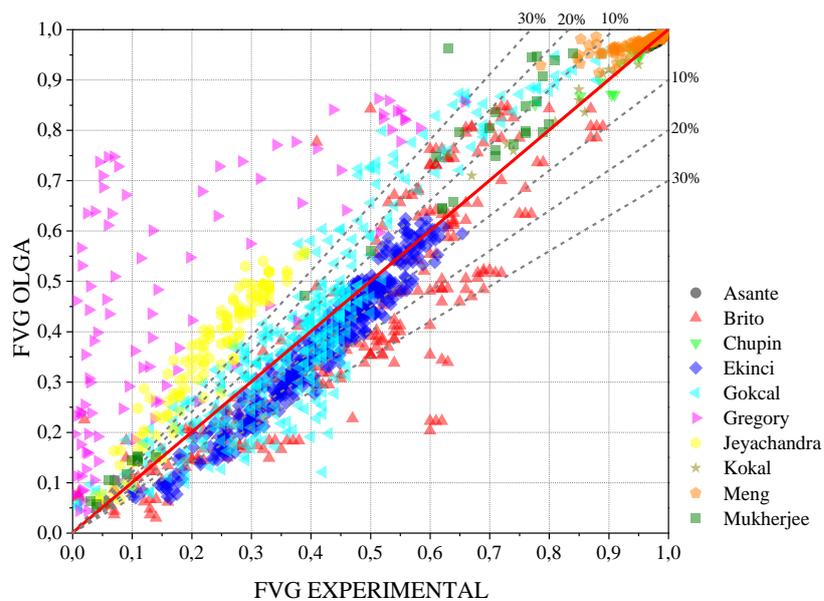


Figura 5-6: Comparação entre simulações numéricas (OLGA) e resultados experimentais para a fração volumétrica de gás.

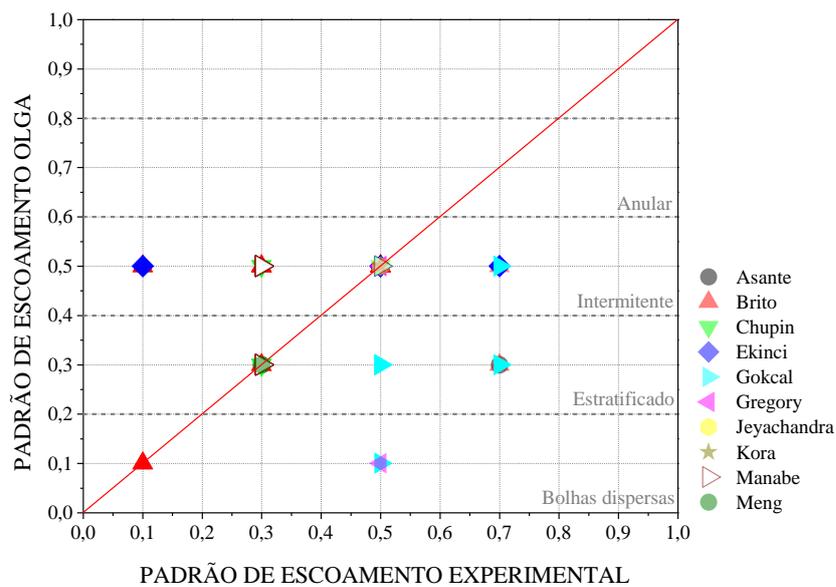


Figura 5-7: Comparação entre simulações numéricas (OLGA) e resultados experimentais para o padrão de escoamento.

Foram também gerados histogramas comparando o percentual de acerto do OLGA por autor. A Figura 5-8 apresenta os histogramas do percentual de acerto de FVG considerando aceitável os desvios de 10 e 20%. Já a Figura 5-9 mostra o histograma do percentual de acerto do padrão de escoamento.

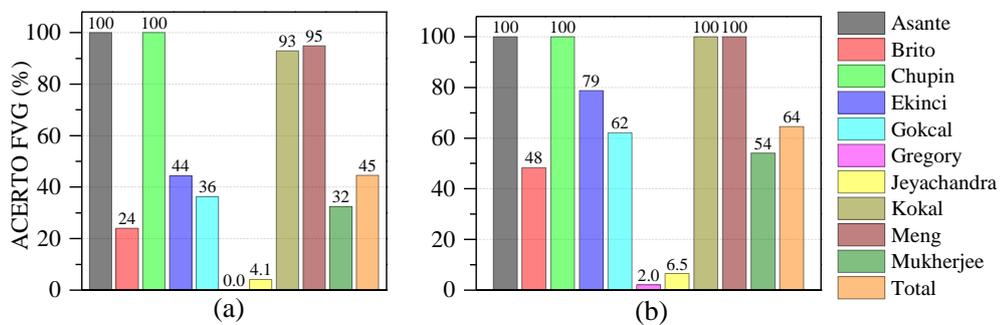


Figura 5-8: Histograma do percentual de acertos para FVG: (a) desvio de 10%; (b) 20%.

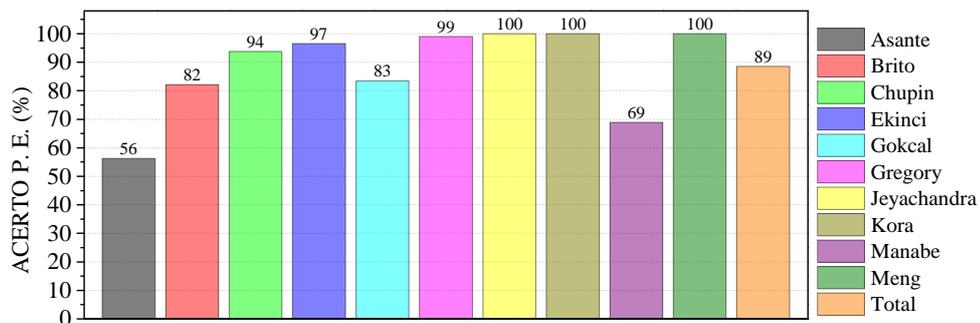


Figura 5-9: Histograma do percentual de acertos para os padrões de escoamento.

Considerando um desvio de 10% do valor medido experimentalmente, aproximadamente 45% das simulações da FVG retornaram valores corretos. Aumentando o desvio aceitável para 20%, esse valor sobe para 65%. A modelagem numérica (OLGA) dos experimentos realizados por Asante [51], Chupin [53], Kokal [58] e Meng [65] possui percentual de acerto acima de 90%, mesmo usando o desvio mais restritivo de 10%. Os quatro autores realizaram medidas experimentais para valores de FVG variando de 63% a 99% e com óleos de baixa viscosidade, de 2 a 10 cP. Estes resultados sugerem que, para óleos de baixa viscosidade e altos valores de FVG, o programa OLGA [50] retorna bons resultados para a FVG.

Já as simulações dos estudos de Gregory [56] e Jeyachandra [57] fornecem resultados com 0% e 4% de acerto respectivamente para o desvio de 10%. Gregory [56] realizou experimentos usando óleo com viscosidade de 7cP para valores de FVG na faixa de 0,2% a 65,8%. Jeyachandra [57] usou óleo com viscosidade de 560cP variando a FVG de 4% a 39%. Estes resultados indicam uma diminuição na precisão das simulações do OLGA [50] para baixos valores de FVG.

As simulações para determinação dos padrões de escoamento forneceram, em média, 89% de acerto. Os modelos numéricos (OLGA) dos experimentos realizados por Asante [51] e Manabe [60] acertaram 56% e 69% dos pontos simulados, respectivamente. Todas as outras simulações retornaram uma taxa de acerto maior do que 80%. As simulações de Asante [51] acertaram na determinação do padrão estratificado e erraram no padrão anular, sendo estes 44% dos dados. Em 31% dos pontos simulados de Manabe [60], o programa OLGA retornou escoamento intermitente quando deveriam ser estratificados.

Em resumo, o programa OLGA [50] apresentou melhor taxa de acerto na determinação de padrões de escoamento do que de FVG, apesar de não conseguir identificar o padrão anular para o conjunto de dados estudado. Estes resultados foram comparados com os resultados das redes neurais e esta análise se encontra na Seção 8.3.

## 6. REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Escoamentos multifásicos possuem um comportamento complexo e de natureza não linear, inviabilizando a criação de um modelo analítico abrangente para a predição da fração volumétrica de gás (FVG) e do padrão de escoamento. A este respeito, as redes neurais artificiais (RNA) fornecem um mapeamento não linear e correlações cruzadas entre variáveis de entrada e saída. Além disso, podem ser uma ferramenta alternativa para a identificação automática de padrões de escoamento.

No presente estudo, foram desenvolvidas quatro redes neurais distintas, combinando entradas de grupos adimensionais e parâmetros acústicos com saídas de padrão de escoamento e fração volumétrica de gás: (i) RNA 1: entrada de grupos adimensionais e saída de padrão de escoamento; (ii) RNA 2: entrada de parâmetros acústicos e saída de padrão de escoamento; (iii) RNA 3: entrada de grupos adimensionais e saída de fração volumétrica de gás; (iv) RNA 4: entrada de parâmetros acústicos e saída de fração volumétrica de gás. A Figura 6-1 apresenta de forma gráfica as quatro redes.

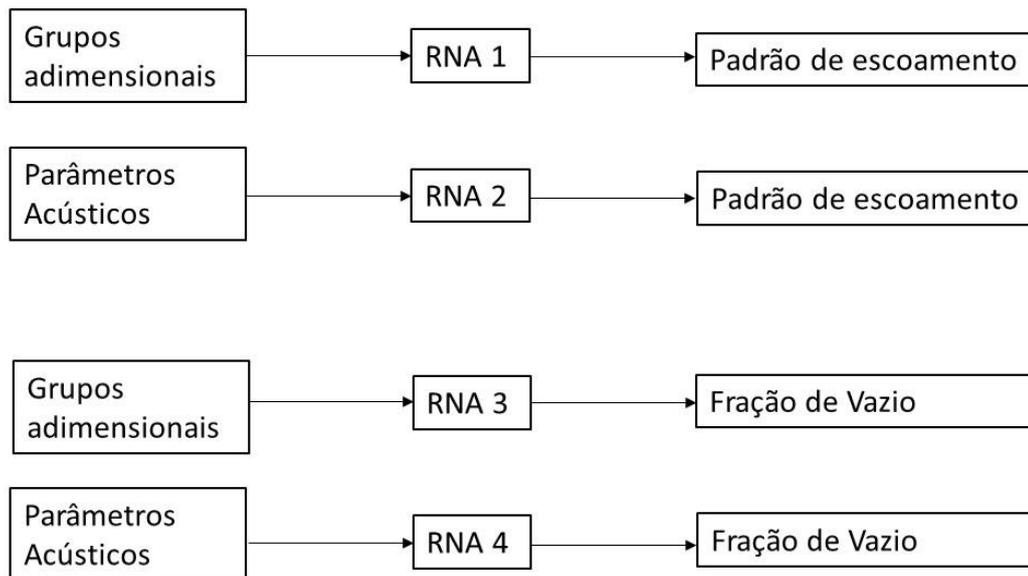


Figura 6-1: Entradas e saídas redes neurais

As arquiteturas utilizadas para as quatro diferentes redes propostas são apresentadas nas seções seguintes.

### 6.1 REDES NEURAIIS BASEADA EM MEDIDAS ULTRASSÔNICAS

Nesta seção, são apresentados os principais aspectos da RNA de predição de FVG baseada em medidas ultrassônicas desenvolvida por Nakashima [29]. Posteriormente, no

Capítulo 7, serão apresentados os resultados de previsão dessa RNA de FVG quando exposta a dados coletados em experimentos multifásicos nunca utilizados em seu treinamento (experimentos com soluções aquosas de glicerina e ar). Nakashima [29] estudou também RNA para a predição do padrão de escoamento baseada em medidas ultrassônicas. Esta rede não foi utilizada neste trabalho, pois o único padrão de escoamento presente durante o experimento com soluções aquosas de glicerina e ar foi o de bolhas dispersas.

Nakashima [29] realizou um estudo detalhado sobre o uso de RNAs baseadas em medidas ultrassônicas para a determinação da FVG. As razões de energia dos transdutores ultrassônicos foram utilizadas como entradas. Para treinamento e validação da RNA, foram utilizados os dados obtidos nos experimentos discutidos na Seção 4.2, quais sejam os realizados no circuito de escoamentos multifásicos UNIFEI. Os dados foram separados em 75% para o *treinamento* e 25% para *teste* de predição da rede. Para o grupo *teste*, a RNA de FVG apresentou um erro médio de 4,2%, sendo este valor considerado baixo em função do comportamento não linear do escoamento, o que justificou a utilização da sua arquitetura neste trabalho.

A fim de encontrar a melhor arquitetura para a RNA, Nakashima [29] fez sucessivos treinamentos variando o número de neurônios da primeira camada oculta de 1 a 6 e, da segunda camada oculta, de 1 a 3. A arquitetura que retornou o menor valor de SSE associado ao maior coeficiente de determinação foi a de 5 e 2 neurônios na primeira e segunda camada oculta, respectivamente.

Os principais aspectos e características da arquitetura de Nakashima [29] utilizados neste trabalho são:

- Programa computacional MatLab® para desenvolvimento das redes neurais;
- RNA do tipo perceptron;
- Rede de predição da FVG com duas camadas ocultas com a função logística sigmoide (logsig);
- Camada de saída com a função puramente linear (purelin);
- Treinamento usando o algoritmo de Levenberg-Marquardt com regularização bayesiana (trainbr);
- Número máximo de passos (epochs) estabelecido em  $10^3$ ;

- O objetivo (goal) obtido pelo cálculo da soma dos erros quadrados (SSE) do conjunto de treinamento.

No presente trabalho, foi utilizada também a sequência de treinamento desenvolvida por Nakashima [29] como referência. Esta é composta por cinco passos:

- Cem tentativas de treinamento da rede neural utilizando o subconjunto de 75% do banco de dados;
- Inicialização, a cada treinamento, de valores aleatórios de pesos e vieses (bias);
- Os pesos e vieses obtidos são armazenados sempre que, após um treinamento, atinge-se um valor de SSE, calculado com o conjunto de teste (25% do banco de dados), menor que o valor armazenado anteriormente;
- Teste de validação: Para a melhor rede neural treinada, execução de testes com o subconjunto de 25% do banco de dados previamente separado, armazenando-se a resposta (saída da RNA) para cada vetor apresentado;
- Comparação dos valores previstos pela rede com os valores verdadeiros.

## **6.2 REDES NEURAIAS BASEADA EM NÚMEROS ADIMENSIONAIS**

### **6.2.1 Desenvolvimento da RNA de números adimensionais**

Shaikh e Al-Dahhan [66] desenvolveram um estudo sobre o uso de redes neurais artificiais com base em números adimensionais para a determinação da fração volumétrica de gás em reatores químicos do tipo colunas de bolhas. Neste estudo, foram propostas cinco etapas para o desenvolvimento da rede:

- 1) Revisão bibliográfica para coleta de dados a serem usados no treinamento e validação da rede;
- 2) Análise dimensional a fim de se determinar possíveis grupos adimensionais a serem usados no desenvolvimento da rede;
- 3) Decisão acerca da arquitetura da rede neural a ser desenvolvida;

- 4) Regressão neural e análise estatística para seleção dos grupos adimensionais a serem usados como entrada da rede;
- 5) Validação estatística da rede neural.

Essas etapas foram seguidas na execução do presente trabalho. A etapa (1), que consiste na coleta de dados experimentais da literatura, foi executada conforme apresentado na Seção 5.1. A análise dimensional para a determinação dos grupos adimensionais, etapa (2), está desenvolvida na Seção 6.2.2. A definição da arquitetura da rede neural usada, etapa (3), é apresentada no texto desta seção. Para a etapa (4), fez-se uma avaliação dos pesos atribuídos pela rede para cada número adimensional, melhor explicada em 6.2.2. A validação da rede neural, etapa (5), foi realizada com base em conjuntos de dados para predição de padrões de escoamentos e de fração volumétricas de gás. Esta etapa é discutida Seção 8.

Nakashima [29] realizou um estudo detalhado sobre o uso de redes neurais baseada em números adimensionais para a determinação do padrão de escoamento e fração volumétrica de gás. Seus resultados se mostraram promissores, o que justificou a utilização da arquitetura proposta como referência para a construção das redes para este trabalho. Seguiu-se a mesma arquitetura, salvo na rede para predição da fração volumétrica de gás onde foi utilizada uma camada oculta ao invés de duas.

Os principais aspectos e características da arquitetura aqui estudados são:

- Programa computacional MatLab® para desenvolvimento das redes neurais;
- RNA do tipo perceptron;
- Rede de predição da fração volumétrica de gás com uma camada oculta usando a função logística sigmoide (logsig);
- Rede de predição de padrão de escoamento com duas camadas ocultas com a função logística sigmoid (logsig);
- Camada de saída com a função puramente linear (purelin);
- Treinamento usando o algoritmo de Levenberg-Marquardt com regularização bayesiana (trainbr);
- Número máximo de passos (epochs) estabelecido em  $10^3$ ;

- O objetivo (goal) obtido pelo cálculo da soma dos erros quadrados (SSE) do conjunto de treinamento;
- Números adimensionais normalizados em uma escala de -1 a 1.

No presente trabalho, foi utilizada também a sequência de treinamento desenvolvida por Nakashima [29] como referência. Esta é composta por cinco passos:

- Cem tentativas de treinamento da rede neural utilizando os 75% do banco de dados previamente selecionados;
- Inicialização, a cada treinamento, de valores aleatórios de pesos e viés (bias);
- Os pesos e viés obtidos são salvos sempre que, após um treinamento, atinge-se um valor de SSE, calculado com o conjunto de teste (25% do banco de dados), menor que o valor salvo anteriormente;
- Teste de validação: Para a melhor rede neural treinada, execução de testes com os 25% do banco de dados previamente separado, salvando-se a resposta (saída da RNA) para cada vetor apresentado;
- Comparação dos valores previstos pela rede com os valores verdadeiros.

Além disso, fez-se necessário atribuir índices aos padrões de escoamento para o uso das redes neurais. Os índices escolhidos foram: 0,1 para o padrão bolhas dispersas; 0,3 para o padrão estratificado; 0,5 para o padrão intermitente; 0,7 para o padrão anular. Foi considerado uma faixa de erro aceitável de  $\pm 0,1$  para todos os padrões.

A seção seguinte irá tratar da seleção dos números adimensionais utilizados como entrada das redes neurais.

### **6.2.2 Escolha dos grupos adimensionais**

A determinação de um conjunto de números adimensionais para serem usados como entradas da rede neural deve atender os seguintes requisitos:

- O conjunto de números adimensionais deve ser escolhido de maneira a abarcar os fenômenos físicos mais relevantes para a determinação da fração volumétrica de gás e do padrão de escoamento;

- Dados para o cálculo dos números adimensionais devem fazer parte daqueles obtidos no cotidiano da indústria petrolífera.

Com relação ao requisito (1) acima, Carvalho [67] realizou um estudo minucioso de variáveis físicas e números adimensionais relevantes para escoamentos bifásicos. Como resultado, foram apresentadas as seguintes variáveis como pertinentes para a descrição confiável de escoamentos bifásicos líquido-gás:

- Dimensão característica;
- Ângulo de inclinação da tubulação;
- Velocidade superficial do gás;
- Velocidade superficial do líquido;
- Densidade do líquido;
- Densidade do gás;
- Viscosidade dinâmica do líquido;
- Viscosidade dinâmica do gás;
- Tensão superficial do líquido;
- Pressão de operação.

Carvalho [67] realizou uma revisão bibliográfica sobre números adimensionais aplicados em escoamentos bifásicos líquido-gás. Associando essa revisão com a interpretação de fenômenos físicos, propôs um conjunto de números adimensionais apresentados na Tabela 6-1.

Tabela 6-1: Grupos adimensionais pertinentes ao presente estudo.

Denominação / Referência	Expressão	Significado Físico
Número de Reynolds da velocidade superficial do gás [68]	$Re_{SL} = \frac{(1-x)GD}{\mu_L}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força viscosas}}$
Número de Reynolds da velocidade superficial do líquido [68]	$Re_{SG} = \frac{(1-x)GD}{\mu_G}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força viscosas}}$
Número de Reynolds do escoamento bifásico [69]	$Re_{TP} = \frac{Re_{SL}}{(1-\alpha)}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força viscosas}}$
Número de Froud do escoamento bifásico	$Fr = \frac{(j_g + j_l)^2}{gD}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força gravitacional}}$
Razão entre o número de Eötvös e o número de Morton [25]	$\frac{Eo}{Mo} = \frac{\rho_l^2 D^2 \sigma_l^2}{\mu_l^4}$	$\frac{\text{Inércia x Capilaridade}}{\text{Força viscosa}}$
Razão de densidades	$D_R = \frac{\rho_g}{\rho_l}$	Efeito da pressão
Número da velocidade do líquido	$N_{LV} = V_{SL} \left( \frac{\rho_L}{\sigma g} \right)^{1/4}$	
Número da velocidade do gás	$N_{GV} = V_{SG} \left( \frac{\rho_L}{\sigma g} \right)^{1/4}$	
Número do diâmetro	$N_D = d \left( \frac{\rho_L g}{\sigma} \right)^{1/2}$	
Número da viscosidade do líquido	$N_L = \mu_L \left( \frac{g}{\rho_L \sigma^3} \right)^{1/4}$	
Número da viscosidade do gás	$N_G = \mu_G \left( \frac{g}{\rho_L \sigma^3} \right)^{1/4}$	
Ângulo de inclinação da tubulação	$\theta$	

**Fonte:** Adaptado de Carvalho [67]

Os adimensionais apresentados na Tabela 6-1, além de numerosos, são dependentes de variáveis que não fazem parte de dados obtidos no cotidiano da indústria petrolífera. Neste contexto, atendendo ao requisito (2), Carvalho [67] propôs um novo conjunto de números adimensionais, listados na Tabela 6-2. Este novo conjunto é resultantes da associação de adimensionais, como é o caso do número de Weber, e da eliminação de adimensionais que descrevessem fenômenos semelhantes, como é o caso do Reynolds da velocidade superficial do gás e do líquido.

Tabela 6-2: Grupos adimensionais selecionados preliminarmente para entrada da rede neural.

Denominação / Referência	Expressão	Significado Físico
Número de Reynolds do escoamento bifásico	$Re_{TP} = \frac{\rho_l(j_l + j_g)D}{\mu_l}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força viscosas}}$
Número de Froud do escoamento bifásico	$Fr_{TP} = \frac{(j_l + j_g)^2}{Dg \cos\theta} \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l}}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força gravitacional}}$
Número de Weber bifásico	$We_{TP} = \frac{\rho_l(j_l + j_g)}{\mu_l} \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_g)g}}$	Considerando o diâmetro crítico da bolha
Razão de velocidades superficiais	$\lambda_l = \frac{j_l}{j_l + j_g}$	Fração de líquido quando não há deslizamento entre as fases
Razão de pressões	$\frac{p}{p_{atm}}$	

**Fonte:** Adaptado de Carvalho [67]

Nakashima [29] fez uso de oito números adimensionais, três a mais do que o estudo apresentado por Carvalho [67]. A escolha dos números adimensionais foi baseada somente na intuição física para o dois autores. Nakashima [29] adicionou à lista de Carvalho [67] os adimensionais:  $Re_G$ ,  $Re_L$  e  $We_L$ . A Tabela 6-3 lista os grupos adimensionais utilizados por Nakashima [29].

Existem diferentes definições do número de Reynolds aplicado a escoamentos bifásicos líquido-gás. Dentre estas, as mais utilizadas são as baseadas na velocidade superficial do líquido e do gás, apresentadas nas duas primeiras linhas da Tabela 6-3. Expressões para o número de Reynolds de escoamentos bifásicos também existem. A expressão da terceira linha da Tabela 6-3 é referenciada à fase líquida, sendo o termo  $(j_l + j_g)$  uma tentativa de contabilizar a turbulência crescente em escoamentos devido à aceleração da fase gasosa.

A razão de velocidades superficiais foi selecionada como entrada da rede neural pela facilidade de se medir este parâmetro em laboratório ou estimá-lo no cotidiano da indústria petrolífera. Além do mais, ela foi usada por Greskovich e Shrier [70] juntamente com o número de Froud para correlação com a frequência de ocorrência de pistões em escoamentos pistonados.

A pressão de operação não pode ser facilmente variada em laboratório. No entanto, sua escolha na forma de número adimensional foi devido a sua influência direta no tamanho das bolhas e, portanto, na topologia do escoamento. Foi uma das variáveis selecionadas por Shaikh e Al-Dahhan [66] como entrada para a RNA para determinar a média da fração volumétrica de

gás em reatores do tipo coluna. Além disso, influencia diretamente no desprendimento do gás do óleo.

Tabela 6-3: Grupos adimensionais utilizados como entradas das redes neurais desenvolvidas por Nakashima [29].

Denominação / Referência	Expressão	Significado Físico
Número de Reynolds do gás	$Re_G = \frac{\rho_g j_g D}{\mu_g}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força viscosas}}$
Número de Reynolds do líquido	$Re_L = \frac{\rho_l j_l D}{\mu_l}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força viscosas}}$
Número de Reynolds do escoamento bifásico	$Re_{BF} = \frac{\rho_l (j_l + j_g) D}{\mu_l}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força viscosas}}$
Número de Froud do escoamento bifásico	$Fr_{BF} = \frac{(j_l + j_g)^2}{Dg \cos \theta} \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l}}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força gravitacional}}$
Número de Weber do líquido	$We_L = \frac{\rho_l j_l^2 D}{\sigma}$	$\frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força de capilaridade}}$
Número de Weber bifásico	$We_{BF} = \frac{\rho_l (j_l + j_g)}{\mu_l} \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_g)g}}$	Considerando o diâmetro crítico da bolha
Razão de velocidades superficiais	$R.V. = \frac{j_l}{j_l + j_g}$	Fração de líquido quando não há deslizamento entre as fases
Razão de pressões	$R.P. = \frac{p}{p_{atm}}$	

Fonte: Adaptado de Nakashima [29]

Neste contexto, fez-se no presente estudo uma avaliação comparativa dos pesos associados a cada adimensional com a intenção de se avaliar a relevância matemática dos números adimensionais. O ponto de partida foi a utilização dos oito adimensionais selecionados por Nakashima [29], Tabela 6-3. Esta avaliação foi realizada com os pontos experimentais apresentados na Tabela 5-1. Fez-se a soma dos valores absolutos dos pesos atribuídos pelo treinamento da RNA aos neurônios da primeira camada oculta para cada entrada. Esses valores fornecem, mesmo que de maneira aproximada, a contribuição de cada um dos adimensionais para a predição feita. O adimensional associado ao menor valor da soma dos pesos absolutos da primeira camada oculta da rede foi eliminado. Todo o processo de eliminação dos números adimensionais e avaliação comparativa do desempenho das redes com as novas entradas é apresentado no Capítulo 8.

## 7. RESULTADOS DAS REDES NEURAIIS BASEADAS EM MEDIDAS ULTRASSÔNICAS

Neste capítulo, são apresentados os resultados da RNA de predição de FVG baseada em medidas ultrassônicas treinada com os dados coletados no circuito de escoamentos multifásicos UNIFEI. Estes foram os resultados obtidos utilizando a arquitetura proposta por Nakashima [29] e estão sendo apresentados afim de se ter uma visão completa da técnica desenvolvida. Os resultados para o grupo *teste* (25% do banco de dados) são discutidos na Seção 7.1. Na Seção 7.2, é avaliado o desempenho dessa mesma RNA quando exposta a dados experimentais nunca utilizados em seu treinamento, coletados na montagem experimental simplificada com soluções aquosas de glicerina.

### 7.1 CIRCUITO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS UNIFEI

A RNA desenvolvida por Nakashima [29] foi treinada com dados coletados no circuito de escoamentos multifásicos UNIFEI, utilizando as tubulações de uma e duas polegadas. A fase contínua nesse experimento foi o óleo mineral e a dispersa o ar. No treinamento da RNA, 75% do banco de dados, denominado grupo *treinamento*, foram utilizados efetivamente no seu treinamento e 25%, denominado grupo *teste*, foram utilizados para a seleção da melhor arquitetura. O grupo *teste*, apesar de ser a base para a seleção da melhor arquitetura durante o treinamento, nunca foi visto pela RNA, o que justifica o seu uso na primeira avaliação do desempenho da rede.

A Figura 7-1 apresenta os resultados de predição dos dados do grupo *teste*. É possível notar a boa concordância entre os valores previstos pela RNA de FVG com os valores medidos experimentalmente. A RNA foi capaz de acertar praticamente todos os pontos se considerado um envelope de desvio aceitável de 30%. Os maiores desvios na previsão foram para valores de FVG menores que 10%, o que pode ser explicado pela baixa precisão no início da escala do instrumento utilizado na medição da FVG.

Na próxima seção, a RNA de FVG aqui proposta será avaliada quando exposta a dados experimentais nunca utilizados em seu treinamento. O conjunto de dados selecionado para essa avaliação foi o coletado na montagem experimental simplificada com o escoamento bifásico de soluções aquosas de glicerina e ar. Este conjunto foi denominado conjunto *alvo*.

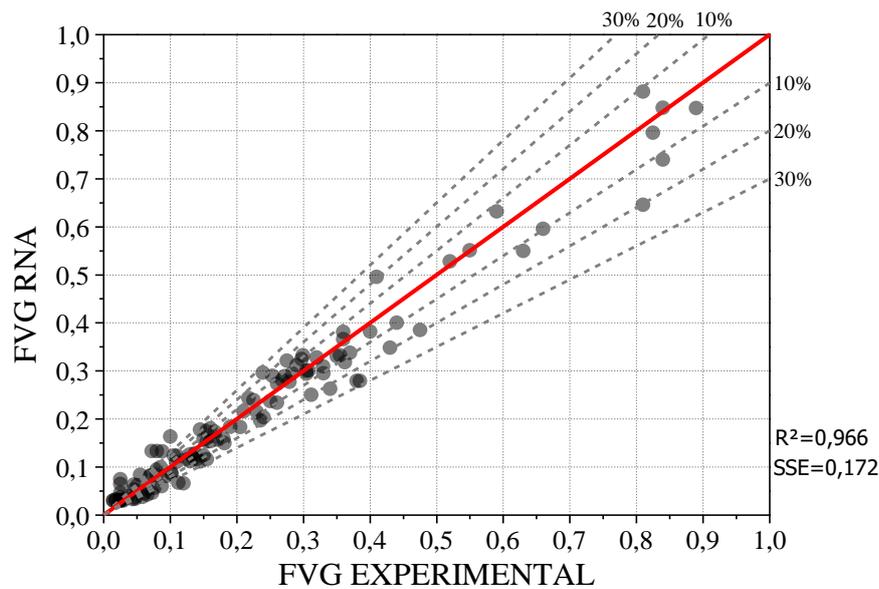


Figura 7-1: Predição da FVG da RNA baseada em medidas ultrassônicas para o grupo *teste* dos dados do circuito de testes multifásicos UNIFEI.

## 7.2 MISTURAS BIFÁSICAS DE SOLUÇÕES AQUOSAS DE GLICERINA E AR

Nesta seção, a RNA de FVG, treinada conforme explicado na seção anterior, é utilizada para prever o conjunto de dados coletados nos experimentos com soluções aquosas de glicerina e ar. No entanto, durante a realização desses experimentos, percebeu-se a formação de microbolhas na fase contínua (Seção 4.1.2). Com o aumento da população de microbolhas, a atenuação acústica causada por elas aumentava, conforme monitorado pelos *pontos de controle* e mostrado na Figura 7-2. Assim como explicado na Seção 4.1.2, os valores de FVG na abscissa dos gráficos dos *pontos de controle* referem-se na verdade às condições experimentais imediatamente antes de se fechar a vazão de ar para obtenção dos pontos. Dessa maneira, a presença de microbolhas evidenciada pelos *pontos de controle* é uma medida de como condições operacionais específicas modificam a fase dispersa durante a realização do experimento, introduzindo um erro sistemático nas medições.

Sendo assim, para a utilização desse conjunto de dados como *alvo*, um filtro foi aplicado de maneira a selecionar os pontos menos afetados pela presença de microbolhas. O filtro foi baseado nos *pontos de controle* do sensor a  $0^\circ$ , tendo sido eliminados do conjunto *alvo* dados para os quais a razão de energia no sensor a  $0^\circ$  era menor que 0,9 (Figura 7-3). O valor 0,9 foi escolhido arbitrariamente admitindo uma variação de 10% na razão de energia devido às microbolhas não seja capaz de distorcer tendências e obscurecer os fenômenos acústicos investigados.

Sendo assim, os pontos correspondentes ao filtro aplicado foram eliminados nos quatro sensores para os dados experimentais. Os resultados filtrados da razão de energia para os sensores a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  e  $180^\circ$  são apresentados na Figura 7-4, Figura 7-5, Figura 7-6 e Figura 7-7, respectivamente. Principalmente para os sensores a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , após a aplicação dos filtros, as curvas para as amostras de 1 a 8 passaram a ter tendências muito próximas. Isto significa que estes sensores são pouco afetados pela presença de microbolhas.

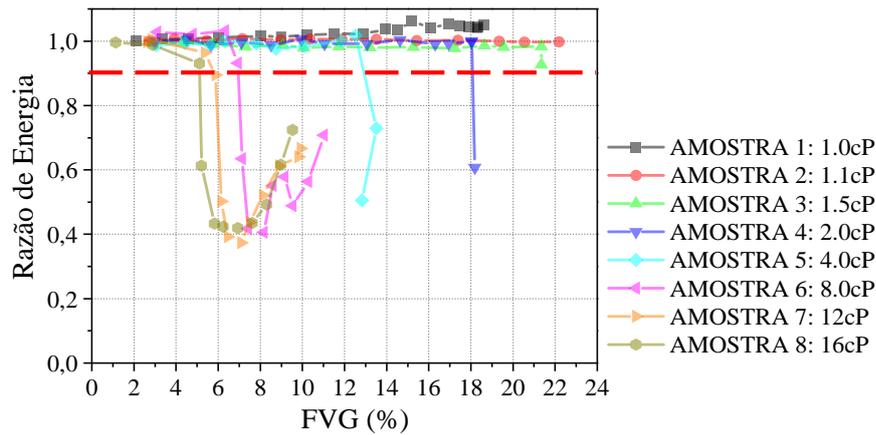


Figura 7-2: Pontos de controle do transdutor a  $0^\circ$  no protótipo ultrassônico.

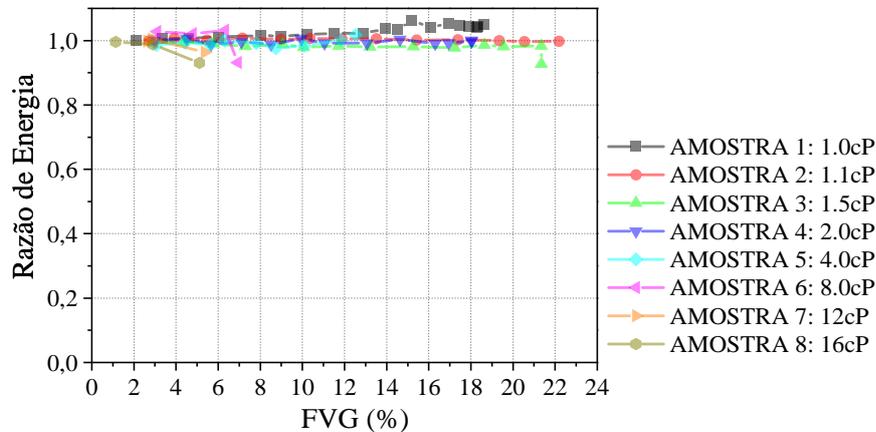


Figura 7-3: Pontos de controle do transdutor a  $0^\circ$  no protótipo ultrassônico após a aplicação do filtro.

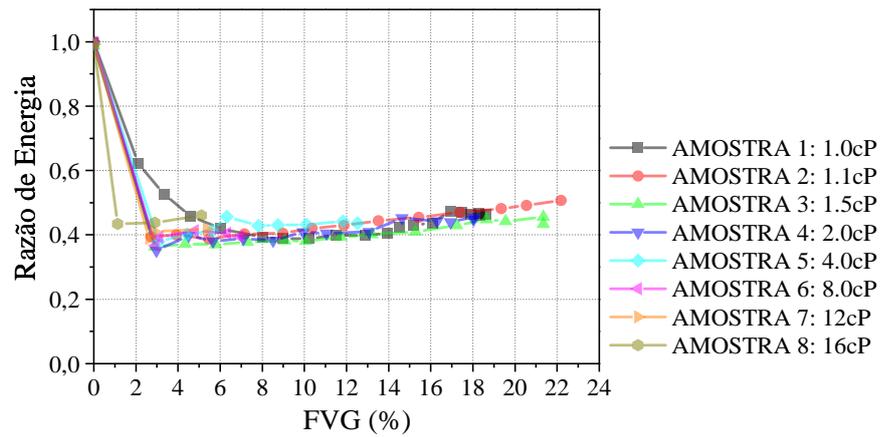


Figura 7-4: Razão de energia do transdutor a 0° no protótipo ultrassônico após a aplicação do filtro.

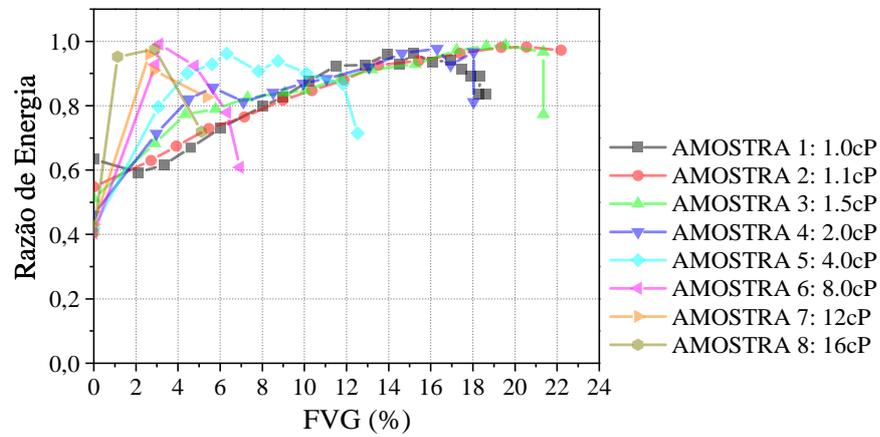


Figura 7-5: Razão de energia do transdutor a 45° no protótipo ultrassônico após a aplicação do filtro.

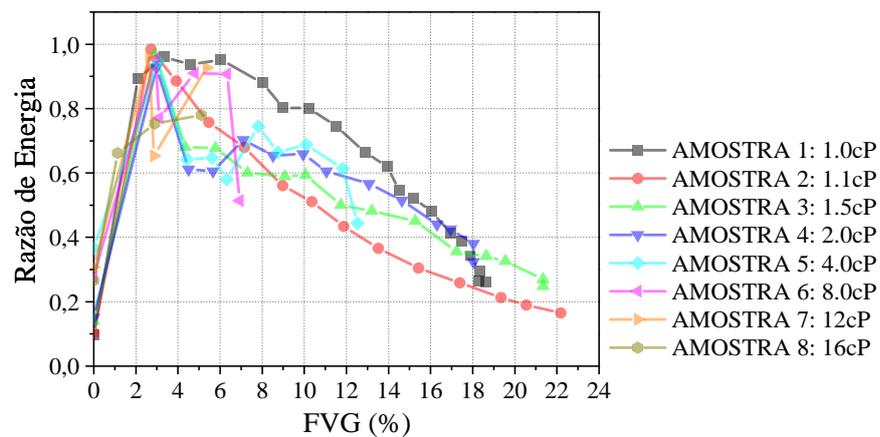


Figura 7-6: Razão de energia do transdutor a 135° no protótipo ultrassônico após a aplicação do filtro.

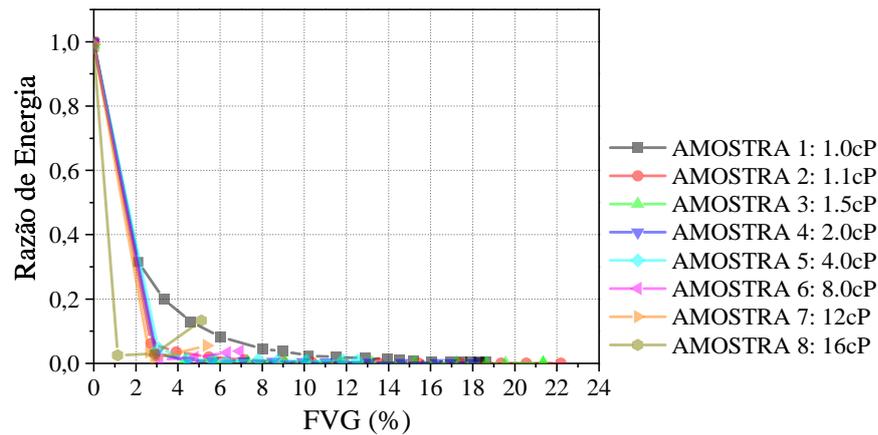


Figura 7-7: Razão de energia do transdutor a 180° no protótipo ultrassônico após a aplicação do filtro.

Utilizou-se então a RNA de FVG para a predição do conjunto alvo filtrado (Figura 7-8). Esses resultados não apresentam tendência bem definida e divergem muito dos valores medidos experimentalmente. Isso pode ser explicado pelo fato de que os sensores laterais, 45° e 135°, possuem baixa relação sinal ruído. Logo, serão mais sensíveis à presença mesmo de pequenas quantidades de microbolhas, o que distorce muito as tendências observadas experimentalmente. Já os sensores a 0° e 180° possuem alta relação sinal ruído, sendo assim menos afetados pelas microbolhas.

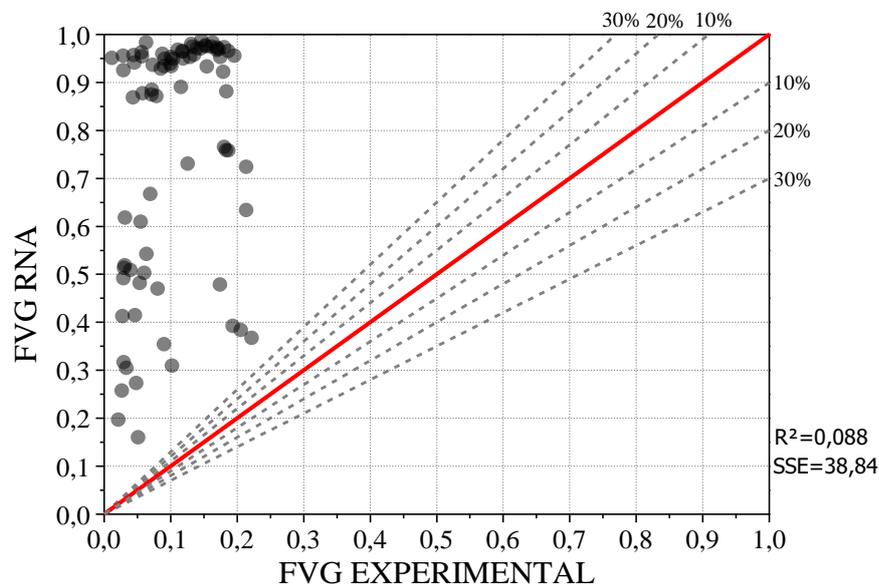


Figura 7-8: Predição da FVG para o grupo *alvo* da RNA baseada em medidas ultrassônicas com quatro sensores.

Na tentativa de corroborar a hipótese acima, fez-se um novo treinamento da RNA de FVG utilizando somente os sensores a 0° e 180° na entrada da rede. Respeitou-se a mesma arquitetura

da rede exceto que foram utilizadas somente duas entradas. Como esperado, os resultados passaram a ter uma tendência bem definida e o desvio em relação às medições experimentais diminuiu sensivelmente (Figura 7-9). No entanto, o erro nas predições ainda permaneceram grandes. É possível que a pequena população de microbolhas, apesar de não distorcer as tendências, seja responsável por introduzir esse erro sistemático nas medições.

Finalmente, esses resultados mostram que as RNAs baseadas em medidas ultrassônicas se apresentam como uma possível solução para a medição da FVG. No entanto, estudos adicionais devem ser realizados a fim de se entender melhor o mecanismo de formação das microbolhas e se estas estão presentes em escoamentos típicos da indústria petrolífera. Portanto, o próximo passo para o desenvolvimento da técnica é a realização de medições ultrassônicas em condições reais da indústria petrolífera, incluindo-se a verificação experimental da eventual presença de microbolhas e de seus mecanismos de formação.

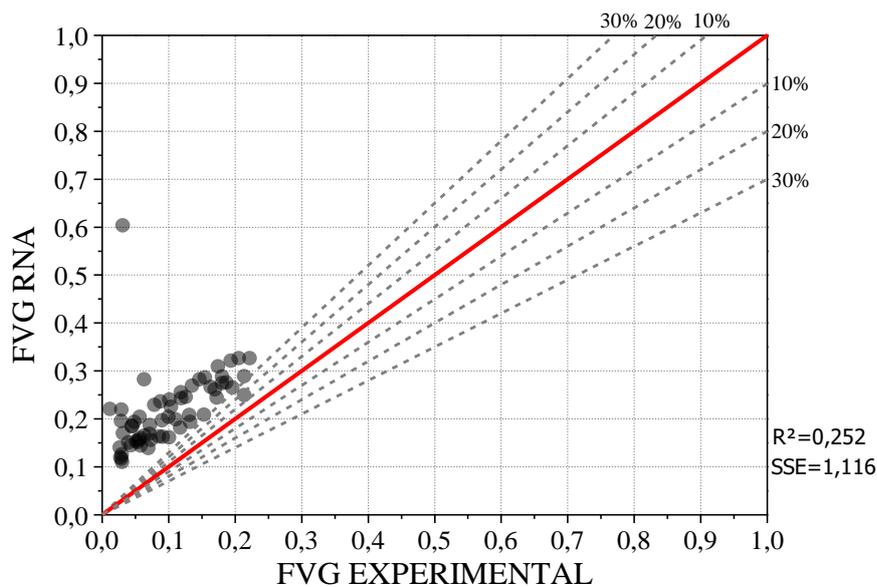


Figura 7-9: Predição da FVG para o grupo *alvo* da RNA baseada em medidas ultrassônicas com dois sensores.

## 8. RESULTADOS DAS REDES NEURAIS BASEADAS EM NÚMEROS ADIMENSIONAIS

Nesta seção, são apresentados resultados para duas redes neurais: (i) RNA para predição da fração volumétrica de gás (FVG) e (ii) RNA para predição do padrão de escoamento. Os dados experimentais usados para avaliar o comportamento das redes foram separados em grupos, denominados *treinamento* e *alvo*, conforme explicado na Seção 5.2. Na Seção 8.3, os resultados das predições das melhores arquiteturas das redes foram comparados com os resultados das simulações numéricas (OLGA).

### 8.1 RNA DE PREDIÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE GÁS

Nesta seção serão apresentados os resultados das redes neurais para a predição da fração volumétrica de gás do conjunto *alvo* usando o banco de dados experimentais. Primeiramente, fez-se um estudo com a intenção de avaliar a importância relativa dos grupos adimensionais listados na Tabela 6-3. Para maior clareza da discussão, a arquitetura da RNA utilizada é mostrada na Figura 8-1.

O procedimento para avaliação dos adimensionais é baseado nos pesos dos neurônios da primeira camada oculta e é mostrado esquematicamente no fluxograma da Figura 8-2. Admitiu-se que a soma dos valores absolutos dos pesos para cada neurônio, comparada à soma para os demais neurônios, é uma medida confiável de sua importância relativa para as previsões da rede. Sendo assim, os adimensionais para os quais os valores desta soma sejam substancialmente menores do que para os outros adimensionais têm importância menor para a previsão e poderiam, em princípio, ser eliminados.

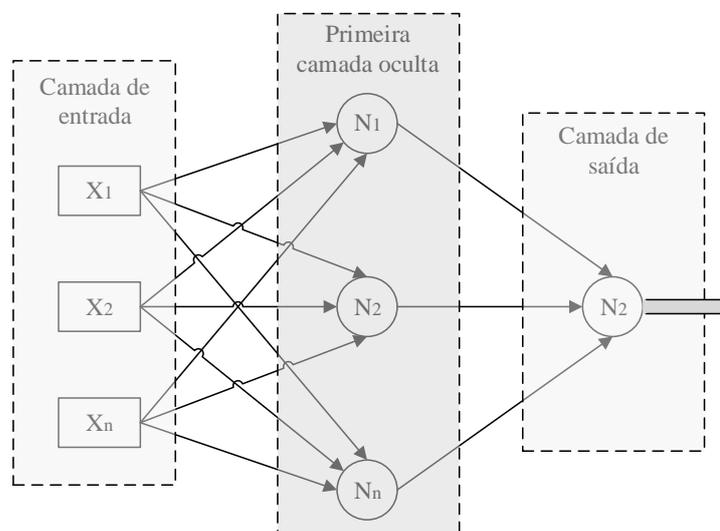


Figura 8-1: Arquitetura da RNA usada com uma camada oculta.

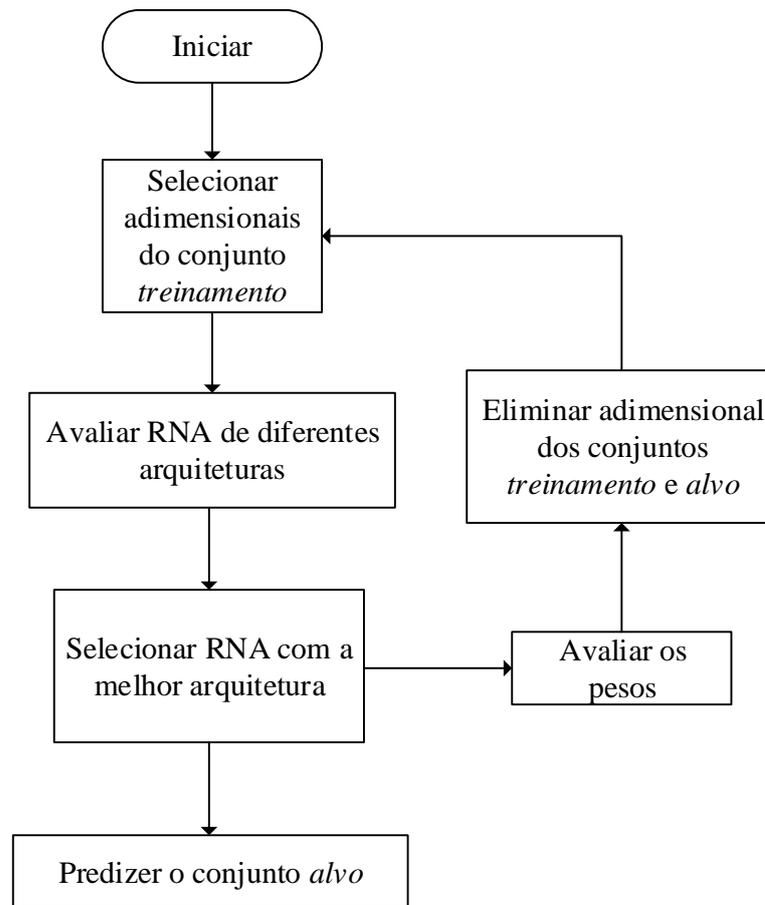


Figura 8-2: Procedimento para redução do número de adimensionais.

Este procedimento foi repetido quatro vezes conforme mostrado na Tabela 8-1. No primeiro ciclo treinou-se a rede cinco vezes, variando-se o número de neurônios da primeira camada oculta de 6 a 10. A melhor arquitetura, que retornou o menor valor de SSE e o maior valor de  $R^2$  para o conjunto *teste*, foi a RNA com nove neurônios. Utilizando-se esta rede, fez-se a predição para os conjuntos *alvo*. Da análise de pesos, o número de Weber do líquido foi eliminado, conforme mostrado na Tabela 8-2. O procedimento foi então reiniciado com sete números adimensionais. Os outros ciclos seguiram o mesmo procedimento e os resultados obtido são mostrados na Tabela 8-1 e na Tabela 8-2.

Tabela 8-1: Melhor arquitetura da RNA de FVG usada em cada ciclo.

Ciclo	Adimensionais de entrada da RNA	Número de Neurônios	Treinamento		Teste	
			R <sup>2</sup>	SSE	R <sup>2</sup>	SSE
1	R.P, Re <sub>G</sub> , Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>L</sub> , We <sub>BF</sub> , R.V., Fr <sub>BF</sub> .	6	0,980	2,165	0,971	1,043
		7	0,985	1,597	0,974	0,931
		8	0,985	1,637	0,969	1,123
		<b>9</b>	<b>0,987</b>	<b>1,427</b>	<b>0,978</b>	<b>0,793</b>
		10	0,986	1,509	0,961	1,397
2	R.P, Re <sub>G</sub> , Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>BF</sub> , R.V., Fr <sub>BF</sub> .	5	0,977	2,457	0,964	1,266
		6	0,981	2,078	0,968	1,138
		7	0,983	1,797	0,967	1,178
		8	0,982	1,947	0,964	1,277
		<b>9</b>	<b>0,986</b>	<b>1,472</b>	<b>0,973</b>	<b>0,955</b>
3	Re <sub>G</sub> , Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>BF</sub> , R.V., Fr <sub>BF</sub> .	4	0,970	3,175	0,959	1,456
		5	0,969	3,356	0,952	1,714
		6	0,974	2,810	0,961	1,409
		7	0,977	2,448	0,963	1,328
		<b>8</b>	<b>0,982</b>	<b>1,903</b>	<b>0,965</b>	<b>1,265</b>
4	Re <sub>G</sub> , Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>BF</sub> , Fr <sub>BF</sub> .	3	0,942	6,222	0,942	2,059
		4	0,961	4,177	0,952	1,730
		5	0,964	3,907	0,961	1,403
		6	0,971	3,057	0,964	1,296
		<b>7</b>	<b>0,973</b>	<b>2,930</b>	<b>0,967</b>	<b>1,163</b>

Tabela 8-2: Pesos da primeira camada oculta da RNA de FVG atribuídos a cada adimensional.

Ciclo	Nº de adimensionais	Soma dos valores absolutos dos pesos							
		R.P.	Re <sub>G</sub>	Re <sub>L</sub>	Re <sub>BF</sub>	We <sub>L</sub>	We <sub>BF</sub>	R.V.	Fr <sub>BF</sub>
1	8	41	64	81	30	<b>17</b>	36	19	18
2	7	<b>20</b>	104	116	56	-	62	44	48
3	6	-	31	72	78	-	98	<b>13</b>	71
4	5	-	399	726	758	-	867	-	<b>133</b>

A rede de sete adimensionais não possui o número de Weber do líquido. Esse adimensional expressa a relação entre forças inercias e de capilaridade. Forças de capilaridade são relevantes para escoamentos em tubulações de pequenos diâmetros ou quando a densidade do gás e do líquido possuem valores próximos (escoamentos em alta pressão). Os pontos

experimentais do banco utilizado foram medidos em tubulações com diâmetros entre 5 e 6 cm e com a densidade do gás dentro da faixa de 1 a 34 kg/m<sup>3</sup> e a do líquido dentro da faixa de 768 a 869kg/m<sup>3</sup>. Neste contexto, o número de Weber do líquido se mostra de baixa relevância para os pontos estudados, corroborando o resultado da análise de pesos.

Para RNA de seis adimensionais foram retirados o número de Weber do líquido e a Razão de Pressão. A pressão de operação influencia diretamente no tamanho das bolhas e, portanto, na topologia do escoamento. Porém, a densidade do gás sofre influência direta das variações da pressão do sistema. Isto sugere que os fenômenos captados pela razão de pressão podem ser captados pelo número de Reynolds do gás para o grupo de dados estudado. Sendo assim, a razão de pressão estaria em redundância com o número de Reynolds do gás, podendo ser retirada da rede.

O último adimensional eliminado durante o procedimento de análise de pesos foi a razão de velocidades. A razão de velocidades superficiais, que é a fração de líquido quando não há deslizamento entre as fases, apresentou baixa relevância comparada aos adimensionais  $Re_G$ ,  $Re_L$ ,  $Re_{BF}$ ,  $We_{BF}$  e  $Fr_{BF}$ . A análise de pesos indica que estes cinco adimensionais, todos eles dependentes das velocidades superficiais, abarcam os fenômenos captados pela razão de velocidades.

Avaliando os pesos dos adimensionais  $We_L$ ,  $Fr_{BF}$  e  $R.V.$  do primeiro ciclo da Tabela 8-2, é possível notar que possuem praticamente a mesma importância relativa comparada aos outros adimensionais. Sendo assim, fez-se um treinamento adicional eliminando esses três adimensionais em um único ciclo. Esta rede foi denominada como “rede de cinco adimensionais modificada”. Seus resultados, comparados com os das redes que seguiram o procedimento normal de análise, são apresentados a seguir.

Utilizando-se a melhor arquitetura de cada ciclo, foram então feitas as previsões para o conjunto *alvo*. Os valores calculados do coeficiente de determinação e soma dos erros quadráticos para os dois grupos de dados do conjunto *alvo* são apresentados na Tabela 8-3. Usando como critério de seleção o menor valor de SSE, a rede de oito adimensionais forneceu os melhores resultados para os dados de Jeyachandra [57] e a RNA de cinco adimensionais modificada para Kokal [58]. Entretanto, quando se olha a tendência geral dos resultados, que diz respeito à proximidade dos pontos preditos aos valores experimentais e também ao paralelismo do ajuste linear entre os pontos à linha de desvio zero, a arquitetura com cinco adimensionais modificada se mostra a mais apropriada. Esta rede previu todos os pontos de

Kokal [58] dentro do envelope de desvio de 30%. Já para Jeyachandra [57], essa rede retornou valores intermediários de SSE, porém com a tendência dos resultados melhor do que para as outras redes.

Sendo assim, a melhor arquitetura para predição da FVG foi a de cinco adimensionais modificada por ter a melhor tendência geral dos resultados e o maior número de acertos considerando um envelope de erro de 30%. Os resultados previstos por esta rede são comparados com os resultados das simulações numéricas (OLGA) para os mesmos pontos na Seção 8.3.

Tabela 8-3:  $R^2$  e SSE das predições da RNA para o conjunto alvo.

Número de entradas	Adimensionais	Tendência geral	Jeyachandra [57]		Kokal [58]	
			$R^2$	SSE	$R^2$	SSE
8	R.P, Re <sub>G</sub> , Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>L</sub> , We <sub>BF</sub> , R.V., Fr <sub>BF</sub> .	Regular	0,916	0,176	0,906	0,097
7	R.P, Re <sub>G</sub> , Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>BF</sub> , R.V., Fr <sub>BF</sub> .	Regular	0,911	0,212	0,716	0,071
6	Re <sub>G</sub> , Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>BF</sub> , R.V., Fr <sub>BF</sub> .	Ruim	0,927	0,273	0,885	0,083
5	Re <sub>G</sub> , Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>BF</sub> , Fr <sub>BF</sub> .	Regular	0,883	0,297	0,780	0,153
5m	R.P, Re <sub>G</sub> , Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>BF</sub> .	Boa	0,881	0,220	0,835	0,015

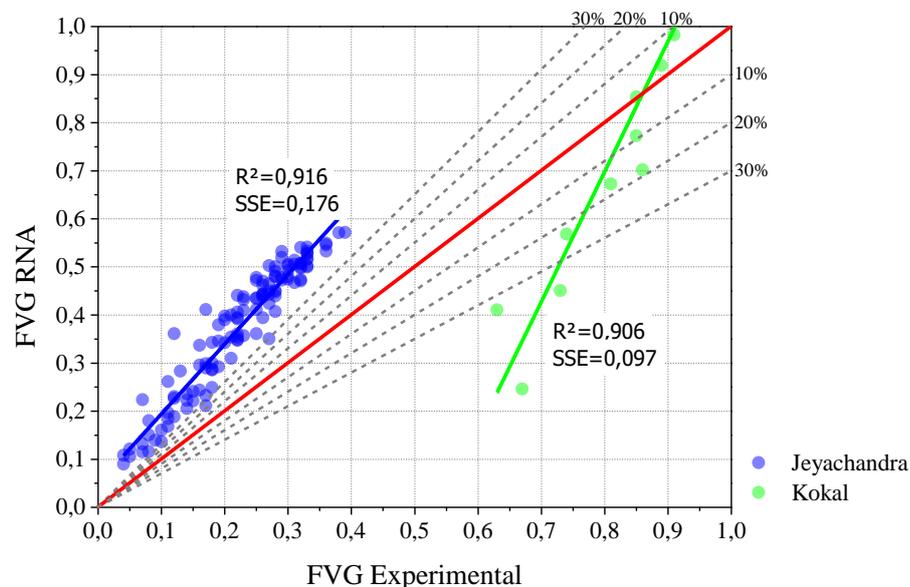


Figura 8-3: Predição da FVG do grupo alvo para RNA com oito adimensionais.

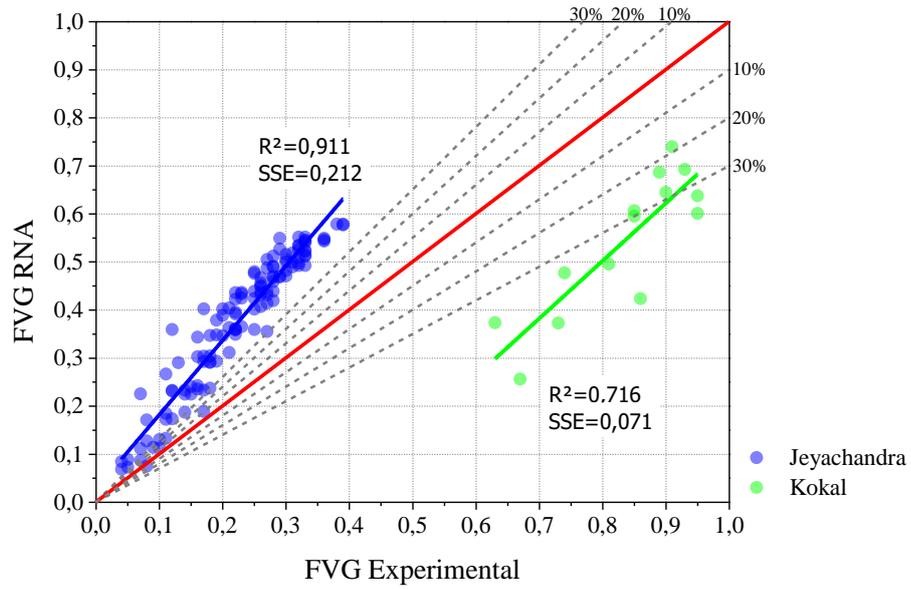


Figura 8-4: Predição da FVG do grupo alvo para RNA com sete adimensionais.

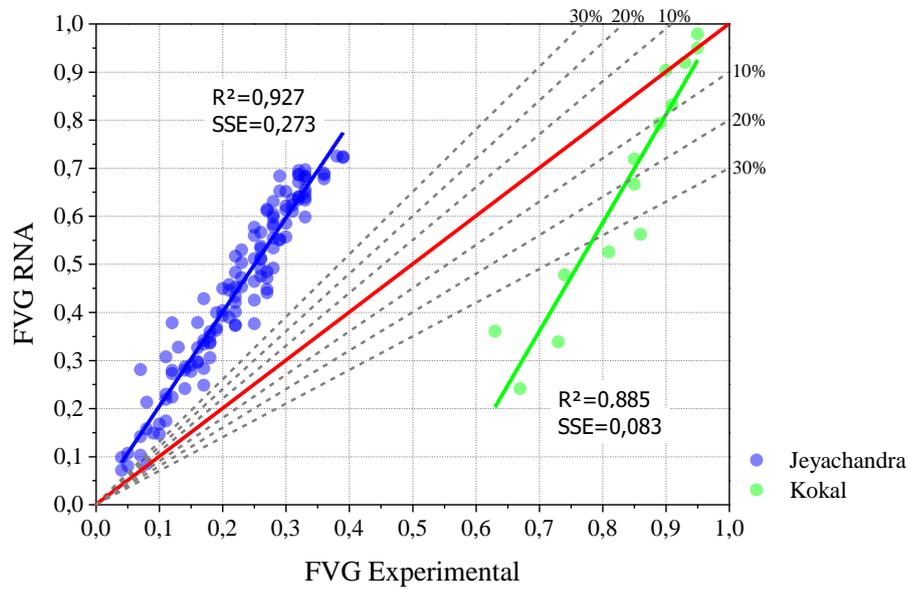


Figura 8-5: Predição da FVG do grupo alvo para RNA com seis adimensionais.

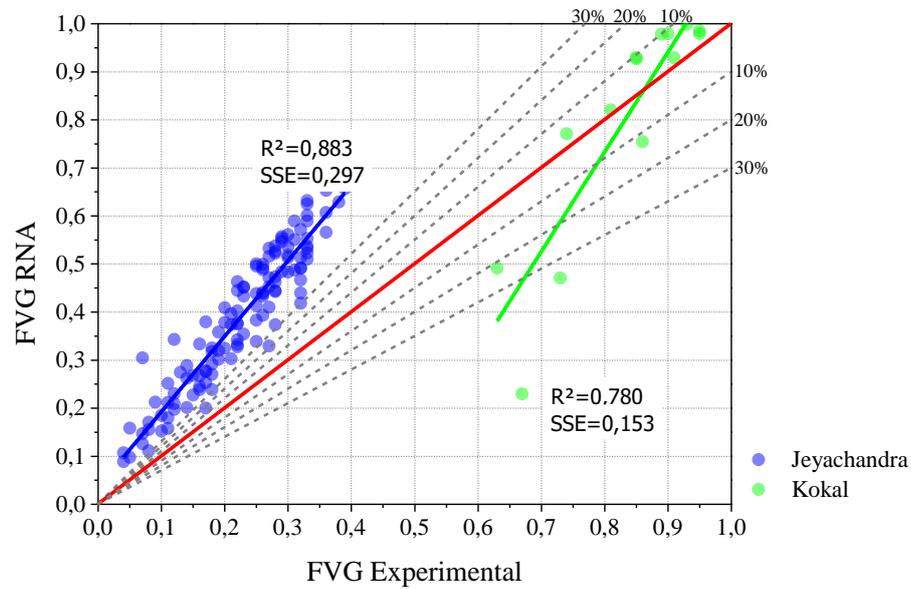


Figura 8-6: Predição da FVG do grupo alvo para RNA com cinco adimensionais.

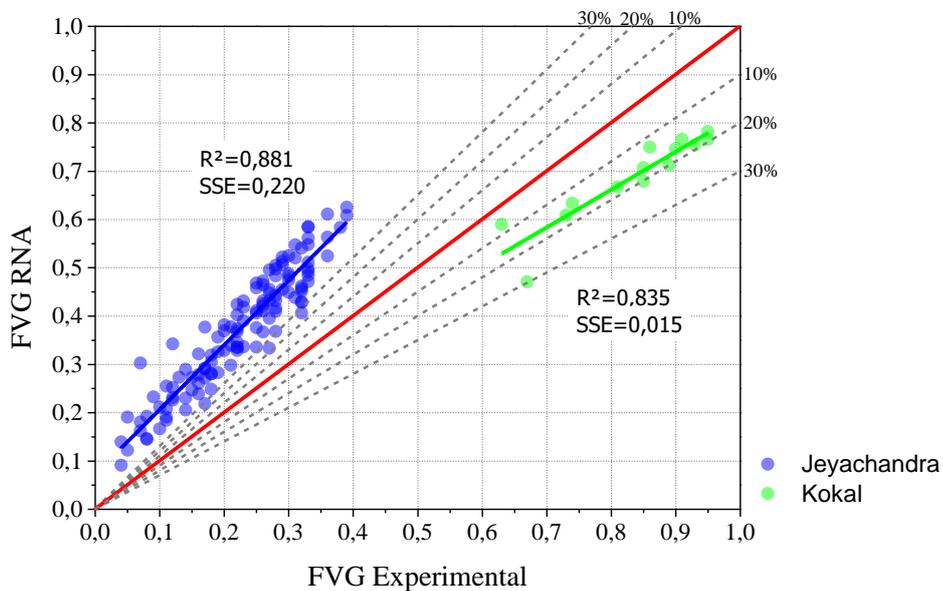


Figura 8-7: Predição da FVG do grupo alvo para RNA com cinco adimensionais modificada.

## 8.2 RNA DE PREDIÇÃO DO PADRÃO DE ESCOAMENTO

Nesta seção, são apresentados os resultados das redes neurais para a predição do padrão de escoamento do conjunto *alvo*. A avaliação da importância relativa dos grupos adimensionais seguiu o mesmo procedimento exposto na Seção 8.1. No entanto, a RNA de predição de

escoamento possui duas camadas ocultas enquanto a rede de FVG possui apenas uma. Logo, foi necessário testar mais arquiteturas de rede conforme mostrado na Tabela 8-4, tendo-se identificado a melhor arquitetura em cada caso. A análise de pesos para eliminação do adimensional menos relevante é apresentada na Tabela 8-5.

Tabela 8-4: Melhor arquitetura da RNA de padrão de escoamento usada em cada ciclo.

Ciclo	Adimensionais	Número de Neurônios 1	Número de Neurônios 2	Treinamento		Teste	
				R <sup>2</sup>	SSE	R <sup>2</sup>	SSE
1	R.P, Re <sub>G</sub> , Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>L</sub> , We <sub>BF</sub> , R.V., Fr <sub>BF</sub> .	4	3	0,870	1,539	0,833	0,658
		4	4	0,863	1,616	0,835	0,653
		4	5	0,842	1,869	0,810	0,747
		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>0,887</b>	<b>1,336</b>	<b>0,859</b>	<b>0,555</b>
		5	4	0,854	1,719	0,831	0,666
		5	5	0,854	1,730	0,816	0,728
		6	3	0,875	1,475	0,832	0,665
		6	4	0,871	1,527	0,831	0,674
2	R.P, Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>L</sub> , We <sub>BF</sub> , R.V., Fr <sub>BF</sub> .	3	2	0,820	2,129	0,748	0,994
		3	3	0,731	3,180	0,716	1,117
		3	4	0,803	2,328	0,730	1,063
		4	2	0,792	2,461	0,760	0,945
		4	3	0,816	2,172	0,797	0,800
		4	4	0,805	2,304	0,801	0,784
		<b>5</b>	<b>2</b>	<b>0,861</b>	<b>1,640</b>	<b>0,840</b>	<b>0,634</b>
		5	3	0,860	1,649	0,815	0,729
3	R.P, Re <sub>L</sub> , Re <sub>BF</sub> , We <sub>L</sub> , We <sub>BF</sub> , Fr <sub>BF</sub> .	3	2	0,680	3,775	0,616	1,522
		3	3	0,777	2,632	0,642	1,425
		4	2	0,764	2,792	0,665	1,328
		4	3	0,772	2,692	0,695	1,201
		<b>5</b>	<b>2</b>	<b>0,879</b>	<b>1,435</b>	<b>0,829</b>	<b>0,675</b>
		5	3	0,774	2,667	0,744	1,007
4	R.P, Re <sub>L</sub> , We <sub>L</sub> , We <sub>BF</sub> , Fr <sub>BF</sub> .	3	1	0,482	6,118	0,433	2,230
		3	2	0,692	3,644	0,571	1,720
		3	3	0,700	3,550	0,607	1,563
		4	1	0,365	7,507	0,335	2,619
		4	2	0,685	3,718	0,586	1,652
		<b>4</b>	<b>3</b>	<b>0,764</b>	<b>2,788</b>	<b>0,694</b>	<b>1,208</b>

Tabela 8-5: Pesos da primeira camada oculta da RNA de padrão de escoamento atribuídos a cada adimensional.

Ciclo	Nº de adimensionais	Soma dos valores absolutos dos pesos							
		R.P.	Re <sub>G</sub>	Re <sub>L</sub>	Re <sub>BF</sub>	We <sub>L</sub>	We <sub>BF</sub>	R.V.	Fr <sub>BF</sub>
1	8	54	<b>36</b>	140	192	40	138	43	41
2	7	28	-	37	19	35	20	<b>14</b>	23
3	6	10	-	3	<b>2</b>	7	3	-	5
4	5	10	-	5	-	8	7	-	4

O primeiro adimensional eliminado foi Re<sub>G</sub> enquanto se manteve a razão de pressão em todas as outras configurações. Esse resultado contraria o observado na análise de pesos para a RNA de FVG, porém, indica que variações na densidade do gás são importantes na determinação tanto do padrão de escoamento quanto da FVG.

A razão de velocidades foi o segundo adimensional a ser eliminado na análise. Assim como na RNA de FVG, a razão de velocidades apresentou baixa relevância comparada aos adimensionais que também levam em conta a velocidade superficial das fases: Re<sub>L</sub>, Re<sub>BF</sub>, We<sub>L</sub>, We<sub>BF</sub>, e Fr<sub>BF</sub>. Este fato sugere que, um ou mais desses adimensionais são capazes de abarcar os fenômenos computados pela razão de velocidades.

A expressão para Re<sub>BF</sub> foi elaborada a partir do número de Re<sub>L</sub>, com o termo ( $j_l$ ) substituído por ( $j_l + j_g$ ). Essa foi uma tentativa de contabilizar a turbulência crescente em escoamentos devido à aceleração da fase gasosa. Porém, este mesmo termo é contabilizado pelos números de Froude e Weber bifásicos, sugerindo a existência de redundância entre eles. A análise de pesos no terceiro ciclo indicou o número de Reynolds bifásico como o menos relevante dentre estes adimensionais para o conjunto de dados estudado.

Como no caso das previsões para a FVG, foram então feitas as previsões para o conjunto *alvo* utilizando-se a melhor arquitetura de cada ciclo. A Figura 8-8 apresenta os resultados da melhor rede de oito adimensionais. Os pontos de Ekinci [54] para o padrão intermitente foram bem determinados pela rede. Já os padrões bolhas dispersas e anular, para os mesmos dados, foram previstos como intermitentes. Para a mesma arquitetura, os pontos de Meng [65], determinados experimentalmente como estratificados, foram preditos como estratificado, intermitente e anular.

A retirada do  $Re_G$  acarretou em uma piora significativa nos resultados dos dados de Meng [65], estando praticamente todos pontos dentro da faixa do padrão intermitente quando deveriam estar no padrão estratificado (Figura 8-9). Além disso, as previsões do padrão intermitente dos pontos de Ekinci [54], que na configuração com oito adimensionais eram corretas, foram previstas como estratificado.

A Figura 8-10 apresenta as previsões da rede com seis adimensionais. A retirada do segundo adimensional, R.V., provocou uma piora significativa nos resultados, sendo as previsões com o maior valor de SSE entre todas as configurações. Com a retirada do terceiro adimensional (Figura 8-11), o número de  $Re_{BF}$ , todos os pontos foram previstos dentro da faixa de operação da rede, de 0 a 0,8. Resultados para Meng [61], que antes eram previsto erroneamente como intermitentes, passaram a ser previstos como estratificado, intermitente e anular. Os pontos do padrão intermitente de Ekinci [54] foram previstos até como bolhas dispersas. Em contrapartida, melhoraram as predições do padrão anular, ocorrendo algumas predições corretas.

A configuração com o menor SSE foi a de sete adimensionais. No entanto, o percentual de acertos para os dados de Meng [61] é muito baixo, conforme Tabela 8-6. Sendo assim, a arquitetura que combina um baixo valor de SSE com o maior número de acertos para Meng [61], foi a de cinco adimensionais.

Finalmente, nota-se uma alta taxa de acerto nas previsões para os padrões estratificado e intermitente quando comparada com os acertos para os padrões bolhas dispersas e anular. Este fato pode ser atribuído à grande concentração de pontos para estes padrões no treinamento da rede, conforme mostrada na Figura 5-5.

Tabela 8-6: Percentual de acertos e SSE do conjunto de dados alvo.

Número de adimensionais	Adimensionais	Ekinci [54]	Meng [61]	SSE
		% de Acertos	% de Acertos	
8	R.P, $Re_G$ , $Re_L$ , $Re_{BF}$ , $We_L$ , $We_{BF}$ , R.V., $Fr_{BF}$ .	96%	23%	22,40
7	R.P, $Re_L$ , $Re_{BF}$ , $We_L$ , $We_{BF}$ , R.V., $Fr_{BF}$ .	94%	1%	7,03
6	R.P, $Re_L$ , $Re_{BF}$ , $We_L$ , $We_{BF}$ , $Fr_{BF}$ .	90%	0	34,02
5	R.P, $Re_L$ , $We_L$ , $We_{BF}$ , $Fr_{BF}$ .	85%	37%	13,18

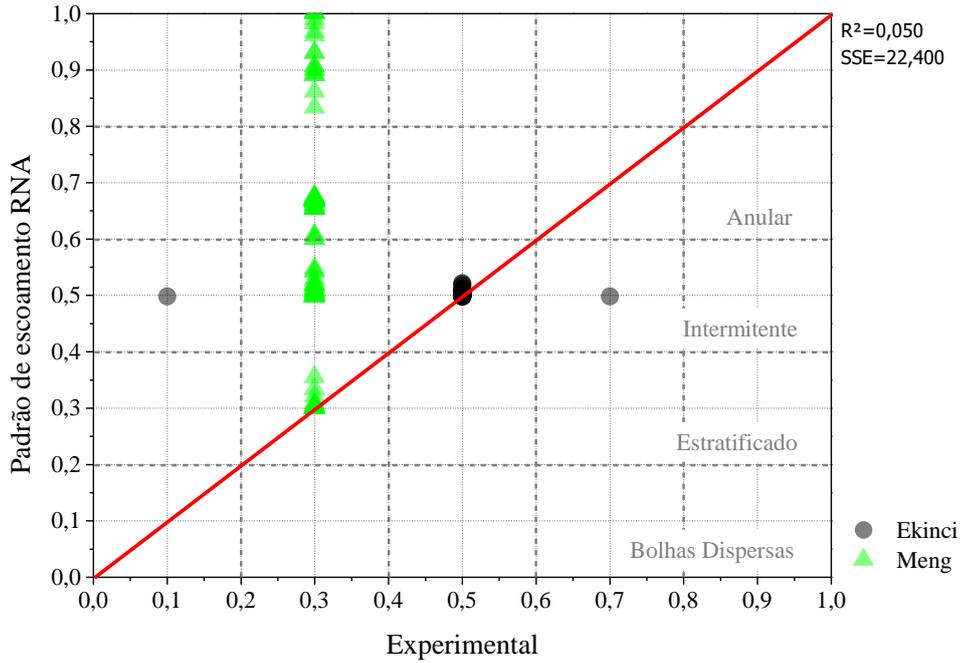


Figura 8-8: Predição do padrão de escoamento do grupo *alvo* para RNA com oito adimensionais.

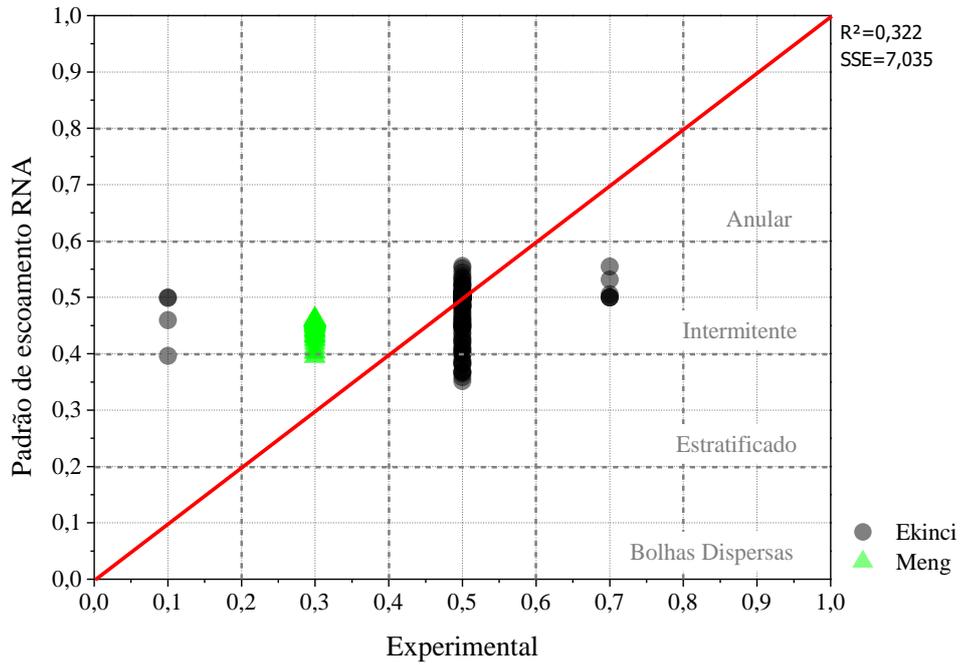


Figura 8-9: Predição do padrão de escoamento do grupo *alvo* para RNA com sete adimensionais.

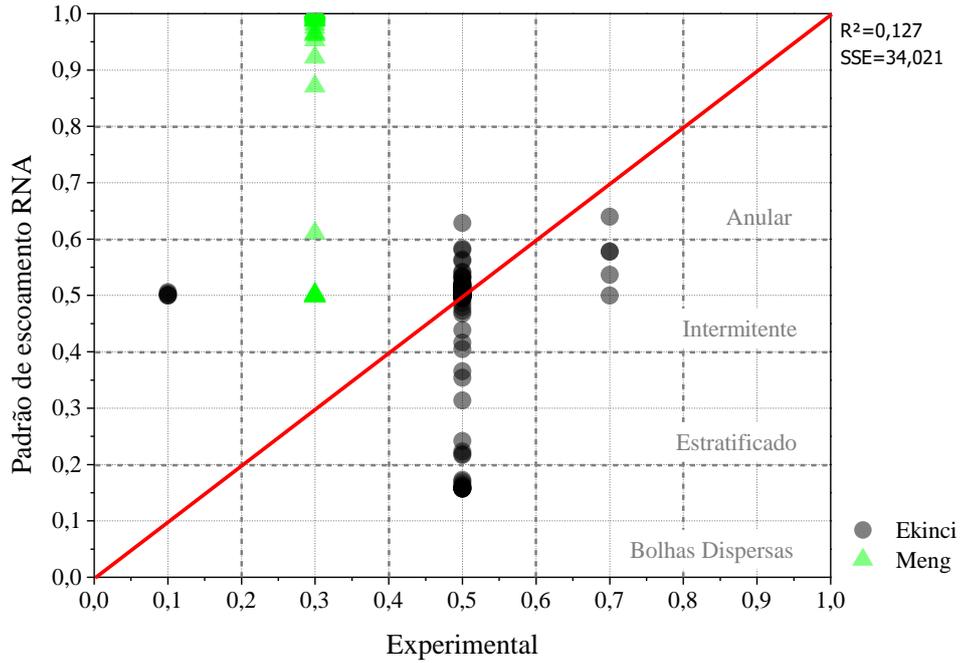


Figura 8-10: Predição do padrão de escoamento do grupo *alvo* para RNA com seis adimensionais.

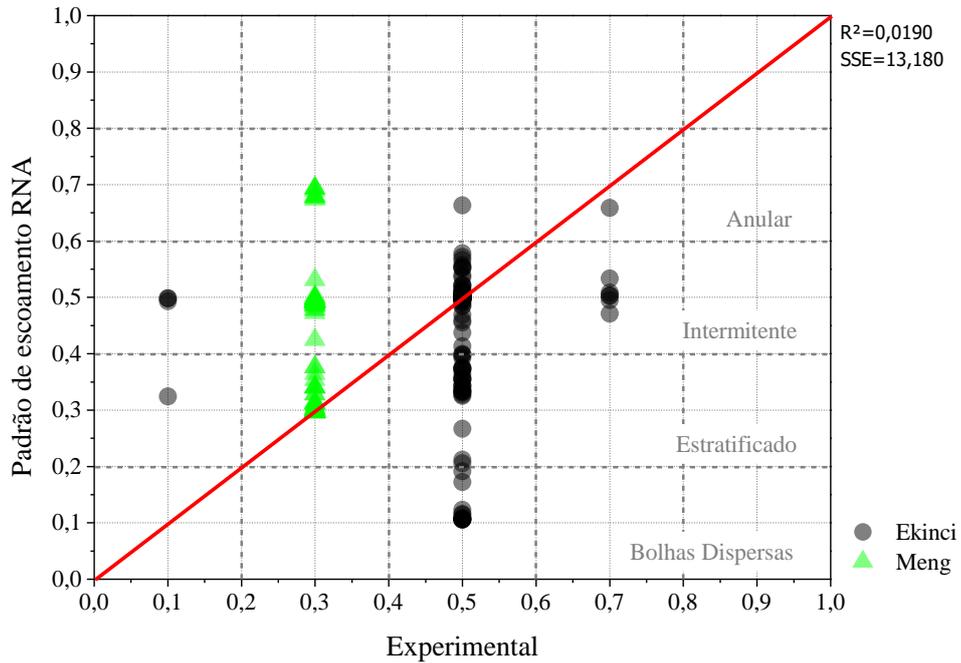


Figura 8-11: Predição do padrão de escoamento para do grupo *alvo* para RNA com cinco adimensionais.

### 8.3 COMPARAÇÃO DAS PREDIÇÕES DAS REDES NEURAIS COM OS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta seção, são comparados os resultados de predição das redes com os resultados de simulações numéricas para os conjuntos *alvo* e *teste* realizadas com o programa OLGA [50]. As redes utilizadas nesta comparação foram aquelas que forneceram os melhores resultados, conforme descrito na Seção 6.3.3.

A Figura 8-12 compara as predições feitas pela RNA de FVG — cinco adimensionais na entrada e sete neurônios na primeira camada oculta — com os resultados das simulações numéricas para o conjunto *alvo*. As predições da FVG e as simulações dos pontos de Jeyachandra [57] apresentaram o mesmo desvio sistemático dos valores experimentais. Para o conjunto de Jeyachandra [57], considerando um envelope de erro de 30% (Figura 8-13), a RNA acertou em aproximadamente 2% das suas previsões contra 12% do OLGA [50]. O principal motivo para este baixo percentual de acerto da RNA parece ser o treinamento deficiente. Nada pode ser afirmado no caso do OLGA [50] porque o fabricante não disponibiliza o modelo semiempírico utilizado nessa faixa de vazão. Para os dados de Kokal [58] as simulações numéricas retornaram resultados precisos, estando todos os pontos dentro do envelope de erro de 20%. A RNA também apresentou um bom desempenho para Kokal [58] atingindo o percentual de acerto de 100% conforme apresentado na Figura 8-13. Além disso, apenas um pontos ficou fora do envelope de erro de 20%.

Para o conjunto de dados *teste*, é possível notar o bom desempenho da RNA comparada com as simulações para os pontos de Gregory [56] e Mukherjee [62], conforme mostrado na Figura 8-13. O conjunto *teste*, 25% do conjunto *treinamento*, foi utilizado para seleção da melhor arquitetura durante o treinamento e nunca como dado de treinamento. Para Gregory [56], a RNA acertou em 61% dos casos contra aproximadamente 4% para as simulações realizadas com o programa OLGA [50]. Já para Mukherjee [62], a RNA acertou em 83% dos pontos contra 70% das simulações numéricas. No entanto, avaliando-se a média de acertos considerada para os dois conjuntos de dados simultaneamente, *alvo* e *teste*, as simulações numéricas se mostraram ligeiramente superiores, atingindo a média de acertos de 76% contra 72% da RNA.

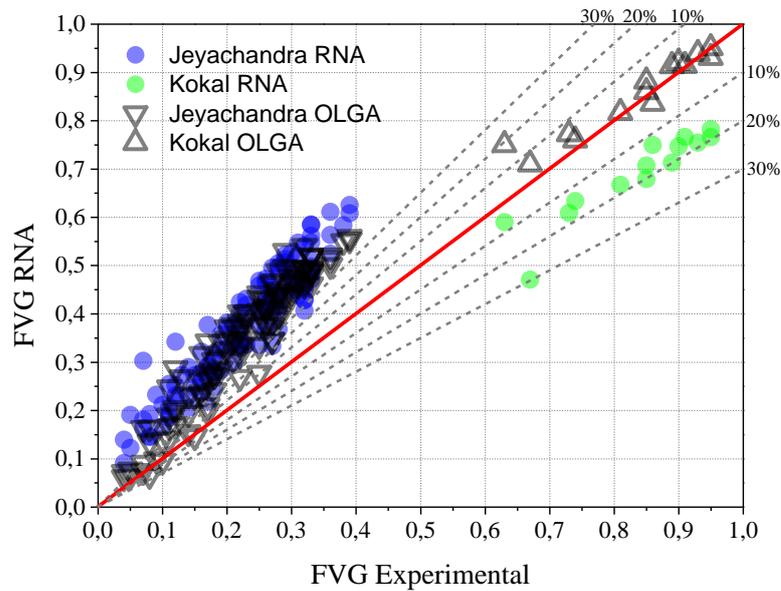


Figura 8-12: Gráfico comparativo das previsões da RNA de FVG com os resultados das simulações numéricas (OLGA).

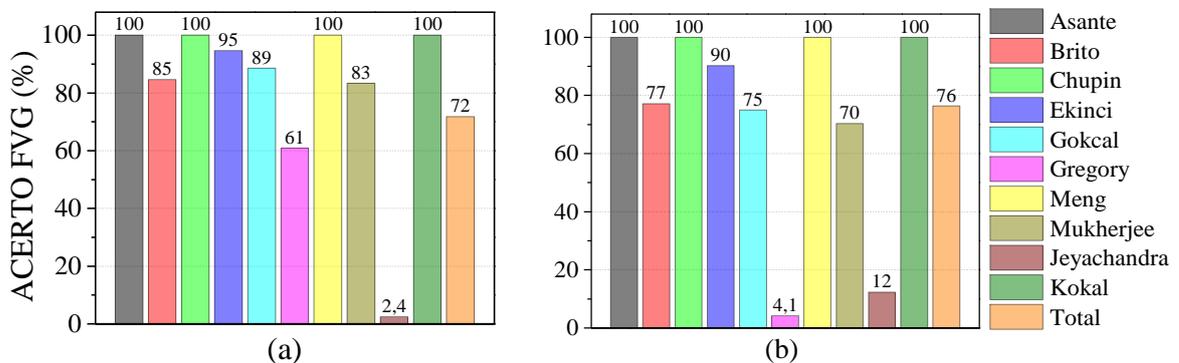


Figura 8-13: Histograma do percentual de acertos considerando aceitável o desvio de 30% na previsão da FVG usando: (a) RNA; (b) simulações numéricas (OLGA).

A Figura 8-14 compara as previsões da RNA de predição do padrão de escoamento com os resultados das simulações numéricas. As simulações numéricas se mostraram precisas na determinação dos padrões estratificado e intermitente e erraram nos padrões bolhas dispersas e anular. Estes dois últimos foram classificados como intermitente. Por outro lado, os piores resultados da rede foram para os padrões estratificado e intermitente, confundindo pontos do estratificado com intermitente e anular, e pontos do intermitente com bolhas dispersa, estratificado, intermitente e anular. Em contrapartida, a rede conseguiu acertar na identificação de um ponto do padrão anular.

Comparando os percentuais gerais de acerto, Figura 8-15, as simulações numéricas forneceram melhores resultados. As simulações acertaram em 89% dos pontos dos conjuntos *alvo e teste*, contra 79% obtidos pela rede. Comparando os resultados somente para o conjunto *alvo*, Figura 8-14, novamente as simulações se mostraram superiores. Para Ekinci [54], o percentual de acertos das simulações foi de 97% contra 85% para as redes; para Meng [61], os percentuais foram de 100% e 37%, respectivamente. Em alguns grupos testados, como Asante[51] e Brito [52], a rede retornou melhores resultados.

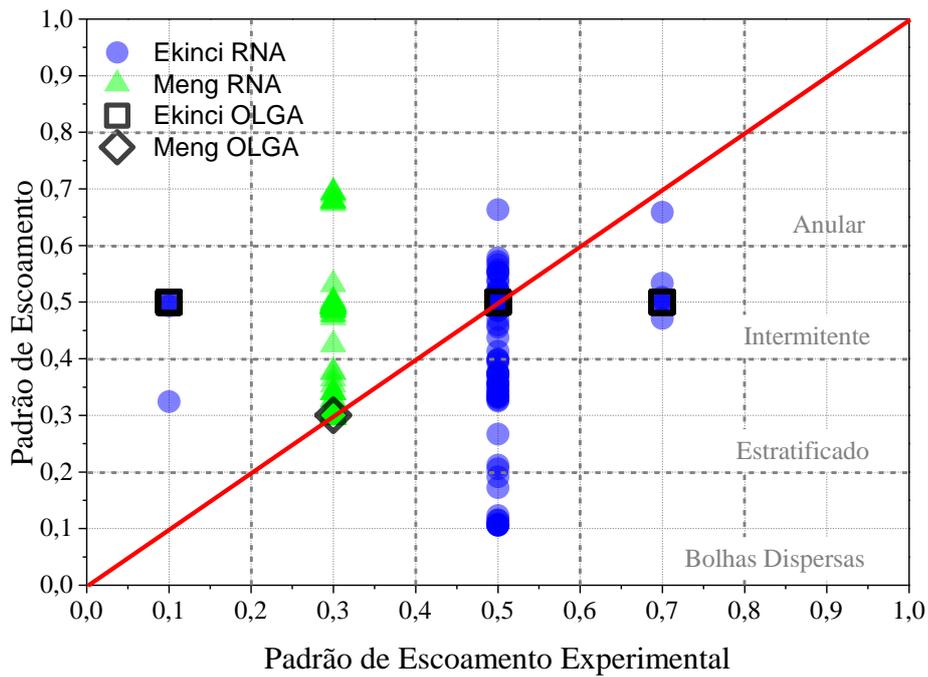


Figura 8-14: Gráfico comparativo das previsões da RNA de padrão de escoamento com os resultados das simulações numéricas (OLGA).

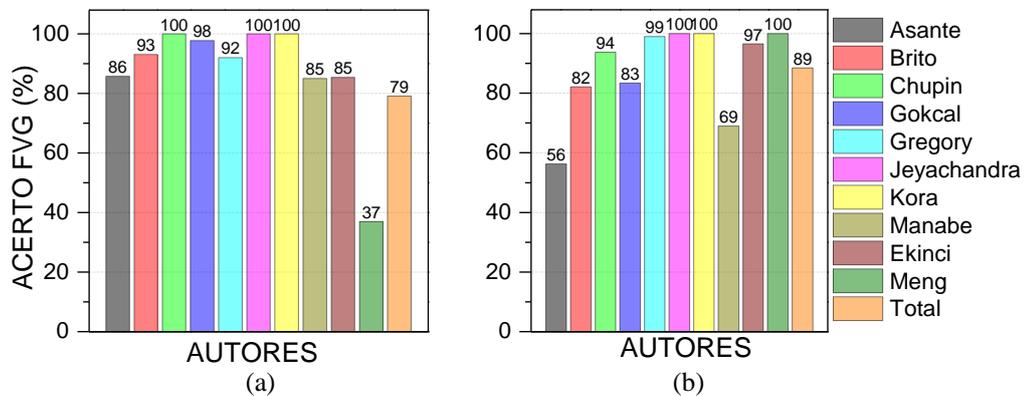


Figura 8-15: Histograma do percentual de acertos na previsão do padrão de escoamento usando: (a) RNA; (b) simulações numéricas unidimensionais (OLGA).

De qualquer modo, as taxas de acerto das redes neurais atingem níveis comparáveis àqueles das simulações numéricas, sendo em alguns casos até superiores. A rede de padrões de escoamento também foi capaz de identificar o padrão de escoamento anular, padrão este não identificado pelas simulações numéricas. Porém, na média de acertos para os conjuntos *alvo* e *teste*, as simulações numéricas ainda se mostraram superiores. Melhorias no treinamento da rede, como uma distribuição mais homogênea dos pontos de treinamento, certamente aumentariam o seu desempenho. Assim, as redes de números adimensionais, associadas às redes de ultrassom, podem tornar a medição multifásica ultrassônica uma técnica robusta e confiável. Porém, isto deve ser comprovado pela realização de medidas ultrassônicas em escoamentos reais em instalações de porte industrial e sob condições representativas da indústria petrolífera.

## 9. CONCLUSÕES

### 9.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

Neste trabalho, estudou-se o uso de RNAs associadas às medições ultrassônicas e aos números adimensionais para a predição da FVG e do padrão de escoamento. Para a realização das medições ultrassônicas, projetou-se um protótipo para operar sob condições comumente encontradas na indústria petrolífera. O protótipo foi então testado em laboratório utilizando uma montagem vertical simplificada. Em relação às RNAs baseadas em números adimensionais, fez-se um estudo da contribuição de cada adimensional procurando melhorar os resultados de predição e diminuir o tempo de processamento pela rede. Os resultados de predição dessa RNA foram então comparados com os resultados obtidos de simulações numéricas unidimensionais utilizando o programa computacional OLGA [50].

Os principais resultados obtidos podem ser assim enumerados:

- O código computacional para tratamento de dados ultrassônicos foi aprimorado, facilitando a sua operação e reduzindo o tempo gasto para se obter os valores da razão de energia para as amostras.
- O protótipo permitiu a obtenção de sinais acústicos em escoamentos bifásicos petróleo-ar e soluções aquosas de glicerina-ar. Além disso, é um equipamento portátil e de fácil instalação em tubulações industriais.
- Os resultados de medições da FVG em escoamentos bifásicos de soluções aquosas de glicerina e ar foram fortemente afetados pela presença de microbolhas aprisionadas na fase contínua. Principalmente os sensores laterais, 45 e 135°, sofreram forte influência da presença de microbolhas por possuírem baixa relação sinal ruído. Por outro lado, as previsões da FVG feitas pela RNA utilizando apenas os sensores a 0 e 180° apresentaram uma boa tendência apesar de um desvio sistemático de aproximadamente de 40%. Aparentemente, o erro sistemático presente nos resultados se deve à presença de microbolhas aprisionadas na fase contínua.
- A técnica ultrassônica foi capaz de medir a FVG em escoamentos multifásicos mesmo na presença de outras fases dispersas em baixas concentrações. No entanto, deve-se ter cuidado especial em situações envolvendo baixos valores de FVG, pois a contribuição das outras fases para a atenuação do sinal poderá ser significativa. Uma possível solução é a adoção

de modelos matemáticos, como os apresentados por Figueiredo *et al.* [3], para a correção dos resultados. Todavia, estas correções admitem que não há interação acústica entre as heterogeneidades no escoamento, uma hipótese válida apenas para baixas concentrações das fases dispersas.

- As taxas de acerto das RNAs baseadas em números adimensionais atingiram níveis comparáveis àqueles das simulações numéricas com o programa OLGA [50], sendo em alguns casos até superiores.
- A RNA de padrões de escoamento foi capaz de identificar o padrão anular, sendo que este não foi identificado pelas simulações numéricas. Porém, na média de acertos para os conjuntos alvo e teste, as simulações numéricas ainda se mostraram ligeiramente superiores.
- Existe uma configuração ótima para os números adimensionais utilizados na entrada da rede. O processo de seleção dos adimensionais baseado na análise dos pesos da primeira camada oculta se mostrou uma ferramenta eficiente para a seleção dos adimensionais mais adequados para cada situação.

## 9.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do exposto acima, são sugeridos os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de um algoritmo para filtragem dos sinais acústicos que são afetados por ruídos de baixa intensidade.
- Desenvolvimento de um algoritmo para seleção automática da porção útil dos sinais (janela de atividade).
- Desenvolvimento de um algoritmo único incorporando aquisição dos sinais, tratamento e processamento dos dados pelas redes neurais.
- Desenvolvimento de um circuito embarcado que, depois de instalado no protótipo de medidor multifásico, seja capaz de tratar os dados de medidas ultrassônicas usando RNAs e fornecer em tempo real o padrão de escoamento e a FVG.
- Realização de medidas ultrassônicas em escoamentos reais da indústria petrolífera de maneira a aumentar o banco de dados para treinamento das RNAs. Os experimentos devem ser planejados de modo que sejam medidos pontos experimentais em toda a faixa de FVG

e de padrões de escoamento de interesse. É importante que o número de pontos medidos por faixa de vazão e por padrão de escoamento sejam aproximadamente iguais para se obter o melhor desempenho da rede.

- Realização de testes exaustivos do protótipo com o circuito embarcado.
- Realização de medições ultrassônicas em emulsões de petróleo com a presença simultânea de água livre.
- Realização de experimentos para avaliar o desempenho da técnica ultrassônica quando usada em tubulações de grande diâmetro.
- Desenvolvimento de um modelo acústico para a atenuação provocada por bolhas dispersas de modo a se obter a condição de referência para o cálculo das razões de energia para os sensores laterais ( $45^\circ$  e  $135^\circ$ ).
- Revisão e aprimoramento de modelos mecanicistas do escoamento pistonado em vista de informações fornecidas pela técnica ultrassônica. Um novo modelo, alimentado pela técnica ultrassônica em tempo real, permitiria então se obter estimativas mais precisas de parâmetros hidrodinâmicos destes escoamentos extremamente importantes para a indústria petrolífera.
- Desenvolvimento de um procedimento para a combinação sistemática dos resultados de predição das RNAs baseadas em medidas ultrassônicas e números adimensionais conforme sugerido por Nakashima [29].
- Extensão do trabalho de modelagem acima para outros padrões de interesse prático para a indústria petrolífera.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C.M. Atkinson and H.K. Kytömaa, *Acoustic wave speed and attenuation in suspensions*. Int. J. Multiphase Flow (1992), 577–592.
- [2] M.A. Isakovich *On propagation of sound through emulsions*. J. Exp. Theor. Phys., Russia, 1948.
- [3] M.M.F. Figueiredo, J.L. Goncalves, A.M.V. Nakashima, A.M.F. Fileti, and R.D.M.D. Carvalho, *The Use of an Ultrasonic Technique and Neural Networks for Identification of the Flow Pattern and Measurement of the Gas Volume Fraction in Multiphase Flows*. Experimental Thermal and Fluid Science (2016), 29-50.
- [4] J.E. Thomas, ed. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2004, Editora Interciência: Rio de Janeiro.
- [5] G. Falcone, G.F. Hewitt, and C. Alimonti, *Multiphase Flow Metering, Principles and Applications*, First ed., 54, Elsevier, 2010.
- [6] H. Devold, *Oil and Gas Production Handbook, An Introduction to Oil and Gas Production*, 1.3 ed., ABB ATPA Oil and Gas, 2006.
- [7] L. Scheers, *Multi-Phase Flow Metering: On its way from nursing to mature technology*. Hydrocarbon Production Accounting Workshop, Moscow, Russia, 2008.
- [8] R. Arora *Production Well Testing Using Non-radioactive Multiphase Flow Meters*. Exploration & Production 2009.
- [9] J.L. Gonçalves, T.A. Paiva, J.R.A. Junior, R.D.M.D. Carvalho, and O.J. Venturini, *Development of a Multiphase Flow Metering Procedure Based on the Ultrasonic Technique*. 15th International Conference on Multiphase Production Technology (MPT 2011), Cannes, France, 2011.
- [10] H.M. Prasser, A. Böttger, and J. Zschau, *A new electrode-mesh tomograph for gas–liquid flows*. Flow Meas. Instr. (1998), 111–119.
- [11] M.J.D. Silva, *Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging*, 2008, Electrical and Computing Engineering Department, Technischen University Dresden, Dresden, Germany.
- [12] R.D.M.D. Carvalho and A.C. Bannwart, *The Use of the Ultrasonic Technique for the Study and Online Monitoring of Multiphase Flows*. Advances in Multiphase Flow and Heat Transfer 4 (2010), 144-177.
- [13] L.J. Bond, M. Morra, M.S. Greenwood, J.A. Bamberger, and R.A. Pappas, *Ultrasonic Technologies for Advanced Process Monitoring, Measurement, and Control*. 20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology, 2003.
- [14] J.S. Chang, Y. Ichikawa, and G.A. Irons, *Flow Regime Characterization and Liquid Film Thickness Measurement in Horizontal Gas-Liquid Two-Phase Flow by an Ultrasonic Method*. AIAA/ASME Joint Plasma Thermophysics HTC (1982),
- [15] S.W. Jones, A. Amblard, and C. Favreau, *Interaction of an ultrasonic wave with a bubbly mixture*. Experiments in Fluids (1986), 341–349.
- [16] Y. Zheng and Q. Zhang, *Simultaneous Measurement of Gas and Solid Holdups in Multiphase Systems Using Ultrasonic Technique*. Chemical Engineering Science 17 (2004), 3505-3514.

- [17] M. Vatanakul, Y. Zheng, and M. Couturier, *Application of ultrasonic technique in multiphase flow*. Industrial and Engineering Chemistry Research (2004), 5681-5691.
- [18] R.D.M.D. Carvalho, O.J. Venturini, E.I. Tanahashi, F.N. Jr., and F.d.A. França, *Application of the ultrasonic technique and high-speed filming for the study of the structure of air–water bubbly flows*. Experimental Thermal and Fluid Science (2009), 1065-1086.
- [19] E.I. Tanahashi, *Desenvolvimento da Técnica de Ultrassom para Medição da Fração de Vazio e Detecção do Padrão de Escoamentos Água-Ar*, 2010, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG.
- [20] F.A. Grangeiro, *Caracterização do Escoamento Intermitente Horizontal Água-Ar Através de Ultrassom Auxiliado por Filmagem Ultrarrápida*, 2010, Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo.
- [21] J.L. Goncalves, *Desenvolvimento de uma Técnica Ultrassônica para Medição da Concentração das Fases Dispersas em Escoamentos Multifásicos Representativos da Indústria de Petróleo e Gás Natural*, 2013, Instituto de Engenharia Mecânica, UNIFEI, Itajubá, MG.
- [22] M. Meribout, N.Z. Al-Rawahi, A.M. Al-Naamany, A. Al-Bimani, K. Al-Busaidi, and A. Meribout, *A Multisensor Intelligent Device for Real-Time Multiphase Flow Metering in Oil Fields*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 6 (2010), 1507-1519.
- [23] S. Corneliussen, J.P. Couput, E. Dahl, E. Dykesteen, K.E. Froysa, E. Malde, H. Moestue, P.O. Moksnes, L. Scheers, and H. Tunheim, *Handbook of Multiphase Flow Metering*, The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement e The Norwegian Society of Chartered Technical and Scientific Professionals, 2005.
- [24] N. Bhat and T.J. McAvoy, *Use of neural nets for dynamic modeling and control of chemical process systems*. Comput. Chem. Eng. 4-5 (1990), 573 - 583.
- [25] A. Shaikh and M. Aldahhan, *Development of an artificial neural network correlation for prediction of overall gas holdup in bubble column reactors*. Chemical Engineering and Processing 8-9 (2003), 599-610.
- [26] E.S. Rosa, R.M. Salgado, T. Ohishi, and N. Mastelari, *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 9 (2010), 738–754.
- [27] E. Filletti and P. Seleglim, *Nonintrusive measurement of interfacial area and volumetric fraction in dispersed two-phase flows using a neural network to process acoustic signals—a numerical investigation*. Int. J. Num. Meth in Biomed. Eng. (2010), 234–251.
- [28] E.H. Inoue, *Utilização da Técnica Ultrassônica e de Redes Neurais para Determinação da Concentração das Fases Dispersas e Detecção da Configuração de Escoamentos Multifásicos Representativos da Indústria Petrolífera*, 2013, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, SP.
- [29] A.M.V. Nakashima, *Desenvolvimento de Redes Neurais Utilizando Técnica Ultrassônica e Números Adimensionais para a Determinação da Fração de Vazio e Padrões de Escoamento Multifásicos Representativos da Indústria do Petróleo*, 2015, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil.

- [30] F.A. Grangeiro, *Caracterização do Escoamento Intermitente Horizontal Água-Ar através de Ultrassom Auxiliado por Filmagem Ultrarrápida*, 2010, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas.
- [31] T.A. Paiva, *Aplicação de Técnicas Ultrassônicas para Análise de Escoamentos Multifásicos Líquido-Sólido e Líquido-Sólido-Gás*, 2011, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG.
- [32] O. Shoham, *Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes*, Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [33] O. Bratland *Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance*. Disponível em <http://www.drbratland.com/>. Acesso em 01 nov 2012, 2010.
- [34] A.H. Lee, J.Y. Sun, and W.P. Jepson, *Study of flow regime transitions of oil-water-gas mixtures in horizontal pipelines*. Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference, Singapore, 1993.
- [35] E.E. Paladino, *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. (2005),
- [36] T.J. Danielson, *Sand transport in multi-phase pipelines*. Offshore Technology Conference 18691, Houston, USA, 2007.
- [37] O.O. Bello, *Modelling particle transport in fas-oil-sand multi-phase flows and its applications to production operations*, 2008, Faculty of Energy and Economics Sciences, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- [38] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, and J.V. Sanders, *Fundamentals of acoustics*, Fourth ed., ISBN: 0-471-84789-5, 2000.
- [39] J.D.N. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, CRC Press LLC, 2002.
- [40] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Second ed., Prentice Hall, 1998.
- [41] Olympus-Panametrics-NDT *Ultrasonic Transducers Technical Notes*. Olympus Corporation, 2011.
- [42] N.S. Cheng, *Formula for the Viscosity of a Glycerol-Water Mixture*. Industrial and Engineering Chemistry Research (2008), 3285-3288.
- [43] R.D.M.D. Carvalho, *Detecção de Vazamentos em Escoamentos de Gás e Determinação de Padrões de Escoamentos e da Concentração de Gás em Escoamentos Multifásicos por Meio de Medidas Acústicas e Redes Neurais*. 2015, UNICAMP-FAPESP.
- [44] H. Sheikha and M.P. Darvish, *Micro Bubbles in Solution-Gas Drive in Heavy Oil: Their Existence and Importance*. Transport in Porous Media 3 (2012), 495-516.
- [45] E.L. Claridge and M. Prats, *A Proposed Model and Mechanism for Anomalous Foamy Heavy Oil Behavior*. International Heavy Oil Symposium, Calgary, Canada, 1995.
- [46] R. Bora, B.B. Maini, and A. Chakma, *Flow Visualization Studies of Solution Gas Drive Process in Heavy Oil Reservoir Using a Glass Micromodel*. SPE Reservoir Evaluation Engineering 3 (2000), 224-229.

- [47] R. Bora, A. Chakma, and B.B. Maini, *Experimental Behavior of Foamy Oil Flow Using a High Pressure Etched Glass Micromodel*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, CO - USA, 2003.
- [48] R.D.M.D. Carvalho, O.J. Venturini, E.I. Tanahashi, F. Neves, and F.A. Franca, *Application of the Ultrasonic Technique for the Study of the Structure of Air-Water Bubbly Flows*. Experimental Thermal and Fluid Science 7 (2009), 1065-1086.
- [49] R.J. Kalivoda *Understanding the limits of ultrasonics for crude oil measurement*. FMC Technologies, Erie, Pennsylvania, USA, 2013.
- [50] Schlumberger, *OLGA Dynamic Multiphase Flow Simulator*. 2013.
- [51] B. Asante, *Multiphase Transport of gas and Low Loads of Liquids in Pipelines*, 2000, Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, Calgary, Canada.
- [52] R. Brito, *Effect of Medium Oil Viscosity on Two-Phase Oil-Gas Flow Behavior in Horizontal Pipes*, 2012, The Graduate School, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- [53] G. Chupin, *An Experimental Study of Multiphase Gas-Liquid Pipe Flow at Low Liquid Loading*, 2003, Department of Energy and Process Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- [54] S. Ekinci, *Pipe Inclination Effects on Slug Flow Characteristics of High Viscosity Oil/Gas Two-Phase Flow*, 2015, The Graduate School, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- [55] B. Gokcal, *An Experimental and Theoretical Investigation of Slug Flow for High Oil Viscosity in Horizontal Pipes*, 2008, The Graduate School, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- [56] G.A. Gregory and D.S. Scott, *Correlation of Liquid Slug Velocity and Frequency in Horizontal Cocurrent Gas-Liquid Slug Flow*. AIChE Journal 6 (1969), 933-935.
- [57] B.C. Jeyachandra, *Effect of Pipe Inclination on Flow Characteristics of High Viscosity Oil-Gas Two-Phase Flow*, 2011, Petroleum Engineering, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- [58] S.L. Kokal, *An Experimental Study of Two Phase Flow in Inclined Pipes*, 1987, Chemical Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada.
- [59] C. Kora, C. Sarica, H.Q. Zhang, A. Al-Sarkhi, K. Fahd, and E.M. Alsafran, *Effects of High Oil Viscosity on Slug Liquid Holdup in Horizontal Pipes*. The Canadian Unconventional Resources Conference, Calgary, Canada, 2011.
- [60] R. Manabe, *A Comprehensive Mechanistic Heat Transfer Model for Two-Phase Flow with High-Pressure Flow Pattern Validation*, 2001, Department of Petroleum Engineering, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- [61] W. Meng, *Low Liquid Loading Gas/Liquid Two-Phase Flow in Near-Horizontal Pipes*, 1999, The Graduate School, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- [62] H. Mukherjee, *An Experimental Study of Inclined Two-Phase Flow*, 1979, The Graduate School, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- [63] Schlumberger. *OLGAS*. 2015; Available from: <http://www.software.slb.com/pages/olgas.aspx>.

- [64] K.H. Bendiksen, D. Malnes, R. Moe, and S. Nuland, *The Dynamic Two-Fluid Model OLGA: Theory and Application*, SPE Production Engineering, 1991.
- [65] G. Meng, Jaworski, A. J., White, N. M., *Composition measurements of crude oil and process water emulsions using thick-film ultrasonic transducers*. Chemical Engineering and Processing (2006), 383-391.
- [66] A. Shaikh e Al-Dahhan, Al-Dahhan, M., , *Development of an artificial neural network correlation for prediction of overall gas holdup in bubble column reactors*. Chemical Engineering and Processing 8-9 (2003), 599 - 610.
- [67] R.D.M.D. Carvalho, *Utilização da Técnica Ultrassônica e de Redes Neurais para Determinação da Concentração das Fases Dispersas e Detecção da Configuração de Escoamentos Multifásicos Representativos da Indústria Petrolífera*. 2015, UNICAMP-PETROBRAS.
- [68] A.J. Ghajar, *Non-Boiling Heat Transfer in Gas-Liquid Flow in Pipes – a Tutorial*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 1 (2005), 46-73.
- [69] Y.C. Chu and B.G. Jones, *Convective Heat Transfer Coefficient Studies in Upward and Downward, Vertical, Two-Phase, Non-Boiling Flows*. AIChE Symp. Series (1980), 79-90.
- [70] E.J. Greskovich and A.L. Shrier, *Slug Frequency in Horizontal Gas-Liquid Slug Flow*. Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development 2 (1972), 317-318.
- [71] P. Faluhelyi and F.L. Neto, *Simulação Numérica do Comportamento Mecânico de Tubos Poliméricos de Parede Fina submetidos à Pressão Interna*. Revista Materia 3 (2006), 306-315.
- [72] P.C. Silva Telles, *Tubulações Industriais: Materiais, Projeto e Montagem*, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2009.

## Anexo A

### PROJETO DE UM MEDIDOR MULTIFÁSICO ULTRASSÔNICO

Neste trabalho, foi desenvolvido um novo suporte para os transdutores ultrassônicos que permitisse a realização de medições em ambientes industriais usando petróleo como fase contínua. Sendo assim, procurou-se um material que apresentasse um bom acoplamento acústico com o petróleo e que não reagisse quimicamente com este.

Foi feito um levantamento com a colaboração do fornecedor de resinas termoplásticas *DuPont*® para selecionar o material que melhor atendesse aos requisitos de projeto. A resina selecionada para a confecção do carretel foi a 100PNC010. Esse material foi selecionado devido ao seu alto limite de escoamento em temperaturas próximas de 60 °C, baixa interação química com os componentes do petróleo, fácil usinagem, bom acoplamento acústico com o petróleo e homogeneidade estrutural. O bom acoplamento acústico permite garantir que uma porção significativa da energia sonora incidente em uma interface entre dois meios será transmitida do primeiro meio para o segundo.

Na Tabela A-1, são apresentadas as propriedades acústicas do aço AISI 1020, da resina termoplástica 100PNC010 e um valor médio para o petróleo, por ser um fluido heterogêneo. Já a Tabela A-2 apresenta os índices de reflexão e transmissão do pulso ultrassônico. É possível notar que a parcela de sinal transmitida para o escoamento em uma interface 100PNC010-PETRÓLEO é muito superior àquela para uma interface AISI 1020-PETRÓLEO.

Tabela A-1: Propriedades acústicas de alguns materiais.

Material	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]	Velocidade Longitudinal [m/s]	Impedância acústica [kg/m <sup>2</sup> .s]
PETRÓLEO	900	1.290	1,2
AISI 1020	7.800	5.890	45,9
100PNC010	1.420	2.620	3,7

Tabela A-2: Índice de reflexão e transmissão do feixe ultrassônico.

INTERFACE	REFLEXÃO	TRANSMISSÃO
AISI 1020-PETRÓLEO	0,904	0,096
100PNC010-PETRÓLEO	0,275	0,725

- Foram estabelecidas premissas de projeto para o protótipo do medidor multifásico ultrassônico, doravante denominado simplesmente “carretel ultrassônico”:
- Deverá ser instalado em tubulações de aço de duas polegadas, schedule 40;
- Deverá possuir conexões flangeadas com vedações do tipo O’Ring;
- Deverá suportar pressões manométricas de até 20kgf/cm<sup>2</sup>;
- Deverá suportar temperaturas de até 60°C;
- Deverá ser projetado de maneira que conexões elétricas não fiquem expostas ao ambiente, pois o mesmo poderá ser utilizado para testes em campo em áreas classificadas com risco de explosão;
- Deverá possuir duas estações de medição para correlações de sinais;
- Deverá prever a instalação de sensores de efeito Doppler para medir a velocidade das fases. (As medições do efeito Doppler não fazem parte do escopo desta dissertação.)

Como o flange do carretel é de material termoplástico, optou-se por utilizar flanges do tipo face plana evitando momentos excessivos sobre os flanges que pudessem causar sua quebra. Outro cuidado tomado no projeto dos flanges foi a utilização de um anel de aço inox para trabalhar como arruela para as porcas de aperto dos parafusos de ligação, conforme apresentado na Figura A-1. Esse anel distribui a força gerada pelo torque de aperto das porcas por toda a área do flange termoplástico, o que diminui a pressão sobre o material.

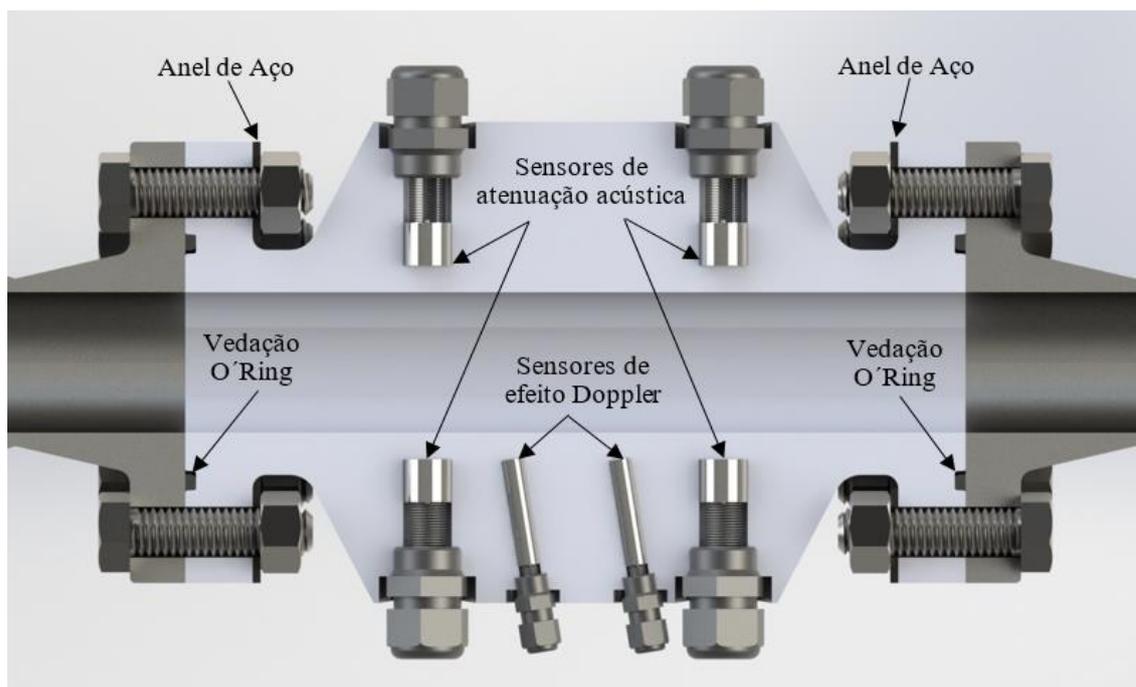


Figura A-1: Montagem do carretel ultrassônico entre flanges.

Para vedar a ligação entre os flanges, foram utilizados anéis de elastômeros conhecidos comercialmente como *O'Ring*. O *O'Ring* foi selecionado como sistema de vedação por exigir um aperto menor dos flanges, pois a própria pressão do fluido contra o anel é que faz a vedação. Outros sistemas usuais como papelão hidráulico e *Ring Joint* exigem um aperto considerável dos flanges, o que poderia causar a deformação permanente dos flanges termoplásticos. Na Figura A-2, é apresentado um desenho esquemático da vedação do tipo *O'Ring*.

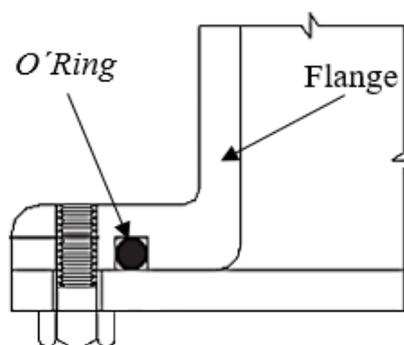


Figura A-2: Esquema de vedação por O'Ring.

Fonte: Parker (1997).

A determinação da espessura mínima necessária para parede do carretel a fim de suportar a pressão de operação foi feita pela análise das tensões atuantes sobre suas paredes. O carretel foi considerado como um elemento cilíndrico. Três tensões atuam sobre a parede de um elemento cilíndrico sobre pressão (Figura A-3):

- Tensões radiais;
- Tensões circunferenciais;
- Tensões longitudinais.

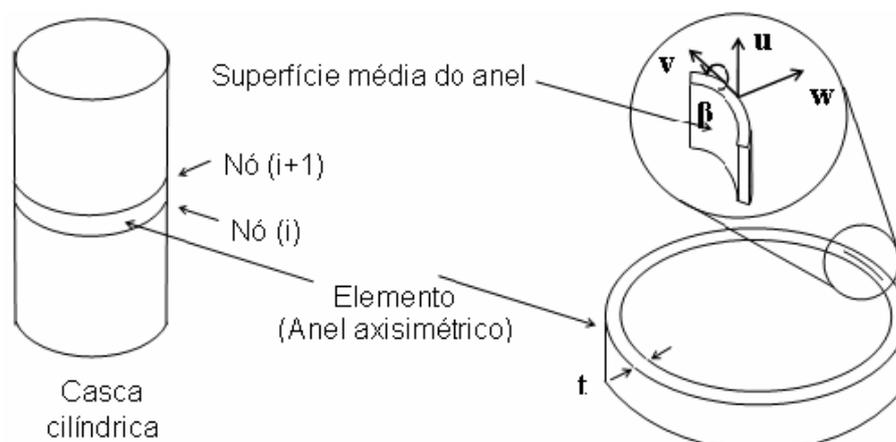


Figura A-3: Direção das tensões sobre a parede de um elemento cilíndrico devido à pressão.  
Fonte: Faluhelyi e Neto [71].

A tensão na direção radial é a própria pressão de projeto. Segundo Silva Telles [72], as tensões circunferenciais e longitudinais podem ser calculadas para cilindros delgados, ou seja, cilindros cujo diâmetro externo seja no mínimo seis vezes a espessura da parede ( $D > 6t$ ), conforme as Equações (A-1) e (A-2):

$$S_{ct} = \frac{Pd_m}{2t} \quad (\text{A-1})$$

$$S_l = \frac{Pd_m}{4t} \quad (\text{A-2})$$

É possível notar que a tensão circunferencial é duas vezes maior que a tensão longitudinal. Como a tensão radial é a própria pressão do fluido, ela será menor que as tensões circunferenciais e longitudinais. Dessa maneira, a tensão circunferencial foi utilizada como critério de dimensionamento. Logo, a espessura mínima para suportar a pressão de projeto deve ser calculada pela Equação (A-3):

$$t_{\min} = \frac{Pd_m}{2S_h} \quad (\text{A-3})$$

Com o objetivo de causar a menor perturbação no fluido quando ele entra no carretel, o diâmetro interno do carretel foi definido como sendo o diâmetro interno da tubulação de referência. Percebe-se então que a formulação para determinação da espessura mínima é iterativa, pois o diâmetro médio depende da espessura da tubulação. Sendo assim, foi escolhida a espessura mínima da parede do carretel em função do seu projeto construtivo. A partir desse valor calculou-se a espessura mínima exigida para suportar a pressão de projeto e esse valor foi comparado com a espessura escolhida. As dimensões da tubulação de referência são apresentadas na Tabela A-3.

Tabela A-3: Dimensões da tubulação de referência.

Diâmetro			t [mm]	Schedule
Nominal [pol.]	Externo [mm]	Interno [mm]		
2	60,32	52,5	3,91	40

O carretel foi projetado com diâmetro interno de 52,5mm e a espessura de parede de 10mm. Sendo assim, o diâmetro médio para o cálculo da espessura mínima foi de 62,5mm. Admitindo uma pressão máxima de operação de 20 kgf/cm<sup>2</sup> e sabendo que a tensão de escoamento da resina termoplástica ®DELRIN 100PNC010 à temperatura de 60°C é de 40MPa, foi possível calcular o valor de 1,56 mm para a espessura mínima admissível para parede do carretel. Verificou-se então que a espessura usada na parede do carretel foi cerca de seis vezes maior que a espessura mínima requerida pela pressão máxima de projeto. Verificou-se também que a relação para validade da fórmula ( $D > 6t$ ) foi atendida, pois o diâmetro é 6,25 vezes maior que a espessura mínima adotada.

Atendendo ao requisito de isolar as conexões elétricas do ambiente externo, foram utilizados prensa-cabos à prova de explosão. Foram selecionados prensa-cabos do fabricante *Hummel*® com especificação *HSK-K-Ex M25x1.5*.

O projeto do carretel ultrassônico seguiu a distribuição espacial dos transdutores proposta por Carvalho [48], utilizando o sensor posicionado em 0° como sendo o emissor de pulsos ultrassônicos e receptor ao mesmo tempo. Os outros três transdutores foram posicionados a 45°, 135° e 180° do pulsador-receptor conforme apresentado na Figura A-4.

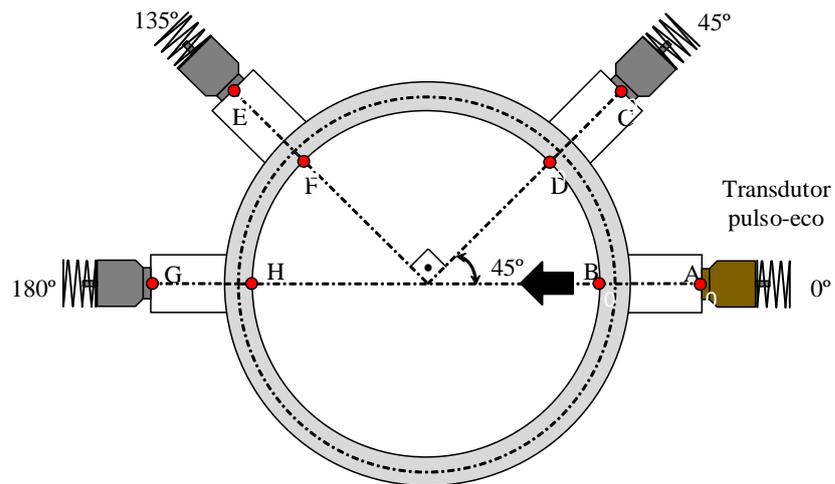


Figura A-4: Distribuição espacial dos transdutores ultrassônicos.

Atendidas todas as premissas de projeto, fez-se então o projeto do carretel ultrassônico (Figura A-7). Na Figura A-5, é apresentado o projeto tridimensional do carretel, feito para a verificação de interferências e análise do conjunto projetado. A Figura A-6 mostra o carretel depois de fabricado.

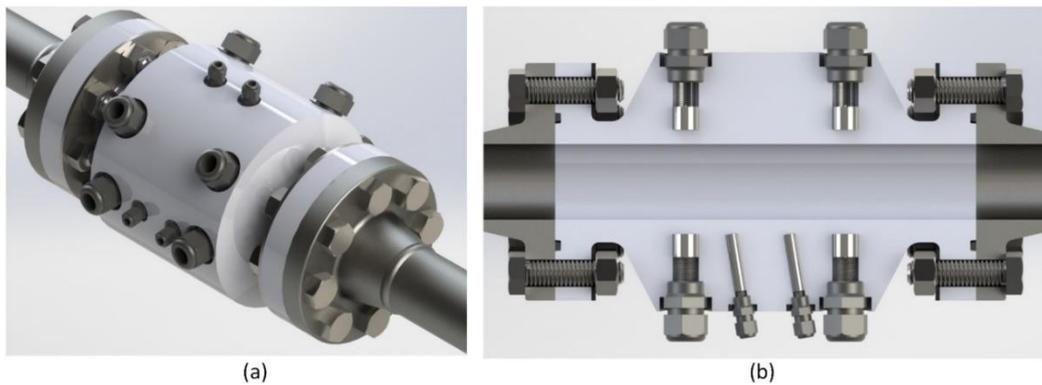


Figura A-5: Modelo tridimensional do carretel ultrassônico (a) isométrico (b) corte.

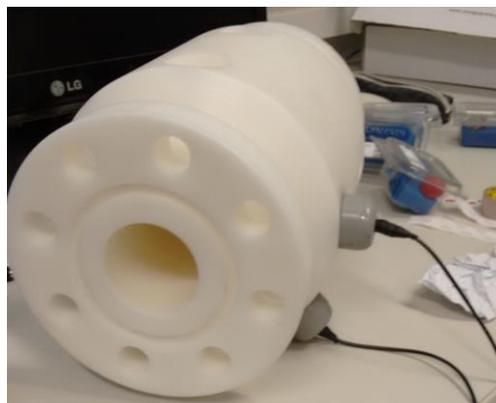


Figura A-6: Carretel ultrassônico depois de usinado.

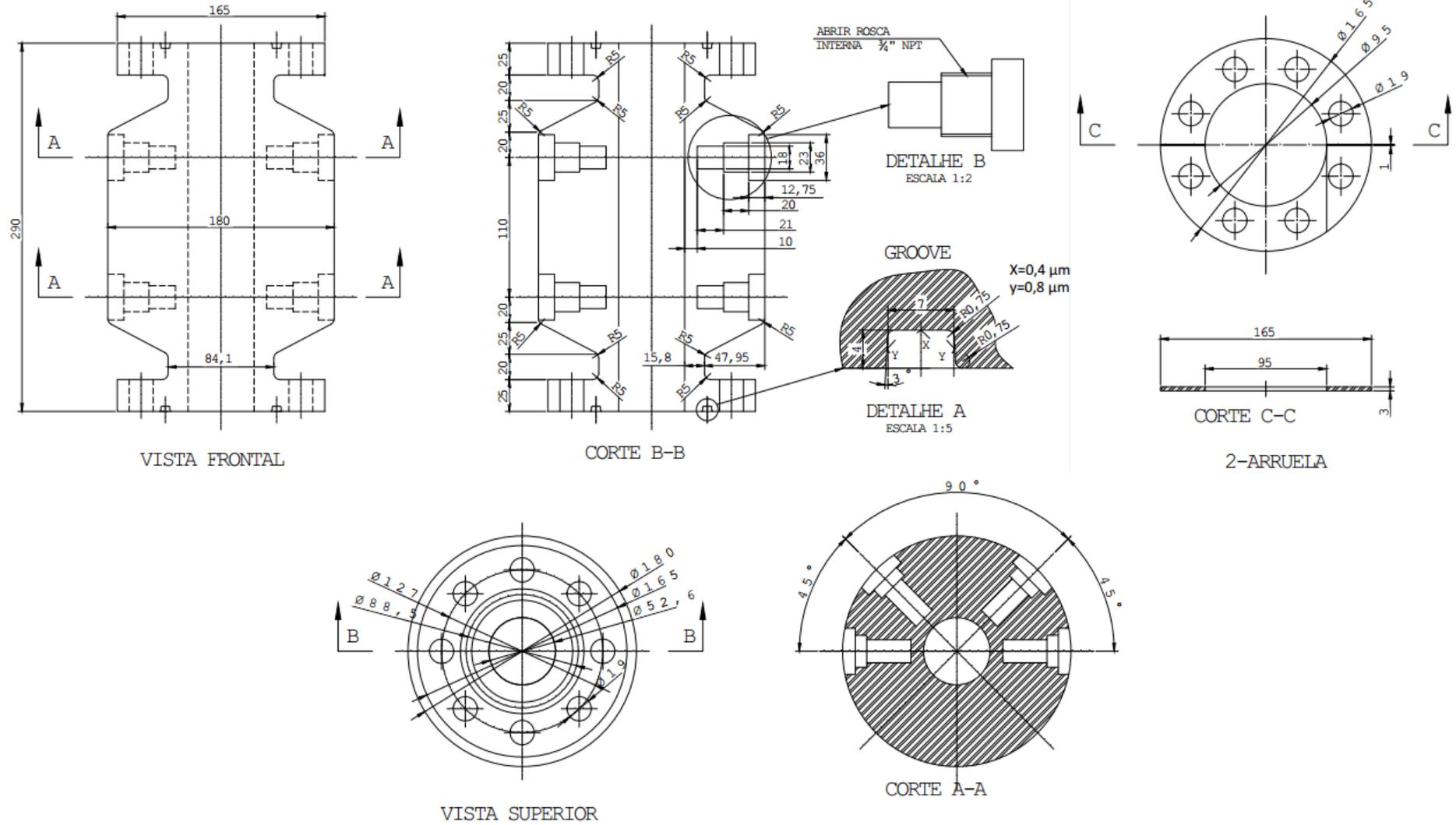


Figura A-7: Projeto de fabricação do carretel ultrassônico.

## Anexo B

### MÉTODO DE TRATAMENTO DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS

Os sinais acústicos captados pelo aparato ultrassônico são constituídos por ondas longitudinais e de cisalhamento e por ruído de fundo. No entanto, nem todas as ondas carregam informações significativas sobre o fluxo multifásico. Fez-se então necessário identificar as ondas relevantes para a medição multifásica.

A Tabela B-1 mostra os cálculos dos tempos de trânsito esperados para os caminhos acústicos correspondentes na tubulação de duas polegadas. Os pontos de **A** a **H** são mostrados na Figura B-1. As velocidades longitudinal e transversal da onda acústica no acrílico utilizadas nestes cálculos foram 2.730 e 1.430 m/s (Olympus [41]), respectivamente. A velocidade de propagação da onda longitudinal no óleo mineral utilizada foi 1.422 m/s conforme medida por Gonçalves [21].

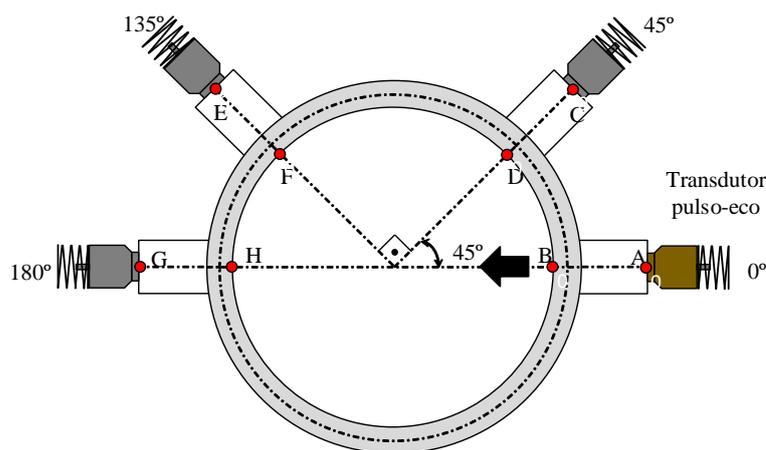


Figura B-1: Disposição espacial dos transdutores e indicação dos caminhos acústicos.

O caminho acústico A-B-H-G se refere à onda longitudinal LW1 que é transmitida do transdutor emissor-receptor a 0° e recebida pelo receptor a 180° conforme mostrado na Figura B-2. Pode-se observar que o tempo de trânsito de 56,3  $\mu$ s calculado na tabela é coerente com o instante, verificado experimentalmente, em que a onda começa a chegar neste sensor.

Carvalho *et al.* [48] verificou que a duração do pulso ultrassônico, o intervalo de tempo entre o momento em que a onda acústica começa a atingir o receptor e o momento em que ela se dissipa totalmente, permaneceu constante independente do aumento da FVG. Isto possibilitou estabelecer limites claros para a recepção de ondas em todos os testes com este aparato ultrassônico.

A onda longitudinal, após atingir o ponto H, gera a onda transversal SW2 que atinge o sensor a  $180^\circ$  um pouco depois da LW1. Tanto a LW1 quanto a SW2 transportam informações sobre o escoamento multifásico. O retângulo em vermelho na Figura B-2 indica a janela de atividade para o tratamento dos dados adquiridos neste sensor. Por janela de atividade, entende-se a porção útil dos sinais no que se refere à medição multifásica. Fora desta janela de atividade, existe somente ruído de fundo e os dados correspondentes são descartados.

O caminho acústico A-B-H-B-A se refere à onda longitudinal LW1, que é refletida na interface acrílico-óleo no ponto H e é transmitida de volta para o emissor a  $0^\circ$  (Figura B-3). Novamente, o tempo de trânsito de  $96,5 \mu\text{s}$  calculado na tabela concorda com o instante em que esta onda começa a chegar neste sensor. No caminho da volta, quando essa onda atinge a interface B, gera-se uma onda transversal SW1 que atinge o sensor a  $0^\circ$  logo após LW1. Portanto, LW1 e SW1 transportam informações importantes sobre o escoamento multifásico e devem ser incluídas na janela de atividade para tratamento dos dados.

No entanto, para o sensor a  $0^\circ$ , as reflexões aleatórias nas interfaces dos escoamentos multifásicos também devem ser computadas. Apesar de não ser possível determinar o instante preciso para que as reflexões ocorram, elas somente podem ocorrer quando a onda está atravessando o escoamento. Isto ocorre durante o percurso da onda a partir da primeira interface acrílico-óleo, ponto B, até a interface H e de volta para o ponto B. Sendo assim, o tempo de trânsito correspondente às reflexões aleatórias do pulso ultrassônico estará dentro da faixa de  $20,5$  a  $96,5 \mu\text{s}$ , que corresponde ao caminho A-B-?-B-A da tabela. Logo, a janela de atividade para o sensor a  $0^\circ$  foi estendida para abarcar as reflexões aleatórias como indica o retângulo vermelho da Figura B-3. Próximo a este retângulo, pode ser visto a marcação do pulso emitido ( $t = 0 \mu\text{s}$ ) e LW2, a porção da onda longitudinal gerada em A e refletida no B, voltando para o ponto A. Como LW2 nunca atravessa o fluxo, ela foi excluída da janela de atividade para tratamento dos dados.

Os caminhos acústicos A-B-?-D-C e A-B-?-F-E representam caminhos para as porções da onda longitudinal LW1 que foi refletida para os transdutores laterais devido à presença de heterogeneidades no escoamento. Novamente, nenhum caminho específico ou tempo de trânsito pode ser associado a estes eventos porque as heterogeneidades são distribuídas aleatoriamente na seção transversal da tubulação. Logo, utilizou-se inicialmente a mesma janela de atividade do sensor a  $0^\circ$  para os sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$ . A partir da observação experimental

de quais regiões da janela de aquisição eram sensíveis a variação de FVG, fez-se um pequeno ajuste nessas janelas conforme mostrado na Figura B-4e Figura B-5.

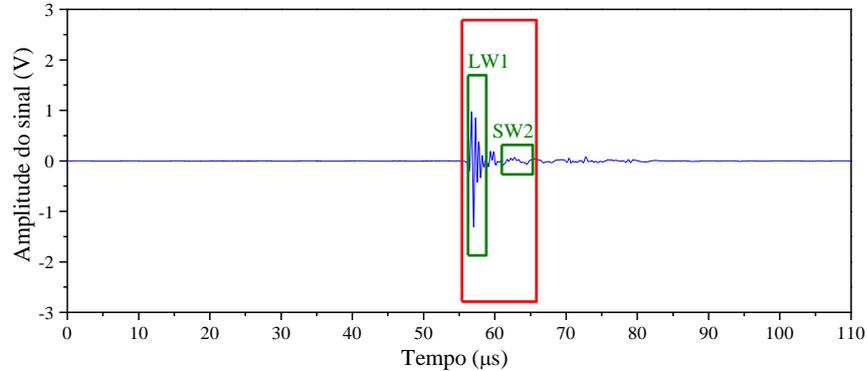


Figura B-2: Janela de atividade para o tratamento dos sinais adquiridos no sensor a 180° na tubulação de duas polegadas (escoamento óleo-ar com 2% de FVG).

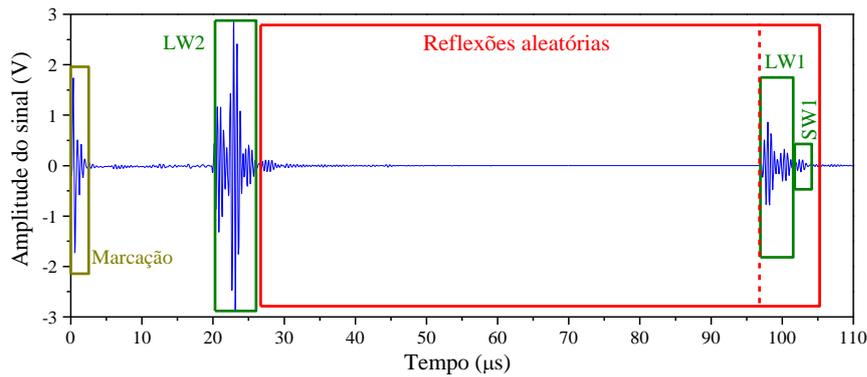


Figura B-3: Janela de atividade para o tratamento dos sinais adquiridos no sensor a 0° na tubulação de duas polegadas (escoamento óleo-ar com 2% de FVG).

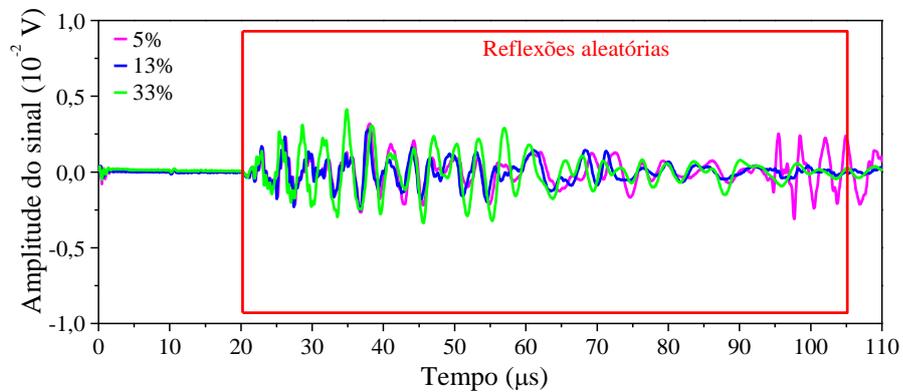


Figura B-4: Janela de atividade para o tratamento dos sinais adquiridos no sensor a 45° na tubulação de duas polegadas (escoamento óleo-ar com diferentes valores de FVG).

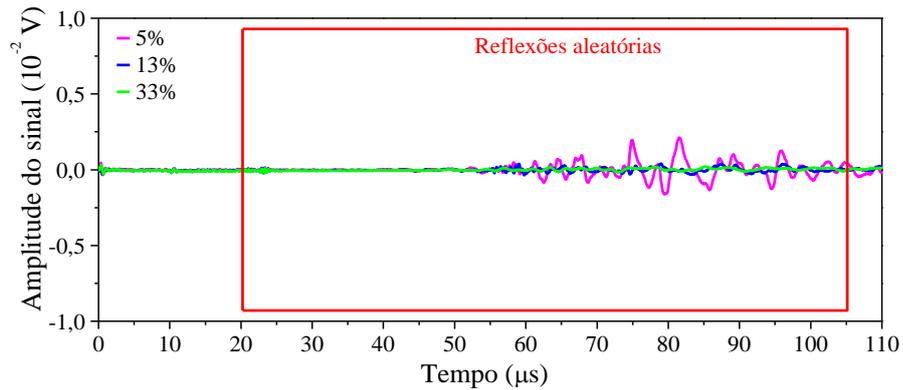


Figura B-5: Janela de atividade para o tratamento dos sinais adquiridos no sensor a  $135^\circ$  na tubulação de duas polegadas (escoamento óleo-ar com diferentes valores de FVG).

A energia transportada por cada pulso ultrassônico, quando este é recebido pelo transdutor, foi calculada a partir da integração do quadrado do sinal da voltagem no tempo. A razão de energia para qualquer transdutor foi definida como a energia carregada por um pulso individual dividida pela energia carregada pelo sinal de referência, isto é, a energia máxima a ser recebida por aquele mesmo transdutor. Para o transdutor a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , a energia máxima é recebida quando a tubulação é preenchida apenas com a fase contínua. A razão de energia foi calculada pela Equação (B-1):

$$\frac{E_{n\phi}}{E_{1\phi}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (V_{multifásico})^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} (V_{monofásico})^2 dt} \quad (\text{B-1})$$

Normalizando a razão de energia com o sinal da fase contínua, o efeito da dissipação intrínseca da onda transmitida é removido da tendência dos dados. Isto permite aplicar o procedimento desenvolvido a outros fluidos como fase contínua.

Para os sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$ , não existe energia refletida quando a tubulação é preenchida somente com a fase contínua. Neste caso, o denominador da equação acima foi substituído com a condição onde ocorreu o máximo nas reflexões laterais no escoamento bifásico óleo-ar. Essa condição, que foi experimentalmente verificada, ocorreu aproximadamente em 28% de FVG.

Tabela B-1: Caminhos acústicos e tempos de trânsito para as ondas na tubulação de acrílico de duas polegadas usando óleo mineral como fase contínua.

Onda Acústica	Caminho acústico	Comprimento do caminho acústico			Tempo de trânsito		Tempo de trânsito total	Transdutor	Observações
		Acrílico (mm)		Óleo (mm)	Acrílico (µs)	Óleo (µs)			
		LW	SW	LW					
LW1	A-B-H-B-A	56,0	0,0	108,0	20,5	75,9	96,5	0°	Onda longitudinal gerada em A que se propaga no escoamento bifásico.
	A-B-?-B-A	56,0	0,0	~	20,5	~	20,5 < t < 96,5	0°	
	A-B-?-D-C	50,0	1,0	~	19,0	~	20,5 < t < 96,5	45°	
	A-B-?-F-E	50,0	0,0	~	18,3	~	20,5 < t < 96,5	135°	
	A-B-H-G	50,0	0,0	54,0	18,3	38,0	56,3	180°	
LW2	A-B-A	56,0	0,0	0,0	20,5	0,0	20,5	0°	Onda longitudinal gerada em A que se propaga no acrílico somente.
SW1	A-B-H-B-A	28,0	28,0	108,0	29,8	75,9	105,8	0°	Onda de cisalhamento gerada em B que se propaga no acrílico somente.
SW2	A-B-H-G	28,0	22,0	54,0	25,6	38,0	63,6	180°	Onda longitudinal gerada em H da LW1; ela se propaga no acrílico somente.