

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Desenvolvimento da Técnica de Ultrassom  
para Medição da Fração de Vazio e Detecção  
do Padrão de Escoamentos Água-Ar**

**Autor: Enio Ito Tanahashi  
Orientador: Prof. Ricardo Dias Martins de Carvalho  
Co-orientador: Prof. Osvaldo José Venturini**

Itajubá, março de 2010

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Desenvolvimento da Técnica de Ultrassom  
para Medição da Fração de Vazio e Detecção  
do Padrão de Escoamentos Água-Ar**

**Autor: Enio Ito Tanahashi**

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

**Co-orientador: Prof. Osvaldo José Venturini**

**Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Conversão de Energia**

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

Itajubá, março de 2010  
MG – Brasil

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Desenvolvimento da Técnica de Ultrassom  
para Medição da Fração de Vazio e Detecção  
do Padrão de Escoamentos Água-Ar**

**Autor: Enio Ito Tanahashi**

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

**Co-orientador: Osvaldo José Venturini**

Composição da Banca Examinadora:

**Dr. Valdir Estevam - PETROBRAS**

**Prof. Flávio Neves Júnior - CPGEI/UTFPR**

**Prof. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales - LACIT/UTFPR**

**Prof. Osvaldo José Venturini - IEM/NEST/UNIFEI**

**Prof. Ricardo Dias Martins de Carvalho - IEM/UNIFEI**

# AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador prof. Ricardo Dias Martins de Carvalho por toda ajuda, dedicação, e oportunidades concedidas sempre visando o melhor de tudo e de todos.

Ao co-orientador prof. Osvaldo José Venturini por todo suporte oferecido.

A todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante todo esse tempo, família, amigos da faculdade e república, amigos da minha cidade e namorada.

As pessoas que tive a oportunidade de conhecer e trabalhar junto ao longo destes anos, pessoal do LASCA (UTFPR), do LabPetro (UNICAMP), do Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (UNIFEI).

A todos da equipe executora do projeto "Técnicas Ultrassônicas para Medição de Fração de Vazio e Concentração de Particulados em Escoamentos Multifásicos". UTFPR representada pelo prof. Flávio Neves Júnior, UNICAMP representada pelo prof. Fernando de Almeida França e UNIFEI representada pelos profs. Ricardo Dias Martins de Carvalho e Osvaldo José Venturini. Agradeço também a FINEP e Petrobras pelo apoio financeiro.

# RESUMO

**TANAHASHI, E. I. (2010)**, *Desenvolvimento da Técnica de Ultrassom para Medição da Fração de Vazio e Detecção do Padrão de escoamentos Água-Ar*, Itajubá, 81p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Escoamentos multifásicos são muito comuns na indústria petrolífera, normalmente envolvendo ambientes hostis e fluidos com particulados. Por esta razão, existe um grande interesse no estudo de técnicas não invasivas e de resposta rápida para medição das parcelas das fases dispersas; além disso, informações da estrutura do escoamento são essenciais para classificar para analisar os processos de transporte envolvidos. A técnica ultrassônica preenche estes requisitos e parece ser capaz de prover toda a informação necessária. Neste trabalho, o potencial da técnica ultrassônica para aplicação em escoamento bifásicos foi estudado pela comparação de dados de atenuação acústica com dados experimentais da fração de vazio e topologia de escoamentos bifásicos água-ar, verticais e ascendentes na faixa de 0 a 15% de fração de vazio. O aparato ultrassônico consistia em um transdutor emissor/receptor e outros três receptores posicionados ao longo da circunferência da tubulação; filmagens foram feitas simultaneamente ao ultrassom à velocidades de 250 e 1000 fps. A atenuação exibida por todos os sensores apresentou uma correlação sistemática com a fração de vazio, o que confirma a capacidade da técnica ultrassônica para medir as parcelas das fases dispersas. Das filmagens realizadas, estruturas gasosas básicas e padrões de escoamentos diferentes foram identificados em função da fração de vazio e correlacionadas com os dados de ultrassom. Finalmente, o tempo de trânsito da onda sonora também foi investigado em função da fração de vazio.

**Palavras-chave:** técnica ultrassônica; filmes de alta velocidade; escoamento borbulhante água-ar; fração de vazio; padrões de escoamento; tempo de trânsito.

# ABSTRACT

**TANAHASHI, E. I. (2010)**, *Development of the Ultrasonic Technique for Void Fraction Measurement and Flow Pattern Detection in Air-Water Flows*, Itajubá, 81p. MSc. Dissertation - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Multiphase flows are very common in industry, oftentimes involving very harsh environments and fluids. Accordingly, there is a need to determine the dispersed phase holdup using noninvasive fast responding techniques; besides, knowledge of the flow structure is essential for the assessment of the transport processes involved. The ultrasonic technique fulfills these requirements and could have the capability to provide the information required. In the present research project, the potential of the ultrasonic technique for application to two-phase flows was investigated by checking acoustic attenuation data against experimental data on the void fraction and flow topology of vertical, upward, air-water bubbly flows in the zero to 15% void fraction range. The ultrasonic apparatus consisted of one emitter/receiver transducer and three other receivers at different positions along the pipe circumference; simultaneous high-speed motion pictures of the flow patterns were made at 250 and 1000 fps. The attenuation data for all sensors exhibited a systematic interrelated behavior with void fraction, thereby testifying to the capability of the ultrasonic technique to measure the dispersed phase holdup. From the motion pictures, basic gas phase structures and different flows patterns were identified that corroborated several features of the acoustic attenuation data. Finally, the acoustic wave transit time was also investigated as a function of void fraction.

**Keywords:** ultrasonic technique; high-speed filming; air-water bubbly flow; void fraction; flow patterns; transit time.

# SUMÁRIO

SUMÁRIO .....	I
LISTA DE FIGURAS .....	II
LISTA DE TABELAS .....	IV
NOMENCLATURA .....	V
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
1.2 ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA.....	4
1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO .....	5
<b>2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTO DE MEDIDA .....</b>	<b>6</b>
2.1 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	6
2.1.1 <i>Circuito bifásico água-ar</i> .....	6
2.1.2 <i>Instrumentação ultrassônica</i> .....	8
2.1.3 <i>Instrumentação de filmagem rápida</i> .....	12
2.2 PROCEDIMENTO DE MEDIDA .....	12
2.2.1 <i>Procedimento de operação do circuito bifásico</i> .....	12
2.2.2 <i>Procedimento de tomada de dados de ultrassom</i> .....	15
2.2.3 <i>Procedimento de filmagem rápida</i> .....	17
<b>3 ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>19</b>
3.1 SUB-REGIMES DO ESCOAMENTO BORBULHANTE .....	19
3.2 FILTRAGEM DOS SINAIS NOS DOMÍNIOS DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA .....	20
3.2.1 <i>Tempos de trânsito dos componentes da onda acústica</i> .....	21
3.2.2 <i>Filtragem no domínio do tempo do sinal ultrassônico do receptor a 180°</i> .....	27
3.2.3 <i>Filtragem no domínio do tempo dos sinais ultrassônicos dos receptores a 0°, 45° e 135°</i> .....	28
3.2.4 <i>Filtragem no domínio da frequência</i> .....	30
3.3 ATENUAÇÃO ACÚSTICA EM FUNÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIO .....	32
3.3.1 <i>Análise do sinal ultrassônico em transmissão direta (sensor a 180°)</i> .....	32
3.3.2 <i>Análise dos sinais ultrassônicos dos receptores a 0°, 45° e 135°</i> .....	37
3.4 ANÁLISE DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS SINCRONIZADOS COM AS FILMAGENS RÁPIDAS.....	43
3.4.1 <i>Sinal do receptor a 180° sincronizado com as filmagens rápidas</i> .....	43
3.4.2 <i>Sinal dos receptores a 0°, 135° e 180° e as filmagens rápidas</i> .....	50
3.4.3 <i>Sinais dos receptores a 45° e 180° e as filmagens rápidas</i> .....	56
3.4.4 <i>Identificação instantânea do padrão de escoamento a partir dos dados acústicos</i> .....	57
3.5 ENERGIA PONDERADA PELO TEMPO DE TRÂNSITO.....	59
3.6 ATENUAÇÃO EM BANDA LARGA (BUA).....	62
CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	68

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Circuito de teste de escoamento bifásico água-ar. ....	8
Figura 2: Desenho esquemático do aparato ultrassônico. ....	9
Figura 3: Sensores de ultrassom. ....	10
Figura 4: Foto da placa de aquisição e interfaces. ....	11
Figura 5: Câmera de alta velocidade. ....	12
Figura 6: Equipamento de iluminação a base de LEDs. ....	12
Figura 7: Medidas nas linhas de líquido e gás. ....	13
Figura 8: Medidas na seção de teste. ....	13
Figura 9: Cálculo dos valores absolutos de temperatura e pressão do escoamento de ar. ....	14
Figura 10: Cálculo das vazões volumétricas. ....	14
Figura 11: Cálculos das velocidades superficiais do ar e água e da fração de vazio. ....	14
Figura 12: Seção de filmagem. ....	18
Figura 13: Divisão dos sub-regimes e imagens dos principais padrões de escoamento. ....	20
Figura 14: Identificação das ondas acústicas para o sensor a $0^\circ$ . ....	23
Figura 15: Identificação das ondas acústicas para o sensor a $45^\circ$ . ....	24
Figura 16: Identificação das ondas acústicas para o sensor a $135^\circ$ . ....	24
Figura 17: Identificação das ondas acústicas para o sensor a $180^\circ$ . ....	24
Figura 18: Pulsos superpostos das amostras (a) sensor pulso-eco ( $0^\circ$ ) e (b) sensor a $45^\circ$ . ....	25
Figura 19: Pulsos superpostos das amostras (a) sensor a $135^\circ$ e (b) sensor a $180^\circ$ . ....	26
Figura 20: Janela de atividade do sensor a $180^\circ$ . ....	27
Figura 21: Janela de atividade do sensor a $0^\circ$ . ....	28
Figura 22: Janela de atividade do sensor a $45^\circ$ . ....	29
Figura 23: Janela de atividade do sensor a $135^\circ$ . ....	29
Figura 24: Pulso recebido pelo sensor a $180^\circ$ no domínio do tempo. ....	30
Figura 25: Espectro de frequência médio do pulso recebido pelo sensor a $180^\circ$ . ....	31
Figura 26: Sinal filtrado do sensor a $180^\circ$ no domínio do tempo. ....	31
Figura 27: Sinal típico recebido pelo sensor em transmissão direta ( $180^\circ$ ). ....	33
Figura 28: Sinal médio da onda recebida pelo sensor a $180^\circ$ para $\alpha=2\%$ e $\alpha=8\%$ . ....	33
Figura 29: Razões de energia e amplitude em função da fração de vazio. ....	35
Figura 30: Razão de energia em função da área interfacial e razão de energia. ....	36
Figura 31: Razão de energia em função da fração de vazio para todas as séries de dados. ....	37
Figura 32: Pulsos superpostos de uma amostra dos sensores $0^\circ$ , $45^\circ$ e $135^\circ$ . ....	38
Figura 33: Razão de energia em função da fração de vazio para o pulso-eco ( $0^\circ$ ). ....	39
Figura 34: Razão de energia em função da fração de vazio para o sensor a $45^\circ$ (série nº 4). ....	40
Figura 35: Razão de energia em função da fração de vazio (sensor a $135^\circ$ séries nº 4, 5 e 6). ....	40
Figura 36: Razão de energia em função da fração de vazio para todos os sensores. ....	42
Figura 37: Energia absoluta em função da fração de vazio para todos os sensores. ....	42
Figura 38: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série nº 3, $\alpha=1\%$ ). ..	44

Figura 39: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série nº 3, $\alpha=4\%$ ). ..	45
Figura 40: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série nº 3, $\alpha=8\%$ ). ..	46
Figura 41: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série nº 3, $\alpha=10\%$ ). ..	46
Figura 42: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série nº 3, $\alpha=12\%$ ). ..	47
Figura 43: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série nº 3, $\alpha=15\%$ ). ..	48
Figura 44: Histogramas da frequência em função da razão de energia instantânea para algumas frações de vazão da série nº 3. ....	49
Figura 45: Sinais traçados para os sensores a $0^\circ$ e $180^\circ$ da série nº 6. ....	51
Figura 46: Sinal acústico e imagens correspondentes (série nº 6, $\alpha = 18\%$ ). ....	52
Figura 47: Sinal acústico e imagens correspondentes (série nº 6, $\alpha = 20\%$ ). ....	52
Figura 48: Sinais traçados para os sensores a $135^\circ$ e $180^\circ$ da série nº 6. ....	54
Figura 49: Sinal acústico e imagens correspondentes (série nº 6, $\alpha = 18\%$ ). ....	55
Figura 50: Sinal acústico e imagens correspondentes (série nº 6, $\alpha = 20\%$ ). ....	55
Figura 51: Sinais traçados para os sensores a $45^\circ$ e $180^\circ$ da série nº 4. ....	56
Figura 52: Tempos inicial e total em função da fração de vazão (sensor a $180^\circ$ série nº 1). ....	60
Figura 53: Tempo de trânsito médio ponderado em função da fração de vazão (sensor a $180^\circ$ série nº 1). ....	61
Figura 54: Pulsos médios de cada condição de operação. ....	64
Figura 55: Espectro de frequência das médias de todas as condições de operação. ....	64
Figura 56: Região onde a atenuação em função da frequência é quase linear para todas as condições de operação. ....	65
Figura 57: nBua em função da fração de vazão. ....	66

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Imagens do circuito de testes.....	7
Tabela 2: Especificações dos transdutores. ....	10
Tabela 3: Parâmetros de aquisição das séries de dados experimentais. ....	16
Tabela 4: Caminhos acústicos e tempos de trânsito. ....	22
Tabela 5: Faixas de razão de energia associados a padrões típicos de escoamento. ....	58
Tabela 6: Valores da nBUA.....	66

# NOMENCLATURA

$\alpha$	fração de vazio.	[%]
$j_{ar}$	velocidade do ar.	[cm/s]
$j_{água}$	velocidade da água.	[cm/s]
$E$	energia total que chega no receptor.	[J]
$I$	intensidade do sinal.	[V]
$\frac{E_{2\phi}}{E_{1\phi}}$	razão de energia.	[-]
$dt$	diferencial de tempo.	[s]
$\Delta t_{total}$	intervalo de tempo total entre o disparo até a onda ultrassônica ser recebida pelo receptor.	[s]
$\Delta t_{inicial}$	intervalo de tempo entre o disparo até a onda ultrassônica atingir o receptor.	[s]
$t$	tempo.	[s]
$dE$	diferencial de energia.	[J]
$\frac{\int_{E_1}^{E_2} t dE}{E_{total}}$	tempo ponderado pela energia.	[s]
$\alpha(f)$	atenuação do sinal de ultrassom em função da frequência.	[dB]
$ V_{ref}(f) $	módulo do espectro do sinal de referência no domínio da frequência.	[dB]
$ V(f) $	módulo do espectro do sinal no meio em estudo no domínio da frequência.	[dB]
$A$	coeficiente angular da reta (BUA)	[dB/Hz]
$Co$	parâmetro de distribuição para cálculo da fração de vazio média.	[-]
$v_{gj}$	velocidade de deslocamento média ponderada.	[cm/s]
$Q$	vazão volumétrica.	[m <sup>3</sup> /s]
$\acute{A}rea$	área da tubulação.	[m <sup>2</sup> ]

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos já foram realizados na tentativa de se desenvolver ou aplicar uma técnica capaz de suprir as necessidades das indústrias no que diz respeito aos escoamentos multifásicos. Powell (1) apresentou uma revisão sobre métodos de medição não invasivos para medição de diversos parâmetros de sistemas multifásicos, especialmente concentração da fase dispersa e campo de velocidades. O foco principal era em técnicas que poderiam ser aplicadas imediatamente em casos reais. A técnica MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) foi apontada como sendo a técnica mais versátil entre aquelas estudadas, pois ela era capaz de fornecer medidas para uma ampla faixa de concentração, velocidade, constituintes químicos, e difusão. Entretanto, além do equipamento ser muito caro, este não pode ser transportado para qualquer lugar e necessita de mão de obra muito especializada para sua operação. Radiografia por raioX também foi utilizada em alguns estudos de sistemas multifásicos; o mesmo para a radiografia por nêutrons, utilizada somente para estudo de sistemas multifásicos envolvendo metais líquidos. Em ambos os casos, as imagens obtidas representavam a projeção tridimensional de um objeto no plano, o que constitui uma limitação para as técnicas, além de ambas apresentarem grande complexidade de operação. EIT (*Electrical Impedance Tomography*) é uma tecnologia recente que vem sendo usada para estudar a distribuição da concentração de particulados na tubulação, apesar da facilidade de operação, a técnica necessita de muito processamento e análise extensiva dos dados adquiridos. Jaworek *et al.* (2) apresentaram um sistema simples de capacitância para medição da fração de vazio.

O ultrassom é uma técnica já estabelecida em áreas como medicina e detecção de falhas em materiais sólidos. Transdutores e outros equipamentos necessários estão disponíveis comercialmente e a relativo baixo custo; esses sistemas também são compactos e muito resistentes. O uso do ultrassom em aplicações envolvendo sistemas multifásicos tem sido alvo de diversas pesquisas [(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)(11)(12)(13)], o que confirma seu potencial. O sinal ultrassônico consegue penetrar em tubos, tanques, paredes de câmaras e se propagar através de fluidos opacos e com particulados. Outra vantagem, o sinal não se degrada ao longo de uma longa faixa de condições de processos e pode ser monitorado em tempo real e in loco (3). A desvantagem do ultrassom é a necessidade de aferição para correlação entre os

níveis de atenuação do sinal e concentração das fases dispersas. Os principais parâmetros acústicos utilizados no monitoramento, controle, e medição de processos multifásicos são intensidade da pressão, atenuação da energia e tempo de trânsito. As alterações no sinal ocorrem devido aos efeitos combinados da atenuação do sinal e os fenômenos de reflexão, refração, espalhamento do feixe acústico, estas alterações, por sua vez, dependem da concentração e a distribuição do tamanho das fases dispersas (bolhas, gotas de óleo ou partículas sólidas). Por fim, o sinal resultante do escoamento multifásico normalmente é comparado com um sinal de referência. Essa referência geralmente é o sinal na fase contínua, escoamento monofásico, a mesma temperatura.

A técnica denominada UCT (*Ultrasound Computerized Tomography*) vem sendo estudada por muitos pesquisadores desde o começo dos anos 80 para visualização da distribuição do escoamento bifásico líquido/gás ao longo da seção transversal da tubulação. Warsito *et al.* (11) fizeram uma revisão das técnicas não invasivas para monitoramento de escoamentos borbulhantes gás-líquido. O UCT foi dito como uma técnica mais apropriada para aplicação em meios com pouca penetração de luz ou outra radiação eletromagnética; isto seria o caso de meios homogêneos e de alta densidade. Entretanto, duas limitações desta técnica se opõem a sua utilização em aplicações onde o desempenho em tempo real é essencial (11). O complexo campo acústico provocado pelos transdutores gera erro devido à superposição ou múltiplas reflexões dos sinais e a propagação lenta do ultrassom reduz a velocidade de varredura. Outra dificuldade apresentada em (14) é o mau acoplamento entre as impedâncias acústicas das fases, por exemplo em escoamentos água-ar. Apesar destas dificuldades, Warsito *et al.* (11) usaram o UCT para medir o distribuição ao longo da seção transversal de uma coluna de mistura de água, bolhas e particular sólidas. Xu e Xu (15) e Xu *et al.* (14) foram capazes de reconstruir com sucesso a distribuição simulada e real de escoamentos bifásico líquido-gás ao longo da seção transversal de uma tubulação utilizando a técnica. A montagem experimental era complexa e o diâmetro da menor bolha na imagem reconstruída correspondia a 0,6% da área da tubulação, mas a resolução espacial não era uniforme ao longo da seção transversal.

Aparatos mais simples envolvendo ultrassom para caracterização de padrões de escoamento horizontais líquido-gás e medição da espessura de filme líquido e características das interfaces são discutidos em (16) e (17). A técnica ultrassônica também tem sido utilizada para medir a concentração das fases dispersas em escoamentos bifásicos e trifásicos – óleo-ar; óleo-esferas de vidro; e óleo-esferas de vidro-ar [(13) e (9)]. Em (13) foi observado uma queda exponencial na intensidade do sinal recebido com o aumento da área interfacial de ambas as fases dispersas, sólido e gás. Um aumento no tempo de trânsito foi apontado como

consequência da presença de bolhas de ar. Além de confirmar as observações feitas em (13), Vatanakul *et al.* (9) verificaram que flutuações no tempo de trânsito e na amplitude do sinal aumentaram com o aumento da concentração volumétrica de gás. Wada *et al.* (10) utilizaram o modo pulso-eco do ultrassom para identificar padrões do escoamento água-ar – borbulhante, pistonado, ou anular – em tubulação verticais de Plexiglas e aço carbono; a distinção entre cada padrão foi feita analisando-se o atraso no tempo de trânsito e a intensidade de energia da onda sonora no modo pulso-eco. Os autores conseguiram com sucesso determinar o perfil da fase gasosa na seção transversal e o padrão de escoamento; entretanto, não se tentou correlacionar a fração de vazio com os dados ultrassônicos.

Por muitos anos, técnicas visuais têm sido uma ferramenta importante para o estudo da estrutura de escoamentos bifásicos. Avanços na tecnologia desse tipo de equipamento, especialmente filmadoras digitais de alta velocidade e a relativo baixo custo, fazem com que esta técnica seja bastante utilizada.

A utilização de imagens digitais foi feita em (18) para estudar o fator de forma e a razão de aspecto de bolhas em leitos fluidizados gás-sólido em função da velocidade do gás. Apesar do tratamento para delinear as interfaces bolha-sólido ser exaustivo e de interpretação subjetiva, os autores alegam que o estudo validou a filmadora CCD (*Charge-Coupled Device*) como uma importante ferramenta na investigação do comportamento bidimensional de leitos fluidizados. A câmera digital CCD foi utilizada em (19) para analisar a hidrodinâmica de leitos fluidizados borbulhantes bidimensionais. O método desenvolvido permitiu a medição simultânea da velocidade e do tamanho e distribuição axial e radial das bolhas gasosas. Estes autores afirmaram ainda que este método permitia uma melhor estimativa dos parâmetros do escoamento do que os métodos de sonda local.

Em (20) foi utilizada outra técnica visual para estudar o escoamento de um sistema líquido-gás, o PIV (*Particle Image Velocimetry*). Como discutido pelos autores, quantificar as medidas visuais se tornou mais fácil com o auxílio das filmadoras digitais e análise automática das imagens; entretanto, ainda existe uma forte dependência da qualidade das imagens com relação à iluminação do local. Pinsovschi *et al.* (21) determinaram a quantidade de gás em uma coluna água-ar borbulhante utilizando um método fotográfico que foi considerado uma simplificação do PIV. Embora seja demorado e limitado a baixas frações de vazio, o método apresentado é de baixo custo e os resultados concordaram com dados similares existentes na literatura.

Na área médica, a atenuação em banda larga (Broadband Ultrasound Attenuation - BUA) é uma técnica aplicada ao ultrassom bem consagrada, mais especificamente, no diagnóstico de osteoporose (22). A atenuação sofrida pela onda sonora ao se propagar em um

meio físico é resultado de vários fatores tais como (23): divergência do feixe em relação ao eixo central (o que provoca uma diminuição da energia por unidade de área); espalhamento devido a não homogeneidade do meio (uma parcela da energia se desvia da direção inicial de propagação); conversão em outros modos de vibração resultando no compartilhamento da energia com duas ou mais ondas propagando-se com velocidades e sentidos diferentes; absorção pelo meio, sendo parte da energia convertida em calor, principalmente devido às forças de atrito que agem em oposição ao movimento das partículas. A BUA é um parâmetro que mede a atenuação do sinal em uma determinada faixa de frequência. Esta faixa é diferenciada para cada meio em estudo.

## **1.2 ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA**

Escoamentos multifásicos são muito comuns nas indústrias petrolífera, química e nuclear, geralmente envolvendo ambientes hostis, restrições de segurança, difícil acesso e distâncias muito longas. Por inúmeros motivos, no estudo de escoamentos multifásicos, técnicas de medição não invasivas têm atraído muito interesse seja para a medição da concentração da fase dispersa seja para detecção do padrão de escoamento. Métodos para detecção e análise dos processos, são de muita ajuda na indústria petrolífera, por exemplo, em instalações de bombeamento centrífugo submerso (BCS). Para o BCS, tratando-se de uma tecnologia normalmente aplicada em águas profundas, o monitoramento remoto do processo é fundamental para seu bom funcionamento, além das inúmeras simulações do comportamento do equipamento feitas utilizando dados reais previamente a sua instalação.

O transporte de fluidos em poços ou em linhas de transmissão normalmente apresenta o escoamento de mais de uma fase (líquidos, gases e sólidos). Na indústria petrolífera, os problemas associados aos escoamentos multifásico vêm sendo estudados há muito tempo. Parâmetros como tamanho de bolhas, velocidade, concentração das fases, entre outros, são de suma importância e as consequências deles são várias [(24)]:

- Formação de emulsão, que afeta o gradiente de pressão e a capacidade de produção do poço;
- Aumento do acúmulo de líquido, em particular para campos de gas/condensado;
- Corrosão;
- Especificação de equipamentos;

O padrão de escoamento é outro aspecto muito importante que deve ser considerado e sua ocorrência está ligada às variáveis do escoamento (densidade, vazão, etc). Por exemplo, dependendo da relação entre as vazões de líquido e gás, o padrão de escoamento intermitente pode se tornar predominante. Este tipo de escoamento é conhecido por aumentar os níveis de corrosão internos na tubulação devido à mistura de vórtices e os impactos das bolhas na região do pistão de líquido [(25)].

### **1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO**

Estudos em pequena escala de escoamentos multifásicos são muito importantes porque os fenômenos em grande escala são controlados pela física em pequena escala. Por exemplo, um dos problemas mais importantes abordados pela comunidade científica é a transição entre os vários regimes de escoamentos bifásicos encontrados em várias aplicações da indústria. Todavia, uma compreensão profunda dos mecanismos desta transição só é possível por meio de experimentos em pequena escala [(26)].

O presente trabalho analisa e apresenta dados acústico e imagens capturadas a alta velocidade de escoamentos bifásicos água-ar verticais e ascendentes dentro do regime borbulhante. Estes dados foram adquiridos em um circuito de teste em escala laboratorial que simula o escoamento em grande escala da indústrias petrolífera. Contrariamente à complexidade da instrumentação exigida pela técnica UCT, a instrumentação ultrassônica foi intencionalmente mantida a mais simples possível utilizando somente quatro transdutores posicionados ao longo da circunferência da tubulação, sendo um de duplo elemento (emissor/receptor) e os demais apenas receptores.

A utilização das filmagens à alta velocidade teve como principal propósito obter uma visão clara das várias sub-estruturas que formam o escoamento borbulhante - bolhas isoladas, aglomerados de bolhas, coalescências, etc. - e verificar como estas sub-estruturas afetam o sinal ultrassônico. A atenuação na energia do pulso acústico, a intensidade da amplitude e o tempo de trânsito da onda foram correlacionados com a fração de vazio e os vários padrões do escoamento borbulhante.

Finalmente, espera-se que os resultados aqui obtidos contribuam para o entendimento da interação entre a onda ultrassônica e o escoamento borbulhante. Assim, estar-se-á contribuindo para o aprimoramento da técnica ultrassônica e na aplicação a escoamentos reais da indústria petrolífera.

## **2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTO DE MEDIDA**

### **2.1 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL**

#### **2.1.1 Circuito bifásico água-ar**

Um aparato experimental foi criado especificamente para estudo da medida da fração de vazio em escoamentos bifásicos ar-água, verticais e ascendentes, utilizando a técnica de ultrassom (Figura 1). Esse circuito de testes experimentais foi montado no LabPetro (UNICAMP).

A montagem foi feita da seguinte maneira: a montante da tubulação de acrílico existe um misturador onde a mistura bifásica água-ar é produzida. Este misturador consiste em um meio poroso por onde chega ar comprimido e, em seguida, é misturado a água. A jusante do misturador se encontra a tubulação da seção de escoamento composta por um cano de acrílico de 5 m de comprimento e 54 mm de diâmetro; este comprimento mínimo garante o desenvolvimento completo da hidrodinâmica do escoamento. Seguindo a seção de escoamento, existe a seção de teste que, por sua vez, é um segmento de 10 cm do mesmo tubo de acrílico onde os sensores de ultrassom são fixados. Logo após os transdutores ultrassônicos existe um sensor de pressão; essa medida é necessária para os cálculos da vazão de ar sobre condições reais de teste. A jusante da seção de teste um segmento de 1,6 m do tubo de acrílico descarrega o escoamento bifásico água-ar em um separador. O separador nada mais é que um tanque descoberto com um flange secundário. Pela abertura, o ar é liberando para a atmosfera, e pelo flange, a água é retornada para um reservatório por efeito da gravidade. Uma bomba centrífuga acionada por um inversor de frequência impulsiona a água desse reservatório de volta para o misturador dando início novamente ao processo. Um trocador de calor em casco e tubo tem a finalidade de controlar as variações na temperatura da água. O inversor de frequência e uma válvula de desvio tornam possível ajustar a vazão da água. A vazão de água é medida por um medidor de vazão tipo coriolis, o qual possui um termômetro do tipo RTD embutido. A vazão de ar é medida por elementos laminadores de ar. À jusante do laminador

de ar existe mais um transdutor que faz a leitura da pressão relativa do ar. A Tabela 1 resume em imagens o circuito de testes.

**Tabela 1: Imagens do circuito de testes.**

Descrição	Imagem da Montagem	Descrição	Imagem da Montagem
<b>Misturador bifásico água-ar</b>		<b>Laminador de ar</b>	
<b>Seções de teste e separação de fases</b>		<b>Medidor de vazão de água (coriolis)</b>	
<b>Bomba centrífuga</b>		<b>Trocador de calor</b>	
<b>Inversor de frequência</b>			

Medidas da pressão atmosférica são obtidas da estação meteorológica da universidade (UNICAMP). Um termopar tipo J mede a temperatura do ar. Manômetros de Bourdon, tubos inclinados em U e termômetros com interface digital, permitem conferir as medidas e, ao mesmo tempo, monitorar a operação correta da montagem. Os valores digitais dos parâmetros de operação são adquiridos por uma placa AT-MIO NI PC, tratados no LabView e, por fim, registrados em planilhas do Microsoft Excel. Essas planilhas calculam a real vazão de ar na seção de teste e as velocidades superficiais do ar e da água. Existe uma estação de filmagem localizada à jusante da seção de teste que permite capturar imagens (1000 fps) do escoamento

líquido-gás. A filmadora usada é uma REDLAKE Motion Pro X3 com resolução de 1280x1024.

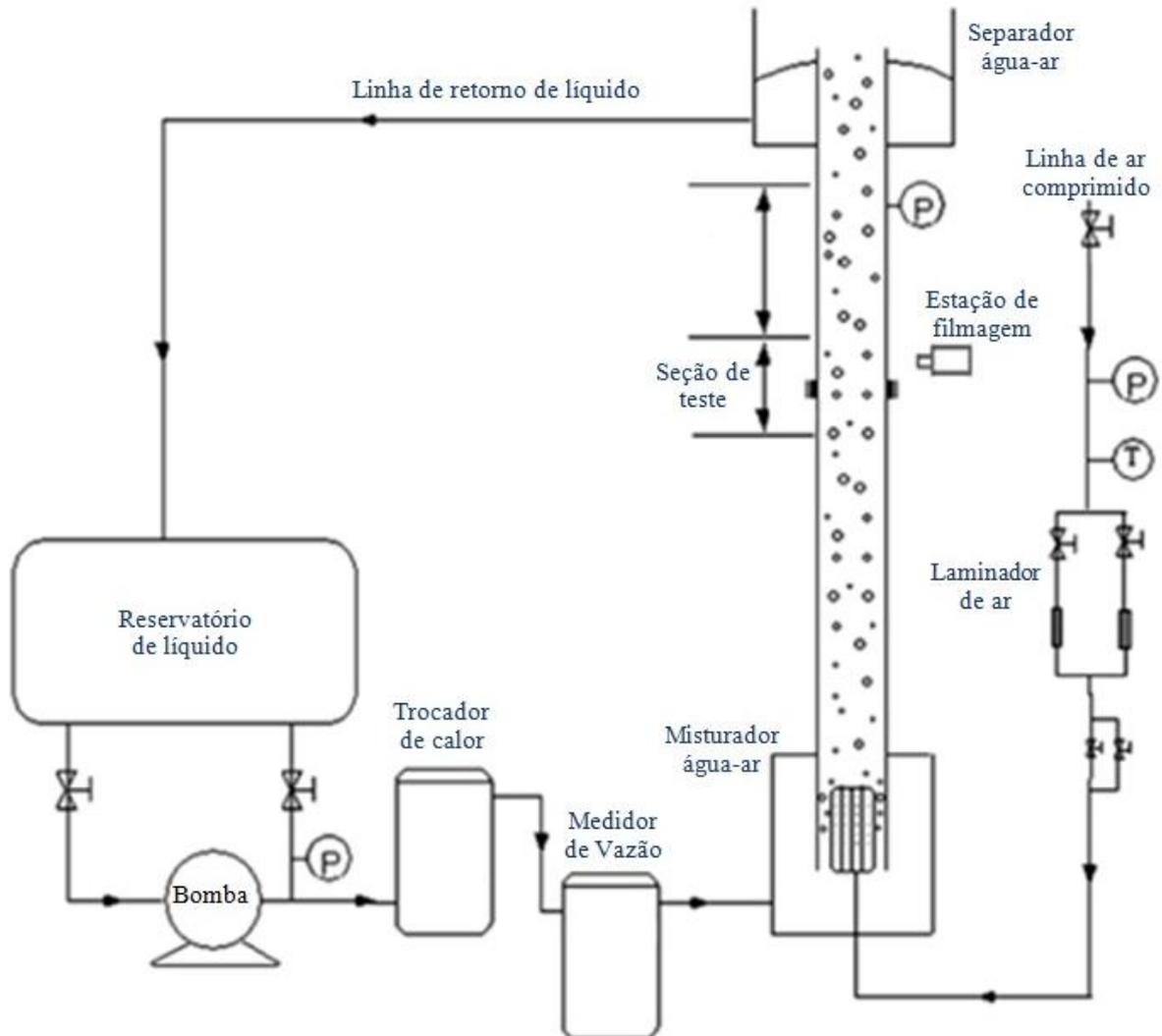


Figura 1: Circuito de teste de escoamento bifásico água-ar.

### 2.1.2 Instrumentação ultrassônica

A instrumentação ultrassônica mostrada Figura 2 foi projetada de forma a coletar simultaneamente dados de atenuação acústica nos modos de transmissão direta, reflexão lateral e pulso-eco. Apesar do arranjo apresentar mais de um receptor, a montagem está bem distante da complexidade apresentada pelo aparato utilizado na técnica UCT. Todavia, a simplicidade da montagem foi proposital, pois visa-se a aplicação da técnica em tempo real na indústria do petróleo.

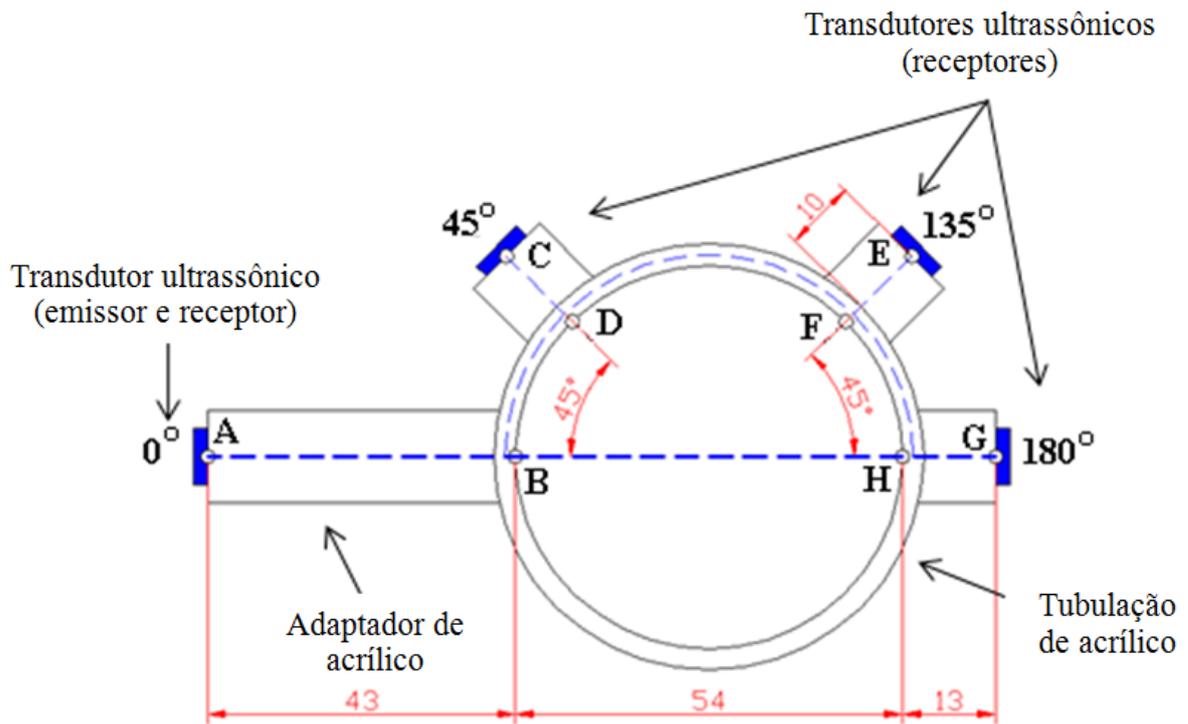


Figura 2: Desenho esquemático do aparato ultrassônico.

A idéia principal que norteou essa configuração (Figura 2) foi que deveria existir um sensor em cada quadrante da circunferência do tubo; entretanto, considerando que o escoamento borbulhante possui uma simetria radial do ponto de vista estatístico, somente metade da circunferência foi instrumentada. A referência adotada para se posicionar cada transdutor foi o sensor emissor; a partir desse ( $0^\circ$ ) os demais foram posicionados em um ângulo fixo. Nos primeiro e segundo quadrantes ( $\theta=45^\circ$  e  $\theta=135^\circ$  respectivamente) dois transdutores foram instalados a fim de captarem a energia refletida para essas regiões. Radialmente oposto ao emissor ( $\theta=180^\circ$ ), o último sensor foi alocado para receber o sinal transmitido através do escoamento. A aquisição simultânea de todos os sensores permite uma visão mais clara dos mecanismos acústicos de dissipação pelas várias estruturas gasosas presentes no escoamento. Mais ainda, com esses dados é possível fazer inferências acerca da topologia instantânea do escoamento ou mesmo saber sobre a distribuição da fase dispersa na seção transversal da tubulação.

Entre cada sensor e a tubulação foi colocado um adaptador em acrílico, mesmo material utilizado no tubo, usinados de tal forma a obter um encaixe perfeito tanto na parte dos sensores como no acoplamento com a parede do tubo; para os receptores foram utilizados transdutores Panametrics de elemento simples (Figura 3a). Já o emissor foi utilizado um sensor de elemento duplo do mesmo fabricante (Figura 3b). A Tabela 2 contém algumas especificações dos transdutores utilizados.

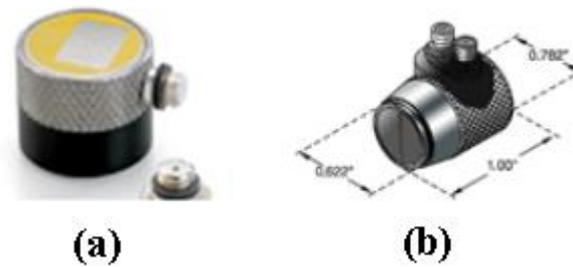


Figura 3: Sensores de ultrassom.

Tabela 2: Especificações dos transdutores.

	Elemento duplo	Elemento simples
Frequência (MHz)	2,25	2,25
Diâmetro (pol./mm)	0,5/13	0,5/13
Modelo	DHC706-RM	V106-RM

Uma camada fina de vaselina foi aplicada em todas as interfaces antes da fixação dos transdutores à tubulação, sensor-adaptador e adaptador-tubo; isso foi feito para obter um melhor acoplamento acústico entre as partes. O adaptador do transdutor emissor tinha um comprimento de 40 mm, assegurando que o campo próximo característico desse transdutor não adentrasse no escoamento bifásico (27), já para os demais sensores os adaptadores tinham tamanho de 10 mm. O comprimento do caminho percorrido pelo sinal ultrassônico em transmissão direta era de 40 mm do adaptador, 3 mm da espessura da parede da tubulação, 54 mm de diâmetro do tubo pelo escoamento, outros 3 mm de espessura de parede e mais 10 mm do adaptador do lado do receptor; a espessura da camada de vaselina foi desconsiderada. Enquanto a transmissão direta do feixe acústico pode ser claramente definida, para os demais caminhos isso não pode ser afirmado. Os sinais que atingem os demais sensores procedem de direções diferentes dependendo da interação entre a onda acústica e as estruturas gasosas presentes no caminho acústico naquele exato momento. Porém, como o principal objetivo dos sensores laterais era fornecer informações adicionais acerca do escoamento e corroborar as inferências feitas com base nos dados da transmissão direta e das filmagens do escoamento, o problema das trajetórias não se mostrou muito significativo.

Uma placa dedicada especialmente desenvolvida por uma equipe da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) gerencia todo o processo de aquisição dos dados ultrassônicos e funcionamento dos transdutores. As principais características dessa placa para o gerenciamento são listadas a seguir:

- 3 canais independentes para aquisição de sinais provenientes de transdutores de ultrassom com frequência de amostragem selecionável de 20 MHz ou 40 MHz e com entrada diferencial, compostos cada um por:
  - 1 transformador de RF para casamento de impedância;
  - 1 amplificador de sinal de alta frequência para sinais de ultra-som, com ganho variável e configurável por software;
  - 1 conversor A/D com resolução de 12 bits e taxa de amostragem de até 80 MHz;
  - 1 memória tipo FIFO com capacidade para até 16384 words de 18 bits para guardar os sinais de ultra-som na alta taxa de amostragem necessária;
- 3 conversores D/A AD420 para geração dos sinais de corrente 4-20 mA;
- 1 conversor A/D de 16 bits e taxa de amostragem de 105 Hz para adquirir o sinal proveniente do PT100;
- 1 UART para comunicação com um computador pessoal a longa distância (até 1 km) por meio de comunicação serial RS-485/422;
- 1 interface USB 2.0 para comunicação de alta velocidade com um computador pessoal a curta distância, permitindo a rápida transferência dos dados armazenados na memória RAM (até 64 MBytes) para o PC permitindo análises ainda não implementadas no firmware do módulo de processamento.

A Figura 4 apresenta uma foto da placa desenvolvida.



**Figura 4:** Foto da placa de aquisição e interfaces.

Os dados de ultrassom adquiridos durante a aquisição são armazenados na memória interna da placa (FIFO) e, posteriormente, ao término da aquisição, estes dados são transferidos para um computador através da porta de comunicação USB 2.0.

### 2.1.3 Instrumentação de filmagem rápida

Os principais requisitos para a escolha do equipamento de filmagem eram alta velocidade e resolução. A filmadora utilizada foi o modelo MotionPro X3 do fabricante Redlake (Figura 5). Esse equipamento possui uma taxa de aquisição de até 1000 fps (*frames per second*) e resolução de até 1280 x 1024 pixels, entre outros atributos.



Figura 5: Câmera de alta velocidade.

Além da filmadora, utilizou-se um sistema de iluminação diferente do existente no laboratório, pois este não supria as necessidades requeridas. A fonte de luz usada era composta por um arranjo de 19 LEDs com fecho de luz retilíneo (Figura 6) do mesmo fabricante da filmadora.



Figura 6: Equipamento de iluminação a base de LEDs.

## 2.2 PROCEDIMENTO DE MEDIDA

### 2.2.1 Procedimento de operação do circuito bifásico

A operação do circuito bifásico era feita de forma a preestabelecer a fração de vazio desejada para a rodada experimental. A determinação da condição era feita utilizando-se planilhas que calculavam o valor de  $\langle \alpha \rangle$  automaticamente apenas inserindo alguns parâmetros operacionais. Estes parâmetros, chamados também de variáveis primárias, são:

- Temperatura da água [°C], medida por um termômetro embutido no medidor de vazão de água;
- Vazão de água [kg/s];
- Temperatura do ar [°C];
- Pressão do ar [mmÁlcool], tubo em U;
- Pressão relativa do ar [kgf/cm<sup>2</sup>], manômetro de Bourdon;
- Pressão do ar [kgf/cm<sup>2</sup>], medida na seção de teste;
- Pressão atmosférica [hPa];

Da Figura 7 a Figura 11 são mostradas as planilhas utilizadas para o ajuste da fração de vazio.

Nº	Arquivo	Fluidos	Linha de Líquido				Linha de Ar Comprimido				
			Temp. Água (Coriolis) [°C]	Temp. Água (Termopar) [°C]	Bomba (Inversor) [Hz]	Vazão Água [kg/h]	Temp. Ar (Contemp) [°C]	D_Pressão Ar (Omega) [mmH <sub>2</sub> O]	D_Pressão Ar (Inclinado) [mmÁlcool]	Pressão Rel. Ar (Omega) [bar]	Pressão Rel. Ar (Bourdon) [kgf/cm <sup>2</sup> ]
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											

Figura 7: Medidas nas linhas de líquido e gás.

Nº	Arquivo	Fluidos	Seção Testes			Ultrasom			
			Pressão Ar (Validyne) [Volts]	Pressão Ar (Validyne) [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Pressão Ar (Bourdon) [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Freq. Pulso [kHz]	Freq. Aquis. [MHz]	Número Pontos	Tempo Amostra [s]
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									

Figura 8: Medidas na seção de teste.

Nº	Arquivo	Ar					
		$T_{LFE}$ [K]	$T_{teste}$ [K]	$T_{teste} / T_{linha}$	$p_{LFE}$ [bar]	$p_{teste}$ [bar]	$p_{LFE} / p_{teste}$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

Figura 9: Cálculo dos valores absolutos de temperatura e pressão do escoamento de ar.

Nº	Arquivo	Linha de Ar Comprimido						Seção Testes		Água	
		$\mu_{dry}$ [micropoise]	$\mu_{wet} / \mu_{dry}$	$\mu_{wet}$ [micropoise]	$\mu_{std} / \mu_{wet}$	$Q_{std}$ [m³/s]	$Q_{actual}$ [m³/s]	$Q_{actual}$ [m³/s]	$\rho_{ar}$ [kg/m³]	$\rho$ [kg/m³]	$Q$ [m³/s]
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											

Figura 10: Cálculo das vazões volumétricas.

Nº	Arquivo	$j_{ar}$ [cm/s]	$j_{água}$ [cm/s]	$j$ [cm/s]	$\alpha_{homogêneo}$ [%]	$\alpha_{Zuber-Findlay}$ [%]	$\alpha_{real}$ [%]	$\rho_{ar} (j_{ar})^2$ [kg/s².m]	$\rho_{água} (j_{água})^2$ [kg/s².m]
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									

Figura 11: Cálculos das velocidades superficiais do ar e água e da fração de vazio.

O cálculo de valor de  $\langle \alpha \rangle$  é feito utilizando a correlação Zuber-Findlay do modelo *drift flux*. Esta correlação faz uso das velocidades das fases para determinar a fração de vazio, como mostra a Equação (1).

$$\langle \alpha \rangle = \frac{j_{ar}}{Co j + v_{gj}} \quad (1)$$

Dias *et al.* (28), utilizando a sonda de ponta dupla, melhoraram os coeficientes  $Co$  e  $v_{gj}$  da correlação acima para as condições estudadas, podendo ser aplicada também no presente trabalho.

As velocidades das fases, água e gás, foram calculadas utilizando a Equação (2) que envolve a vazão volumétrica e a área da tubulação.

$$j = \frac{Q}{Área} \quad (2)$$

A cada rodada experimental estes parâmetros eram novamente conferidos de modo a se certificar que a condição permanecia a mesma. Alguns parâmetros podiam variar rapidamente dependendo do período do dia, por exemplo, a temperatura no início ou no final do dia sofria rápidas alterações. Caso isso acontecesse, a fração de vazio era recalculada segundo os novos valores das variáveis primárias.

## 2.2.2 Procedimento de tomada de dados de ultrassom

Este trabalho apresenta seis séries de aquisição de dados acústicos e imagens; todas as séries de dados foram feitas utilizando-se o aparato montado no LabPetro (Figura 1). Como mostra a Tabela 3, foram adotados diferentes procedimentos experimentais em cada série no que diz respeito ao número de canais amostrados, espaço de armazenagem requerido e tempo de aquisição de dados. Isto foi feito de modo a se conseguir a melhor relação entre qualidade, confiabilidade das aquisições e o espaço requerido para armazenamento dos dados. Diminuindo a qualidade das filmagens rápidas, o tamanho também é reduzido, porém, a resolução fica prejudicada. Os tempos de amostragem usados foram previamente estudados de forma a reduzir a dispersão dos dados sem dificultar os experimentos e o armazenamento dos dados. De acordo com uma análise estatística preliminar, dez amostras ultrassônicas foram

obtidas para cada condição de teste em todas as séries de dados exceto as séries n° 3 e n°6; nesses casos foram feitas duas e seis amostras, respectivamente, pois o objetivo principal era correlacionar os sinais ultrassônicos e as imagens. Na série n° 3 não foi feita nenhuma correlação da fração de vazio e a atenuação acústica. A razão de energia é a média das dez amostras (seis para a série n° 6) e o intervalo de incerteza associado com nível de confiança de 90% variou de 1,5% do valor médio nas frações de vazio mais baixas até 9% para as frações mais altas.

**Tabela 3: Parâmetros de aquisição das séries de dados experimentais.**

Série de Dados	Faixa de Fração de Vazio	Período de Amostragem [s]	Taxa de Amostragem [MHz]	Frequência de Pulsação [kHz]	Pulsos por Amostra	Sensores Amostrados	Velocidade da Filmagem [frames/s]
1	0 to 15%	1,75	20	4,10	7.175	180°	250
2	0 to 15%	15,61	20	8,40	131.062	180°	250
3	0 to 15%	5,00	20	8,40	42.000	180°	1000
4	0 to 15%	2,98	20	1,72	5.126	45°, 135°, 180°	-
5	0 to 15%	2,98	20	1,72	5.126	0°, 135°, 180°	1000
6	0 to 20%	2,98	20	1,72	5.126	0°, 135°, 180°	1000

A taxa de amostragem usada para o sinal ultrassônico foi de 20 MHz, respeitando o teorema de Nyquist, para evitar qualquer efeito de *aliasing*. Na série n° 3, a razão entre a pulsação do gerador de pulsos (8,4 kHz) e as imagens de alta velocidade (1000 fps) foi de 8,40:1, o que possibilitou uma análise precisa entre os dados ultrassônicos e as imagens correspondentes. Essa razão foi reduzida para 1,72:1 nas séries n° 5 e n° 6, mas ainda assim foi possível associar os dados e as imagens.

Sobre as condições de teste, a vazão da água foi mantida constante e próxima de  $6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , enquanto a vazão de ar foi variada de 0 até  $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , proporcionando assim a fração de vazio desejada (0 a 15%). Estas condições de teste correspondem a  $j_{\text{água}} \approx 26 \text{ cm/s}$  e  $0 \leq j_{\text{ar}} \leq 8,6 \text{ cm/s}$ . O número de Reynolds do escoamento monofásico (água) era  $Re \approx 1.64 \times 10^4$ . Na série n° 6, a vazão de ar foi aumentada para  $2,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $j_{\text{ar}} = 12,0 \text{ cm/s}$ ) para alcançar  $\alpha=20\%$  e conseguir reproduzir o padrão intermitente do escoamento. Os sinais de referência para os cálculos da razão de energia para os receptores a 0° e 180° foram obtidos para o escoamento monofásico. Para os sensores a 45° e 135° não foi possível usar a mesma condição para referência devido a não chegada de energia nestes receptores nesta condição; como explicado a seguir, a referência usada para estes sensores foi o sinal na fração de vazio

de 11%. A temperatura foi mantida o mais próximo possível das condições reais de teste de modo a se minimizar qualquer influência da temperatura na atenuação do sinal.

Os dados ultrassônicos e visuais foram obtidos para todo o regime do escoamento borbulhante, 0 a 15% de fração de vazio em passos de 1%, na série n° 6 foi usado passo de 2%. A intensidade da onda de ultrassom, a razão de energia e o tempo de trânsito da onda foram calculados numericamente, como é explicado nas próximas seções. Para correlacionar os dados de atenuação acústica com a fração de vazio, resultados de Dias *et al.* (28) e Dias (29) foram utilizados. Estes autores empregaram um sensor de condutividade elétrica de dupla agulha para a medição local de fração de vazio, velocidade de bolha, diâmetro de bolha e área de densidade interfacial em escoamentos água-ar borbulhantes, verticais e ascendentes em tubulação de Plaxiglas com 52 mm de diâmetro. Após integrar a distribuição radial obtida, os autores determinaram a fração de vazio média na seção transversal, a velocidade superficial média e fluxo de área interfacial média. O aparato experimental utilizado neste trabalho é o mesmo circuito descrito em (28) e (29).

### 2.2.3 Procedimento de filmagem rápida

As filmagens à alta velocidade foram feitas somente para uma única amostra de algumas frações de vazio, pois o fator limitante para esse procedimento era a capacidade de armazenamento do disco rígido do computador. Nas séries n° 1 e n° 2 foram feitas filmagens à taxa de 250 fps (Tabela 3). Embora essa taxa permitisse reduzir o tamanho do arquivo, a qualidade das imagens era comprometida. Já nas séries seguintes, a taxa foi aumentada para 1000 fps, aumentando-se assim o espaço requerido em quatro vezes.

A escolha das frações de vazio a serem filmadas foi norteadas pelos sub-regimes definidos anteriormente por Carvalho *et al.* (30). Seria necessário pelo menos um filme para cada sub-regime. Entretanto, como não existiam muitas divisões, outros valores de  $\langle \alpha \rangle$  dentro das sub-divisões, principalmente, as transições entre os sub-regimes foram filmadas.

Para cada amostra escolhida, os filmes e os dados ultrassônicos foram adquiridos de forma sincronizada, ou seja, o instante de início de ambos era o mesmo. Dessa forma, foi possível correlacionar instantaneamente um determinado pulso e a imagem correspondente, requerimento para o estudo da identificação do padrão de escoamento. A sincronia foi feita utilizando a saída de disparo (*trigger*) da placa de aquisição e a entrada de sincronia (*sync in*) da câmera. Assim, emissor e filmadora eram iniciados no mesmo instante.

A Figura 12 mostra a disposição da câmera em relação à seção de teste. Apesar dos filmes estarem sincronizados com os dados ultrassônicos, a distância entre o foco da filmadora e os transdutores dificultou a correlação entre os dois. A solução para este problema foi, durante o tratamento dos dados, recuar no tempo o início dos filmes. Assim, poderia ser afirmado que a câmera “enxergava” a mesma coisa que os transdutores. O tempo de atraso foi calculado em 0,3 s através da velocidade da água ( $v_{\text{água}} \approx 26 \text{ cm/s}$ ) e da distância (8 cm) entre a filmadora e os transdutores já discutidos. Uma sintonia fina foi realizada tomando-se por referência uma bolha de Taylor, facilmente identificada nos sinais de ultrassom. Do mesmo que os dados de ultrassom, cada filmagem era armazenada na memória interna da filmadora e posteriormente transferida para um computador.



**Figura 12: Seção de filmagem.**

## 3 ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

### 3.1 SUB-REGIMES DO ESCOAMENTO BORBULHANTE

Os arquivos de filmagem rápida foram analisados em uma tentativa de se identificar diferentes padrões de escoamento à medida que se aumentava a fração de vazio ao longo de todo o regime do escoamento borbulhante. Notou-se que diferentes estruturas gasosas – bolhas dispersas, aglomerados de bolhas, bolhas coalescidas, e pequenas bolhas de Taylor – constituíam a mistura de ar-água do escoamento dependendo da fração de vazio e das condições de operação. Dependendo de como essas estruturas interceptavam o feixe ultrassônico, os pulsos recebidos pelos transdutores variavam demonstrando uma interação diferente pulso-meio. A este respeito, Dias (29) obteve experimentalmente perfis detalhados de tamanho de bolhas para  $j_{água} = 26$  cm/s e  $2,4 \leq j_{ar} \leq 6,4$  cm/s, o que corresponde a  $4,7 \leq \langle \alpha \rangle \leq 11,6\%$ .

As filmagens indicaram que na linha de centro da tubulação, os tamanhos de bolhas variavam no intervalo de 1 a 5 mm, ficando os tamanhos mais recorrentes entre 3 mm e 4 mm. Ao longo da seção transversal, os tamanhos de bolhas variavam muito pouco; somente um leve decréscimo foi observado na região próxima às paredes da tubulação para as velocidades superficiais do ar mais altas.

Da análise das imagens adquiridas sincronizadas com os dados de ultrassom para determinadas frações de vazio, verificou-se que baixas frações de vazio geravam bolhas discretas pequenas e médias espalhadas ao longo de toda a seção transversal da tubulação. Com o aumento da fração de vazio, a população de bolhas começava a tomar toda a seção transversal; sua distribuição parecia ser mais uniforme para frações de vazio ente 4% e 6%. Aglomerados de bolhas e bolhas coalescidas começavam a surgir para  $\alpha = 8\%$ ; estruturas gasosas coalescidas apareciam no plano de fundo dos filmes como uma massa gasosa com velocidades de passagem mais altas do que o restante das bolhas e mudavam de forma à medida que subiam pela tubulação. Com o aumento da fração de vazio de  $\alpha = 8\%$  para  $\alpha = 12\%$ , essas massas gasosas ficavam maiores e mais frequentes. Bolhas de Taylor incipientes começavam surgir em  $\alpha = 13\%$ ; elas se tornaram maiores e apareciam mais regularmente em  $\alpha = 14\%$ . A partir desse ponto, o padrão de escoamento era o conhecido escoamento

intermitente, interpondo bolhas de Taylor e discos de líquido aerado. As observações visuais feitas confirmaram as tendências descritas por Dias (29).

Com base somente na análise visual, o regime de escoamento borbulhante foi dividido em três sub-regimes: sub-regime de bolhas discretas ( $\alpha \leq 8\%$ ); sub-regime de aglomerados e bolhas coalescidas ( $8 \leq \alpha \leq 12\%$ ); e transição para o escoamento intermitente ( $\alpha \geq 12\%$ ), no qual começam a surgir as bolhas de Taylor incipientes. A Figura 13 mostra algumas configurações de bolhas em seus respectivos sub-regimes. Os resultados desta análise visual foram confrontados com os dados acústicos, conforme discutido a seguir.

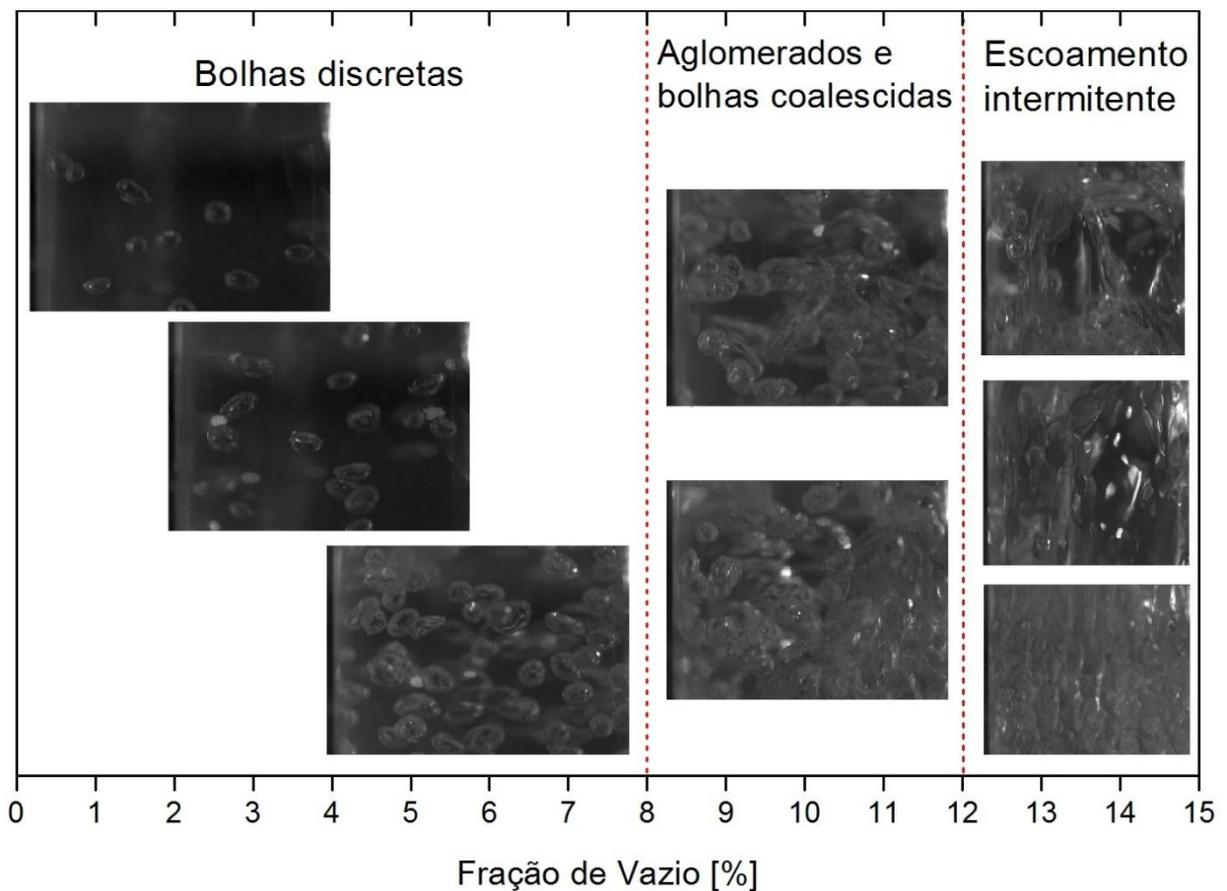


Figura 13: Divisão dos sub-regimes e imagens dos principais padrões de escoamento.

## 3.2 FILTRAGEM DOS SINAIS NOS DOMÍNIOS DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

Ao se adquirir um sinal, está-se sujeito a diversas interferências que circundam o meio de trabalho. As interferências, geralmente conhecidas como ruído, são todos os sinais que aparecem na recepção e que não dizem respeito ao fenômeno em estudo. São diversas suas

origens: aparelhos que geram fortes campos magnéticos como motores, inversores de frequência e rede elétrica; vibrações; o próprio equipamento utilizado para adquirir os dados; etc. Essas perturbações podem aparecer se somando ao sinal desejado com uma frequência bem definida ao longo do período de aquisição ou podem ser totalmente aleatórias. A filtragem torna-se necessária para minimizar os efeitos que estas perturbações acrescentam ao sinal.

No presente estudo, a maior preocupação são os componentes da onda sonora que não se propagam através do escoamento bifásico e que atingem o receptor juntamente com o sinal de interesse. Essas ondas não carregam nenhuma informação sobre o fenômeno em estudo e, para os cálculos, representam um erro sistemático que deve ser eliminado do sinal.

### **3.2.1 Tempos de trânsito dos componentes da onda acústica**

A onda acústica é composta por dois componentes, longitudinal e transversal. As duas parcelas possuem velocidades de propagação diferentes, não importando o meio, sendo a transversal sempre mais lenta. Logo, de forma gráfica, essa diferença é representada por uma defasagem de tempo entre os sinais recebidos pelos receptores.

Em meios fluidos, o componente transversal não consegue se propagar e, para o presente estudo, o sinal de interesse é o componente longitudinal da onda sonora que atravessa o escoamento bifásico. Entretanto, o fenômeno de refração, mudança de meio ou uma interface ao longo do trajeto da onda, independentemente do componente que se propaga, sempre provoca a geração do componente transversal. Ou seja, se uma onda longitudinal está se propagando e, durante o seu trajeto, ela se depara com uma interface, é gerada uma onda transversal. Desse fato, durante a análise do sinal recebido pelos transdutores, além de se considerar a parcela longitudinal que interagiu com o meio bifásico, deve-se identificar e, se possível, eliminar os componentes transversais que foram gerados nas interfaces água-acrílico (pontos B, D, F e H da Figura 2) e que chegam defasados nos receptores. Como esse componente transversal possui uma parcela da energia da onda que a gerou e essa, por sua vez, já sofreu uma atenuação ao longo do seu trajeto acústico, muitas vezes a onda transversal pode ser confundida com o ruído.

Além das ondas mencionadas acima, existem diversas outras que se propagam apenas pela tubulação e chegam aos transdutores sem atravessar o escoamento bifásico. Logo, nenhuma delas carrega informações acerca do escoamento e devem ser eliminadas do sinal recebido pelos receptores. A Tabela 4 mostra todas as ondas que podem chegar aos receptores

juntamente com os respectivos caminhos percorridos. São também mostrados os tempos de trânsito desde a origem até a chegada no transdutor correspondente. Todas as distâncias são relativas à Figura 2. As velocidades de propagação em cada meio, água e acrílico, são tabeladas.

**Tabela 4: Caminhos acústicos e tempos de trânsito.**

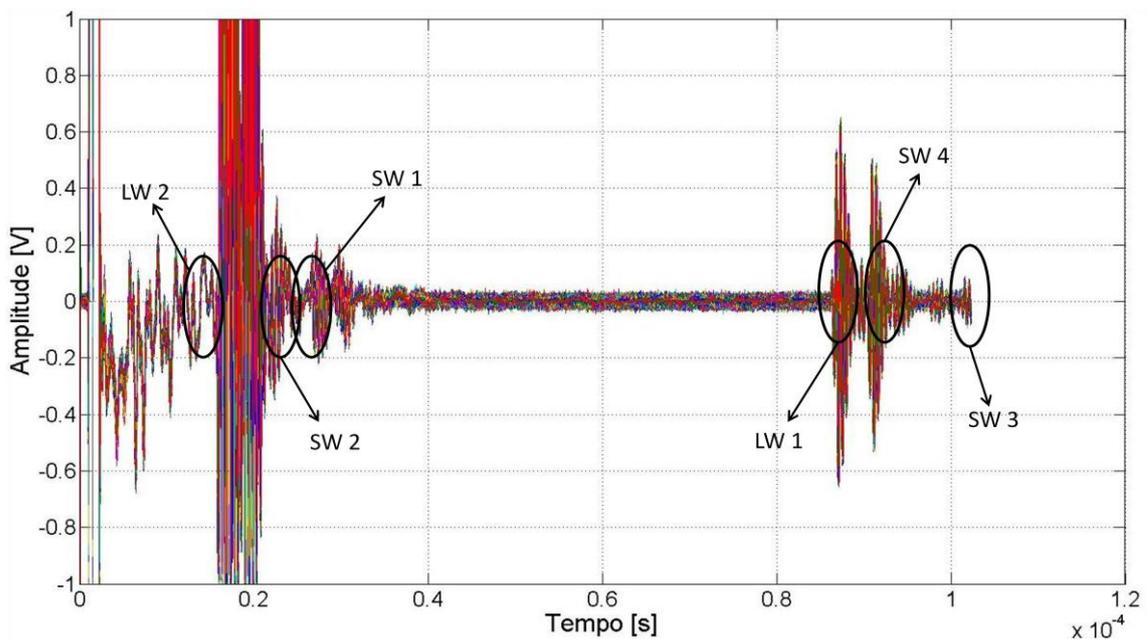
Ondas acústicas	Caminhos acústicos	Velocidade de propagação (água / acríl.) [m/s]	Distância média do caminho acústico [mm]	Tempo de trânsito [ $\mu$ s]	Transdutor ultrassônico	observações
LW 1	A-B-H-G	1.480 / 2.730	110	57	180°	Onda longitudinal gerada em A que passa através do escoamento bifásico.
	A-B-H-F-E		120,8	64,6	135°	
	A-B-H-F-D-C		165,5	81,3	45°	
	A-B-H-B-A		148,0	87,6	0°	
LW 2	A-B-D-C	0 / 2.730	75,4	27,6	45°	Onda longitudinal gerada em A que viaja somente pelo acrílico.
	A-B-D-F-E		120	44	135°	
	A-B-D-F-H-G		142,2	52,2	180°	
	A-B-A		40,0	14,6	0°	
SW 1	A-B-D-C	0 / 1.430	75,4	52,7	45°	Onda transversal gerada em A que viaja somente através do acrílico.
	A-B-D-F-E		120	83,9	135°	
	A-B-D-F-H-G		142,2	99,4	180°	
	A-B-A		40,0	28,0	0°	
SW 2	A-B-D-C	0 / 1.430	75,4	40,5	45°	Onda transversal gerada em B a partir da onda longitudinal 1; ela viaja somente através do acrílico.
	A-B-D-F-E		120	70,1	135°	
	A-B-D-F-H-G		142,2	85,9	180°	
	A-B-A		40,0	21,3	0°	
SW 3	A-B-H-G	1.480 / 2.730 / 1.430	110	61,3	180°	Onda transversal gerada em H a partir da onda longitudinal 1; ela viaja somente através do acrílico.
	A-B-H-F-E		120,8	67,9	135°	
	A-B-H-F-D-C		165,5	100,1	45°	
	A-B-H-F-D-B-A		182,0	119,0	0°	
SW 4	A-B-H-B-A	1.480 / 2.730 / 1.430	148,0	94,3	0°	Onda transversal gerada em B a partir da onda longitudinal 1.

O tempo de trânsito foi uma das ferramentas utilizadas para se fazer a limpeza do sinal no domínio do tempo. Com os dados da Tabela 4 e analisando os gráficos obtidos de cada

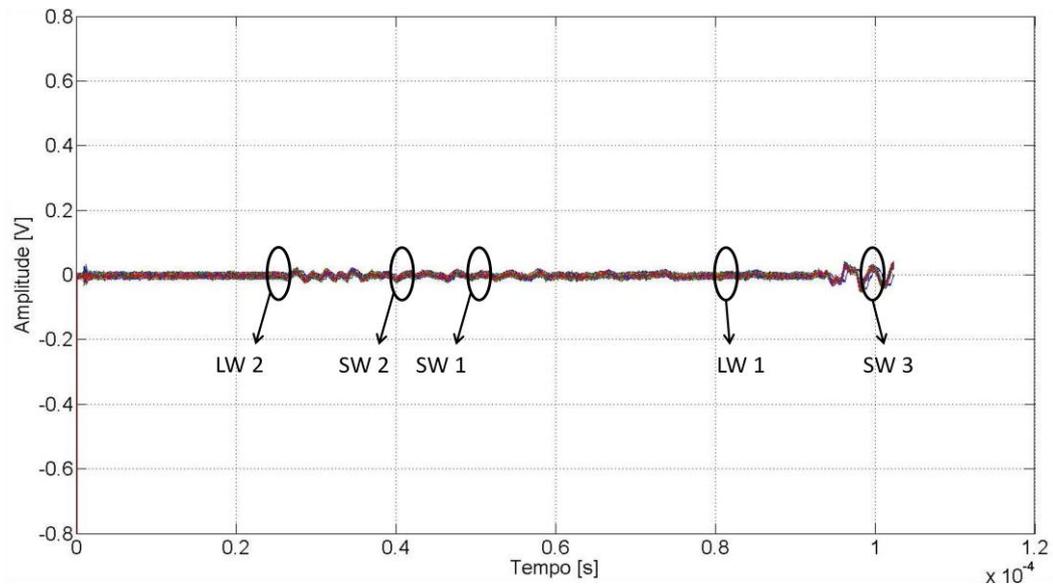
receptor, foi possível saber, pelo menos aproximadamente, o instante em que uma dada onda chega a um dado transdutor. Caso essa onda não seja de interesse, o trecho correspondente do sinal é descartado; caso contrário, ele é mantido para efeito de cálculo. Retirando as parcelas indesejadas, o ruído inerente ao sistema de aquisição e outras interferências presentes no mesmo período dessas parcelas também são descartadas.

Da Figura 14 a Figura 17 são mostradas as posições das ondas acústicas calculadas na Tabela 4. De todas as ondas encontradas, somente as ondas LW 1, SW 3 e SW4 sofrem influência do escoamento bifásico; as demais transitam apenas pelo acrílico. Assim sendo, é de interesse preservar as regiões onde as ondas LW 1, SW 3 e SW4 estão situadas. Uma vez que estas regiões sofrem variações à medida que se varia a fração de vazio, elas foram denominadas "regiões de atividade" do sinal.

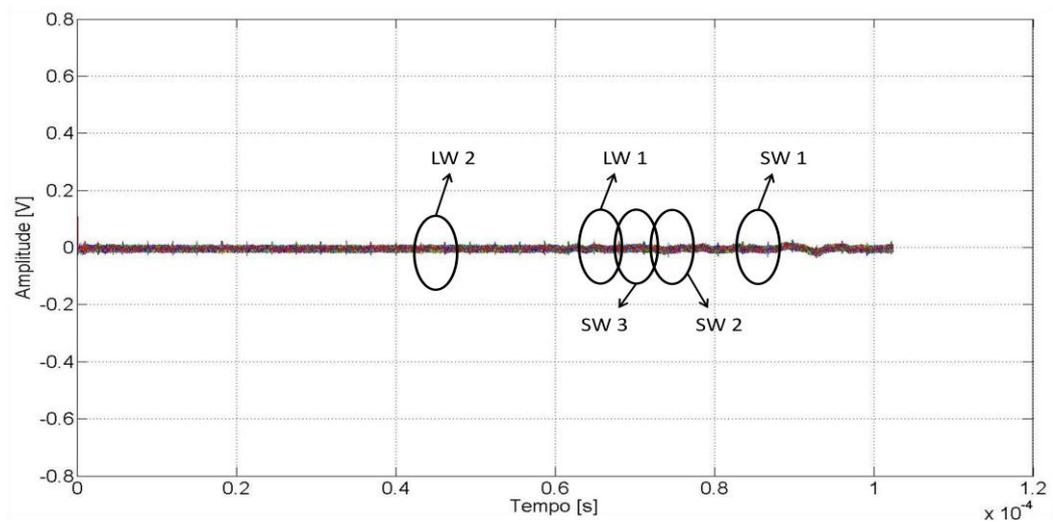
A determinação destas janelas de atividade foi feita superpondo-se os gráficos de todos os pulsos para cada amostra. Esses gráficos foram comparados um a um na tentativa de delimitar melhor as várias janelas de atividade. A Figura 18 e a Figura 19 mostram a evolução de algumas amostras selecionadas evidenciando claramente as regiões em que ocorrem alterações devido à chegada dos sinais ultrassônicos que passam pelo escoamento.



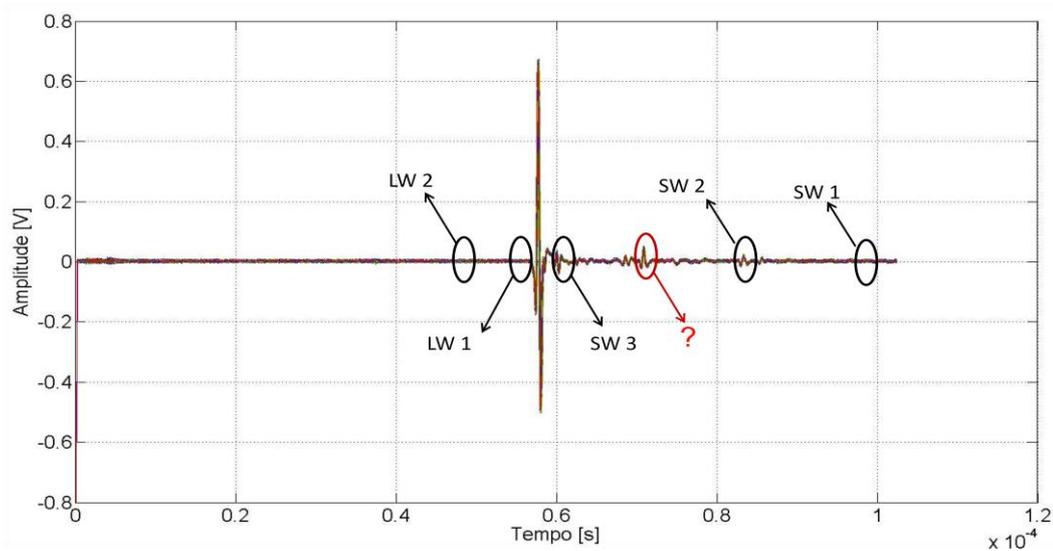
**Figura 14: Identificação das ondas acústicas para o sensor a  $0^\circ$ .**



**Figura 15: Identificação das ondas acústicas para o sensor a 45°.**



**Figura 16: Identificação das ondas acústicas para o sensor a 135°.**



**Figura 17: Identificação das ondas acústicas para o sensor a 180°.**

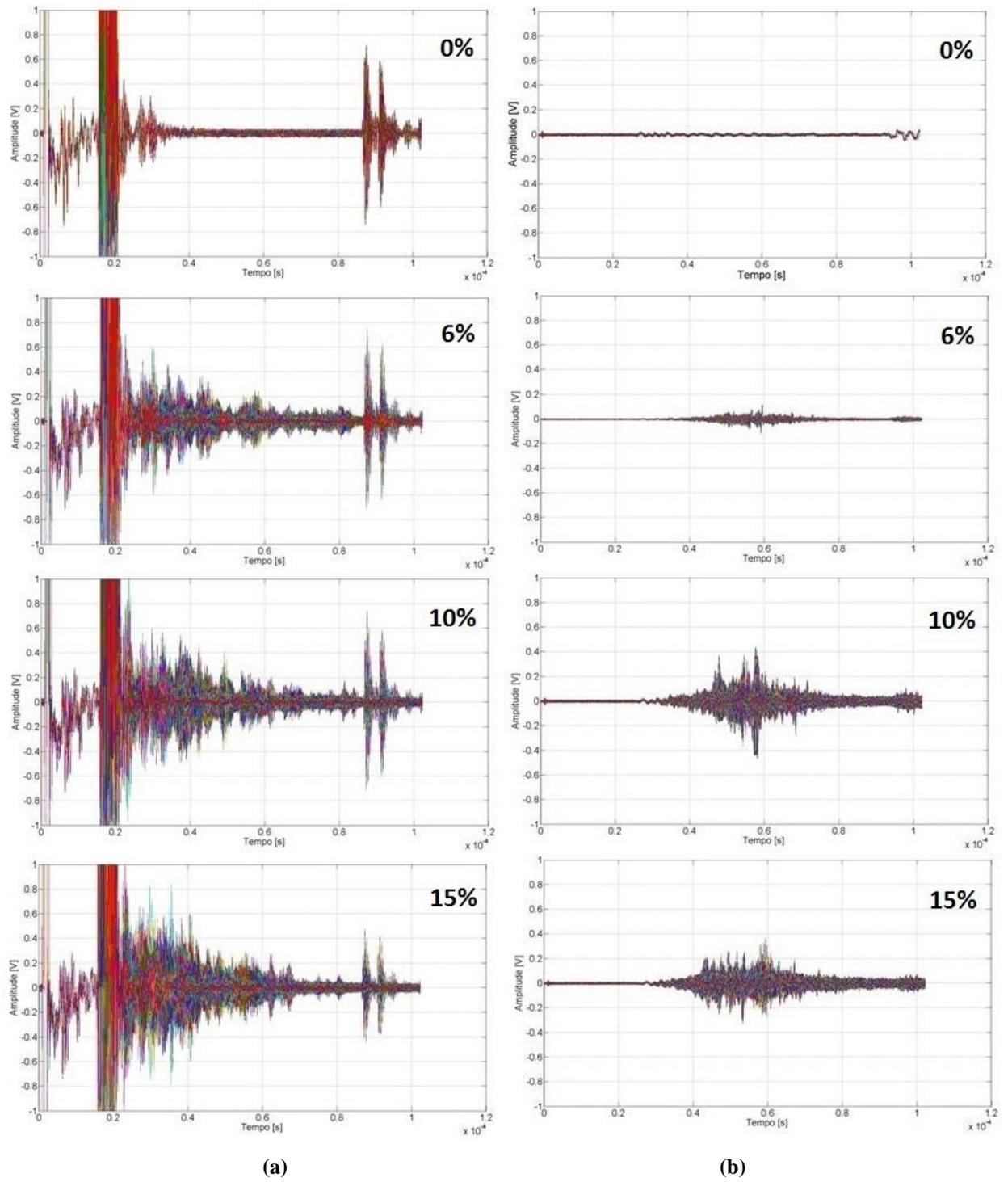
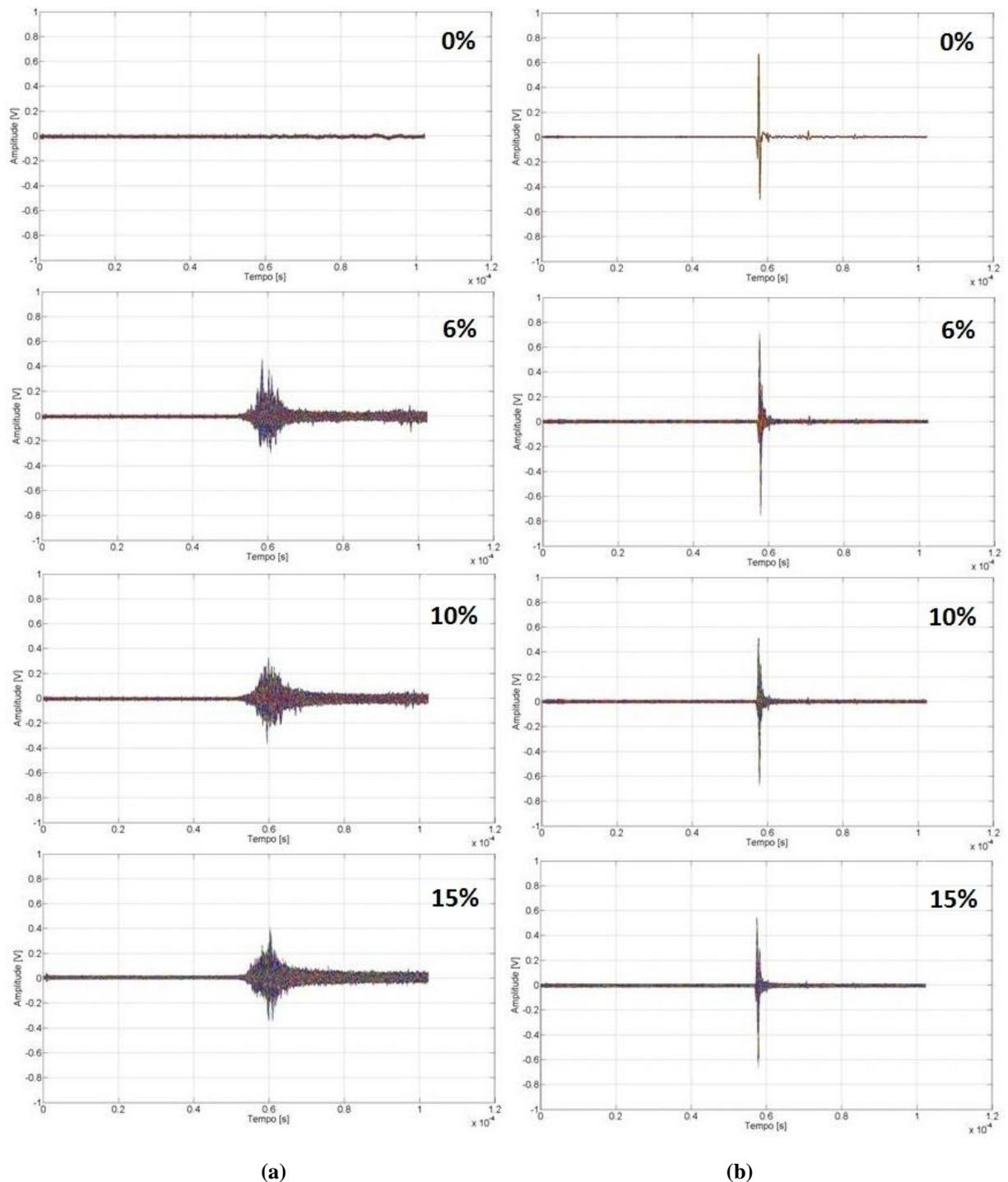


Figura 18: Pulsos superpostos das amostras (a) sensor pulso-eco ( $0^\circ$ ) e (b) sensor a  $45^\circ$ .



**Figura 19: Pulsos superpostos das amostras (a) sensor a  $135^\circ$  e (b) sensor a  $180^\circ$ .**

Todas as regiões cujo sinal permaneceu invariável, mesmo variando-se a fração de vazio, denotam intervalos que não receberam sinal algum ou que receberam sinais que não são afetados pelo escoamento bifásico. Por outro lado, na Figura 18 e a Figura 19 pode-se notar que várias das ondas calculadas na Tabela 4 se misturam aos sinais dos receptores a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $135^\circ$  a exclusão de uma região que aparentemente só contém a parcela acústica que não sofreu influência do escoamento se torna inviável. Já para o sinal do transdutor a  $180^\circ$ , há uma

delimitação clara da onda recebida. Vê-se que a utilização de ambas as ferramentas, análise visual e tempo de trânsito, permite uma delimitação mais precisa das janelas de atividade.

O uso deste tratamento preliminar dos dados, além de minimizar o erro relacionado às interferências e mais indesejados, também contribui para uma aquisição mais eficiente dos sinais. Sabendo-se a região de atividade do sinal obtido por um transdutor, a janela de aquisição pode ser diminuída, acelerando os processos de aquisição e transferência do sinal adquirido para a memória do computador. Obviamente, reduz-se também o espaço no disco rígido do computador requerido para a armazenagem de pulsos, o que aumenta a capacidade de armazenagem dos dados.

### 3.2.2 Filtragem no domínio do tempo do sinal ultrassônico do receptor a 180°

A Figura 20 mostra o sinal recebido pelo sensor a 180° após ter sido definida a janela de atividade para o mesmo. Pode-se notar que a parcela para a qual são calculados os parâmetros acústicos de interesse é bem restrita: Vale lembrar que, mesmo com a filtragem, ainda podem existir influências de algumas das ondas que não carregam informação acerca do escoamento e dos ruídos provenientes da montagem experimental. Porém, a eliminação destas interferências não é possível no domínio do tempo.

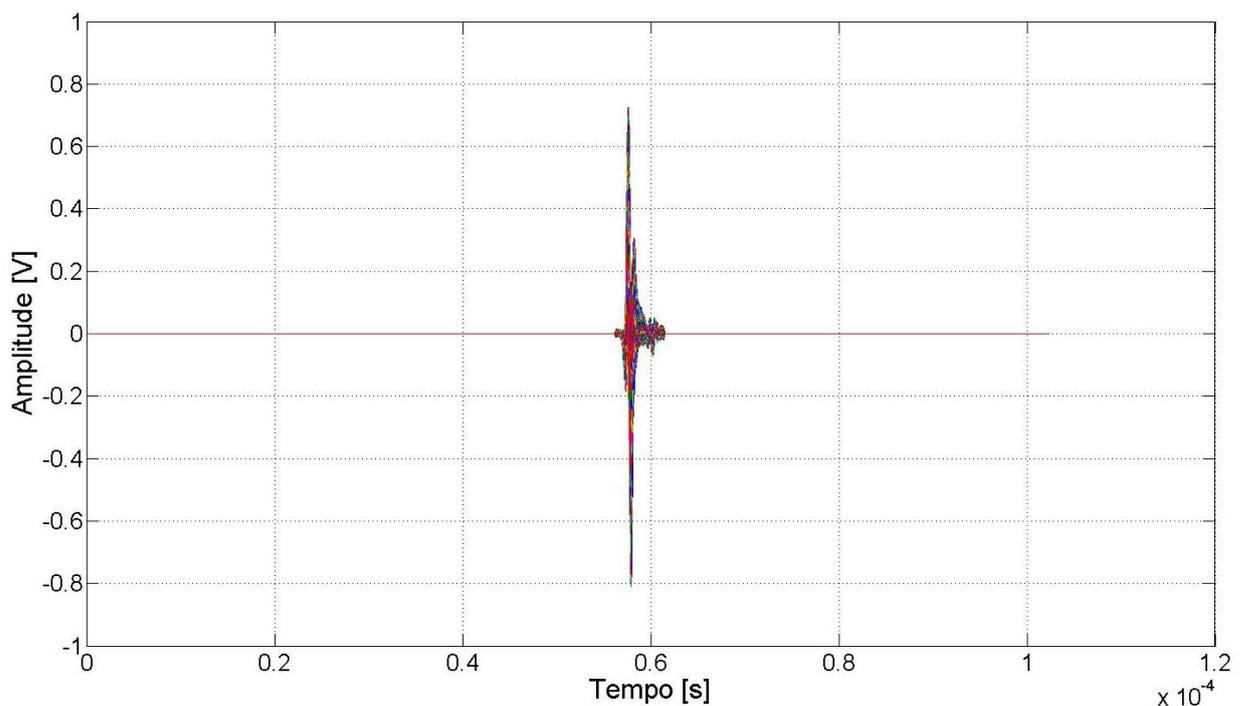


Figura 20: Janela de atividade do sensor a 180°.

Em termos da aquisição e armazenagem dos dados, a parcela aproveitada do sinal é bem pequena, menos de 1% do total adquirido. Isso faz com que o volume de dados diminua drasticamente, possibilitando uma coleta com mais amostras e um tratamento mais rápido dos sinais.

### 3.2.3 Filtragem no domínio do tempo dos sinais ultrassônicos dos receptores a 0°, 45° e 135°

Como mostram as Figura 21 a Figura 23, os sinais ultrassônicos adquiridos pelos sensores a 0°, 45° e 135° não possuem uma região de atividade tão bem definida com o sensor a 180°. Logo, a influência das ondas que se propagam somente pelo acrílico (Tabela 4) e o ruído de fundo proveniente da instalação do aparato experimental não são tão minimizados tanto quanto no caso da transmissão direta (180°). Esse fato ocorre devido à aleatoriedade com que sinais legítimos são refletidos para os sensores, principalmente aqueles a 45° e 135°.

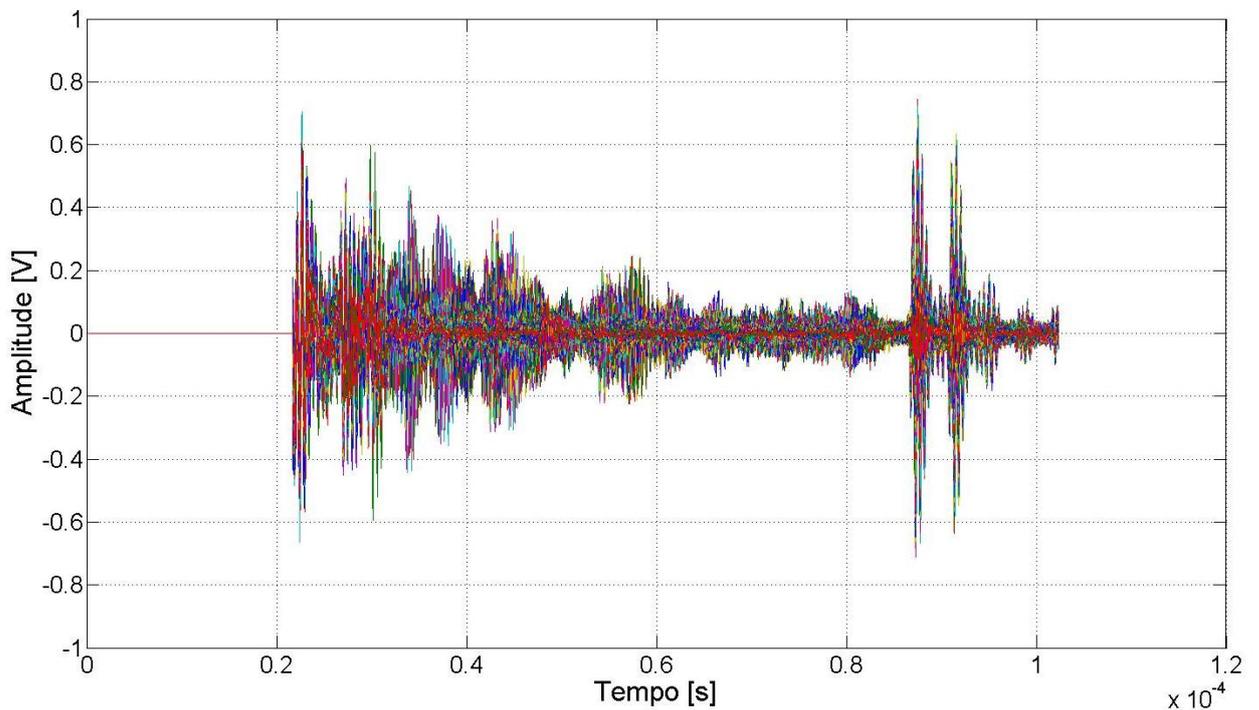
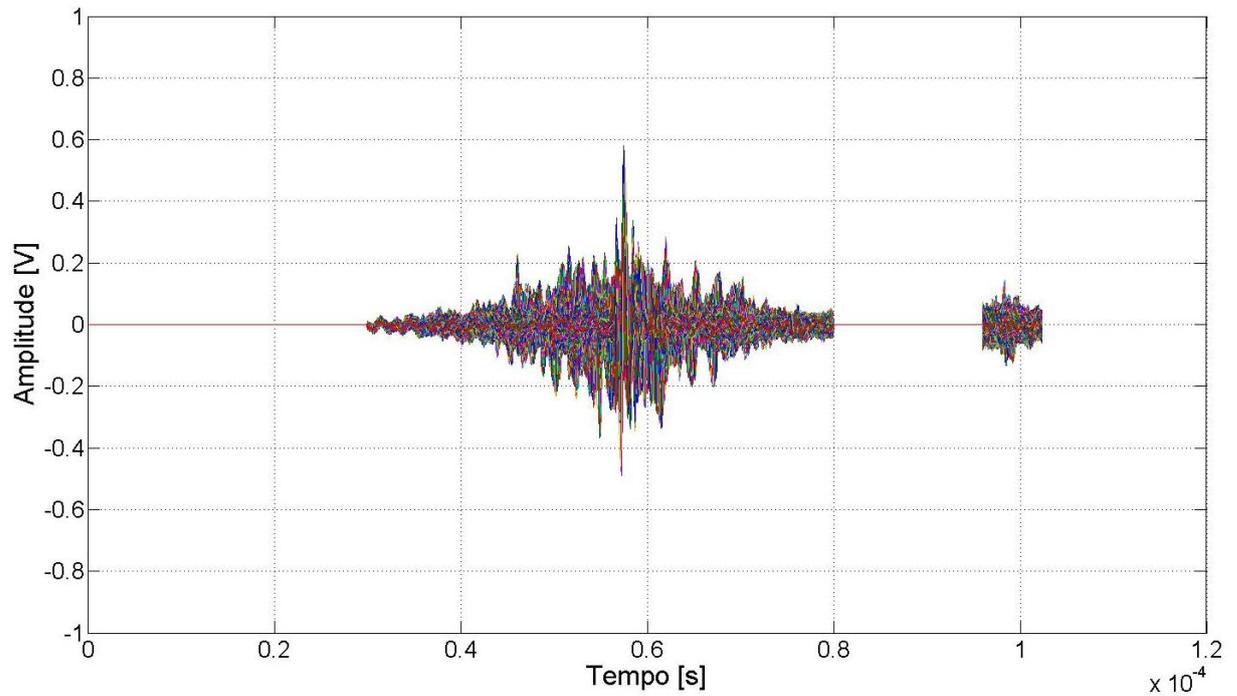
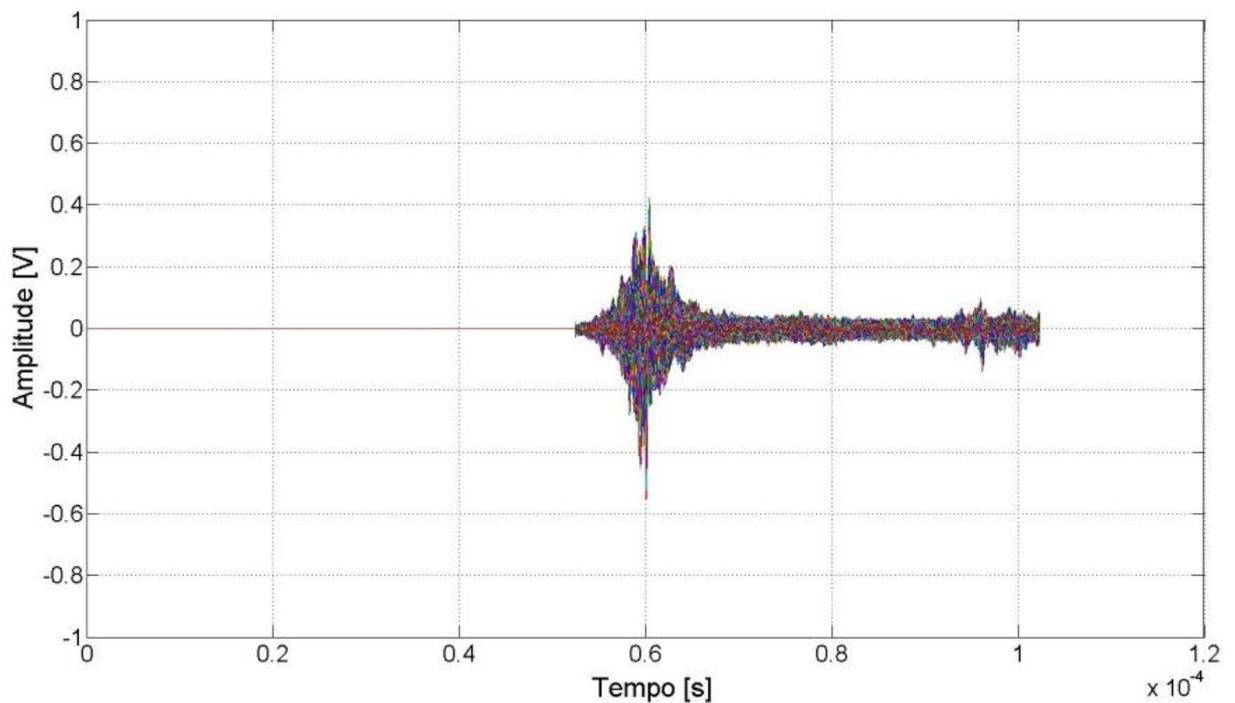


Figura 21: Janela de atividade do sensor a 0°.



**Figura 22: Janela de atividade do sensor a 45°.**



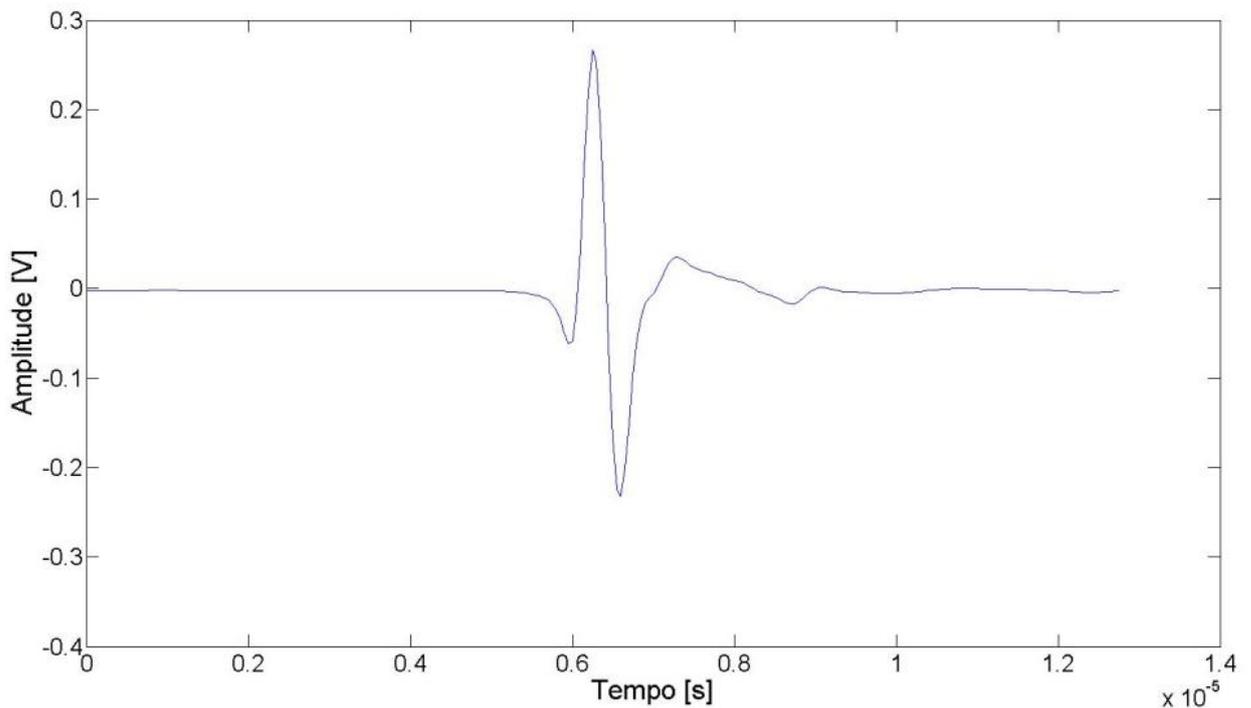
**Figura 23: Janela de atividade do sensor a 135°.**

A reflexão é o fenômeno que possibilita o direcionamento de uma parcela do sinal emitido para os sensores laterais e o pulso-eco. Esse fenômeno acontece devido às interfaces acrílico-água e, principalmente, água-ar (bolhas) presentes ao longo do caminho ultrassônico. Estas últimas não possuem forma definida tampouco posição fixa. Isto faz com que sinais provenientes das reflexões eventualmente se superponham àqueles que não carregam

nenhuma informação acerca do escoamento, tornando-se impossível rejeitar esse período do sinal.

### 3.2.4 Filtragem no domínio da frequência

No domínio da frequência não foi possível distinguir os componentes da onda acústica para nenhum dos sensores. Aparentemente, a frequência de ambas são próximas, senão iguais, dificultando a identificação no espectro. A Figura 24 mostra o pulso médio de uma amostra do sensor a  $180^\circ$  e a Figura 25 mostra o espectro deste sinal. Nota-se que o espectro é composto por frequências em uma estreita faixa que compreende às ondas longitudinal e transversal. Retirando estas frequências, ao retornar o sinal para o domínio do tempo, resta somente o ruído intrínseco ao sinal adquirido (Figura 26). Logo, as frequências alheias a esta faixa representam o ruído recebido e podem ser facilmente cortadas. Dessa forma, o ruído poderia ser retirado do sinal obtido, minimizando o erro nos cálculos dos parâmetros acústicos e tornando os resultados mais confiáveis.



**Figura 24: Pulso recebido pelo sensor a  $180^\circ$  no domínio do tempo.**

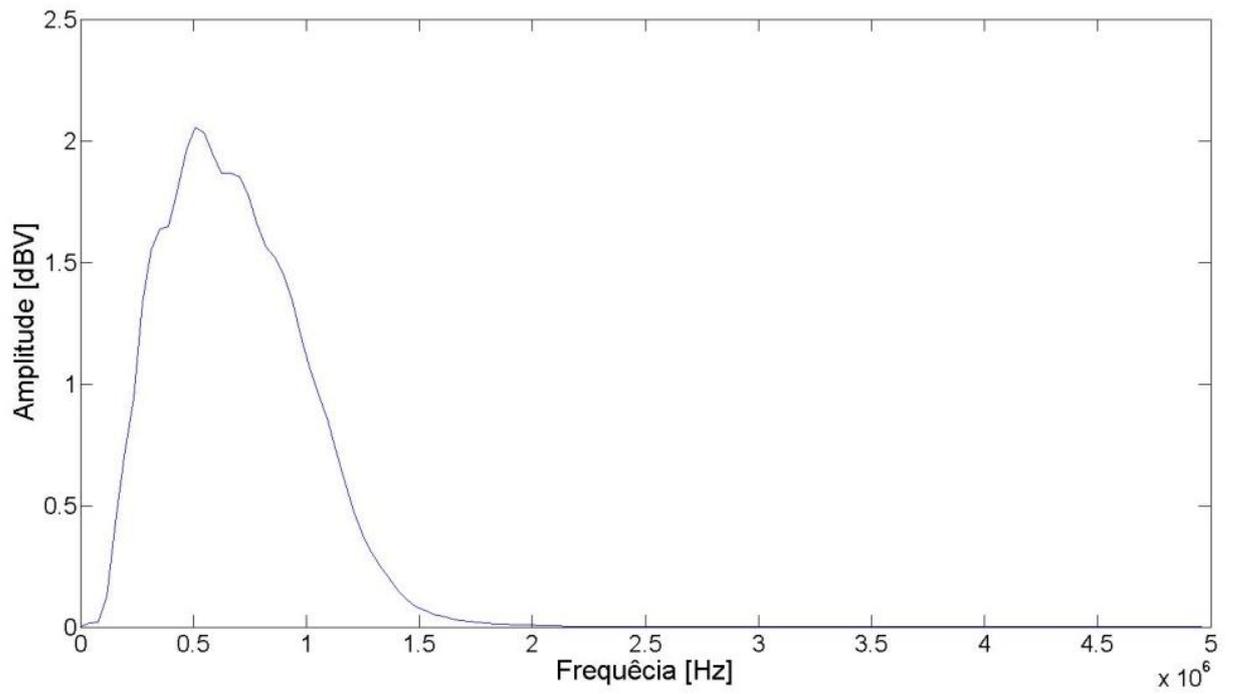


Figura 25: Espectro de frequência médio do pulso recebido pelo sensor a 180°.

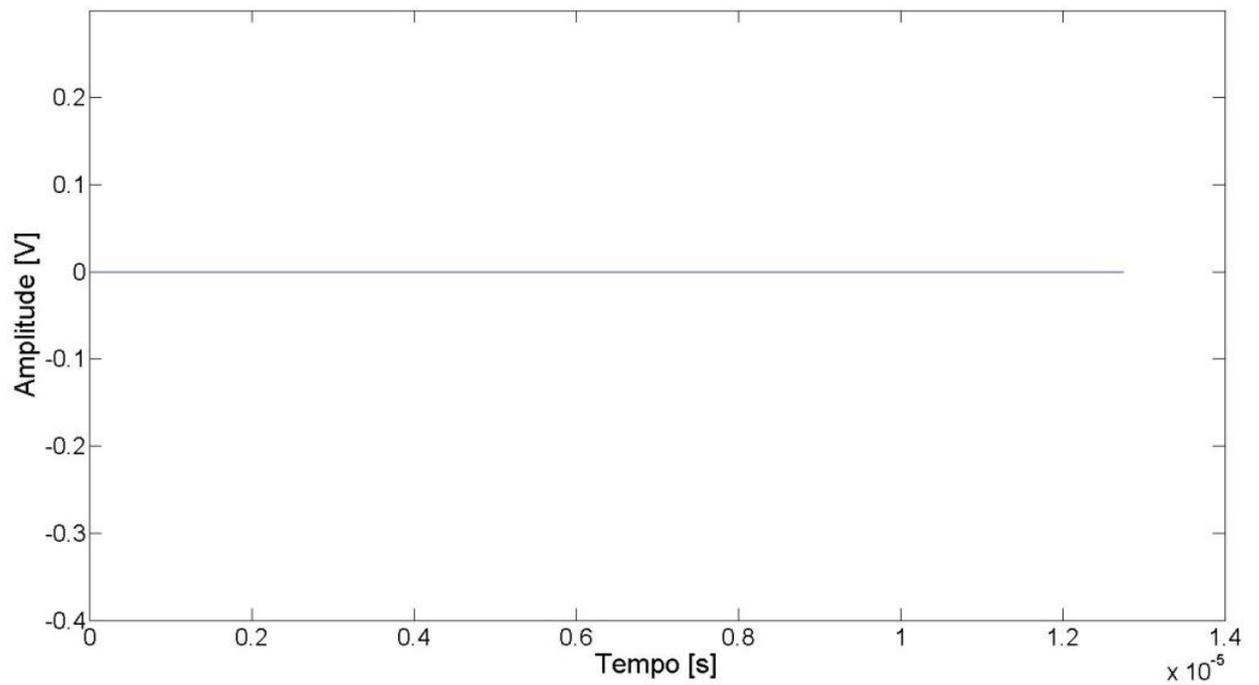


Figura 26: Sinal filtrado do sensor a 180° no domínio do tempo.

### **3.3 ATENUAÇÃO ACÚSTICA EM FUNÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIO**

Referindo-se à Figura 2, o sensor a  $180^\circ$  recebe o sinal acústico em transmissão direta, obtendo-se assim um pulso característico ao longo de toda a faixa de frações de vazio estudada. O sinal é atenuado ao passar pelo escoamento bifásico, porém, suas características originais são mantidas, podendo ser sempre comparadas com o sinal no escoamento monofásico. Os demais sensores ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $135^\circ$ ) também desempenham um papel importante no presente estudo, porém, pelo fato de receberem os sinais provenientes das reflexões ocorridas ao longo do trajeto da onda acústica no escoamento, e essas reflexões serem aleatórias, não é possível caracterizar um sinal tão facilmente quanto para o sensor a  $180^\circ$ . Em resumo, deve-se analisar o conjunto dos sinais de modo a se obter informações confiáveis acerca do escoamento.

#### **3.3.1 Análise do sinal ultrassônico em transmissão direta (sensor a $180^\circ$ )**

A Figura 27 mostra um sinal típico recebido pelo transdutor em transmissão direta ( $180^\circ$ ). Cronologicamente, o primeiro sinal que aparece no gráfico (disparo) é apenas uma marcação do instante em que o equipamento excita o transdutor emissor, gerando o sinal emitido. O segundo sinal que aparece no gráfico representa o primeiro sinal que chega ao receptor a  $180^\circ$ . Esse sinal é a onda longitudinal que atravessa o escoamento água-ar e tubulação de acrílico. Por fim, o terceiro sinal (segundo pulso recebido) é a outra componente da onda sonora, onda transversal, gerada na interface água-acrílico (ponto H da Figura 2). Ela se propaga a uma velocidade mais baixa e atinge o receptor alguns instantes após a onda longitudinal atingir o receptor.

Conforme citado acima, as características principais do pulso não são modificadas à medida que se aumenta a fração de vazio (Figura 28). O tempo entre o disparo e o começo da chegada do sinal no receptor é praticamente o mesmo, sendo verdade também para a duração do pulso, intervalo de tempo entre o começo da sua chegada e o momento em que o sinal morre. O aumento da quantidade de ar presente no escoamento faz somente diminuir gradualmente a amplitude do sinal recebido.

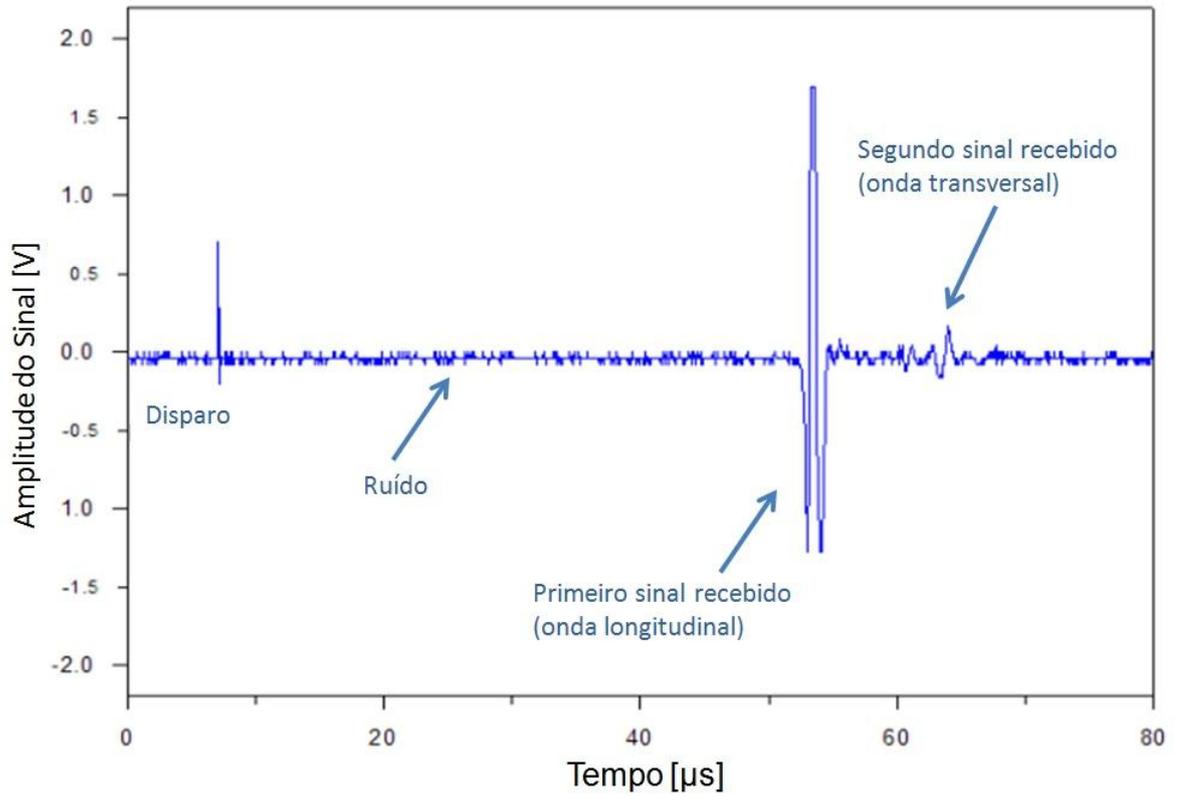


Figura 27: Sinal típico recebido pelo sensor em transmissão direta ( $180^\circ$ ).

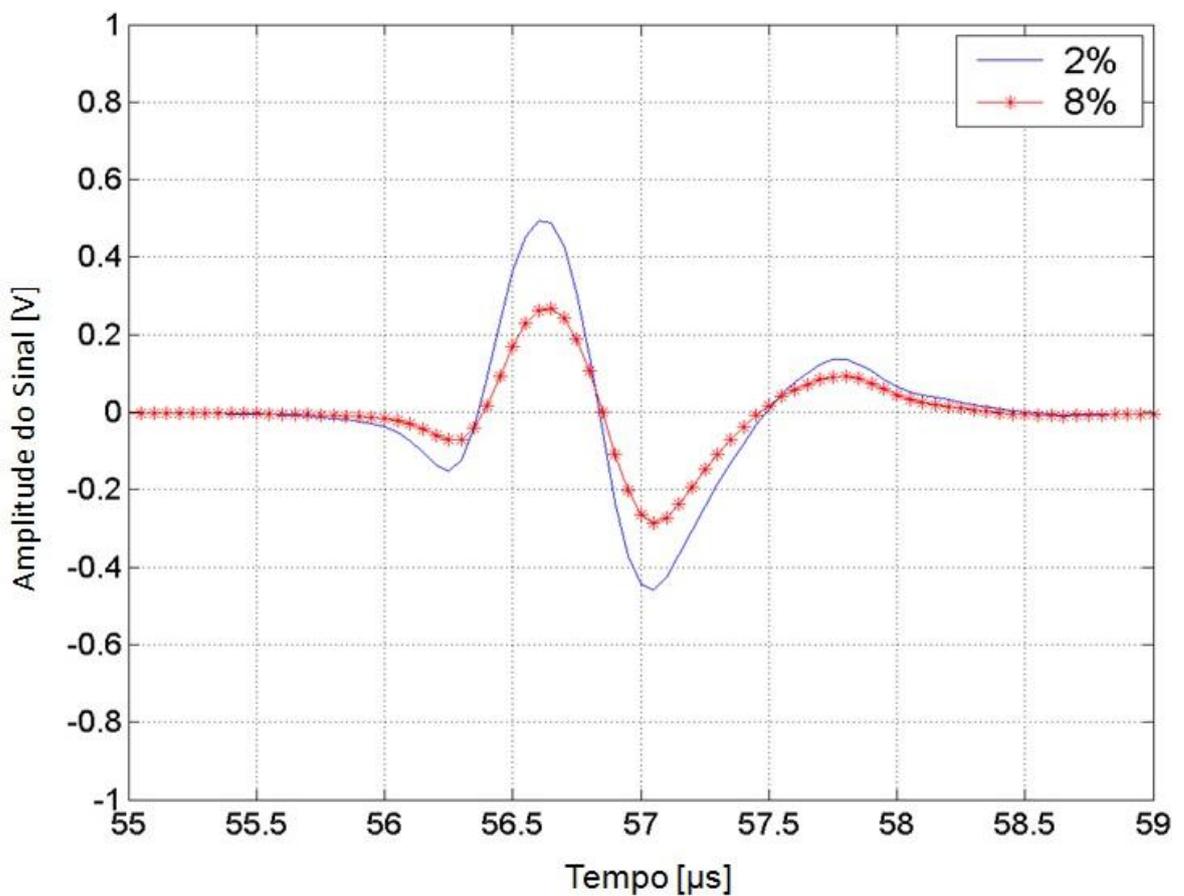


Figura 28: Sinal médio da onda recebida pelo sensor a  $180^\circ$  para  $\alpha=2\%$  e  $\alpha=8\%$ .

De toda a janela de aquisição do sinal, desde o disparo até depois da onda transversal gerada na interface água-acrílico chegar completamente no receptor a 180°, somente uma parcela é significativa para estudo. Esta parcela significativa recebeu o nome de janela de atividade do sinal e representa a porção da janela de aquisição efetivamente afetada pelo escoamento bifásico. A delimitação desta janela de atividade foi feita tentando-se cercar no sinal apenas os intervalos que apresentavam variações com a fração de vazio. Desta forma, eliminam-se erros sistemáticos dos resultados e a capacidade computacional requerida para armazenamento e tratamento dos dados é menor.

Quantitativamente, para se medir a atenuação do sinal, foi preciso adotar um parâmetro acústico que fosse capaz de representar os efeitos dessa interação da onda acústica com o escoamento bifásico água-ar e a tubulação. Os dados ultrassônicos adquiridos mostraram que a amplitude do primeiro mínimo do sinal da onda longitudinal era muito mais sensível às variações da fração de vazio do que os outros pontos de máximo e mínimo do mesmo sinal. Assim, a amplitude do sinal foi tomada como sendo o primeiro mínimo do sinal imediatamente após sua chegada no receptor; matematicamente, esse ponto é identificado como um ponto de inflexão.

Outra alternativa, a energia carregada pelo pulso ultrassônico pode ser facilmente calculada através da integração do quadrado da amplitude do sinal ao longo do seu período de duração. Essa integral pode ser resolvida de forma numérica, Equação (3), e com auxílio computacional.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} I^2 dt \quad (3)$$

Ambos os parâmetros acústicos, energia e amplitude, foram normalizados pelos valores correspondentes do sinal ultrassônico atravessando o meio monofásico, somente água. A Equação (4) mostra a normalização da energia. Um terceiro parâmetro, tempo de trânsito, é discutido nas próximas seções.

$$\frac{E_{2\phi}}{E_{1\phi}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I_{2\phi}^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} I_{1\phi}^2 dt} \quad (4)$$

A Figura 29 mostra um gráfico comparativo entre os parâmetros acústicos razão de amplitude e razão de energia em função da fração de vazio. As funções exponenciais de ajuste de curva geraram coeficientes de correlação de 0,996 e 0,994 para a energia e amplitude, respectivamente. Apesar da boa correlação com a fração de vazio, somente a razão de energia foi levada adiante, pois para os demais receptores alocados ao longo do perímetro da tubulação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $135^\circ$ ), a definição de amplitude não pode ser aplicada.

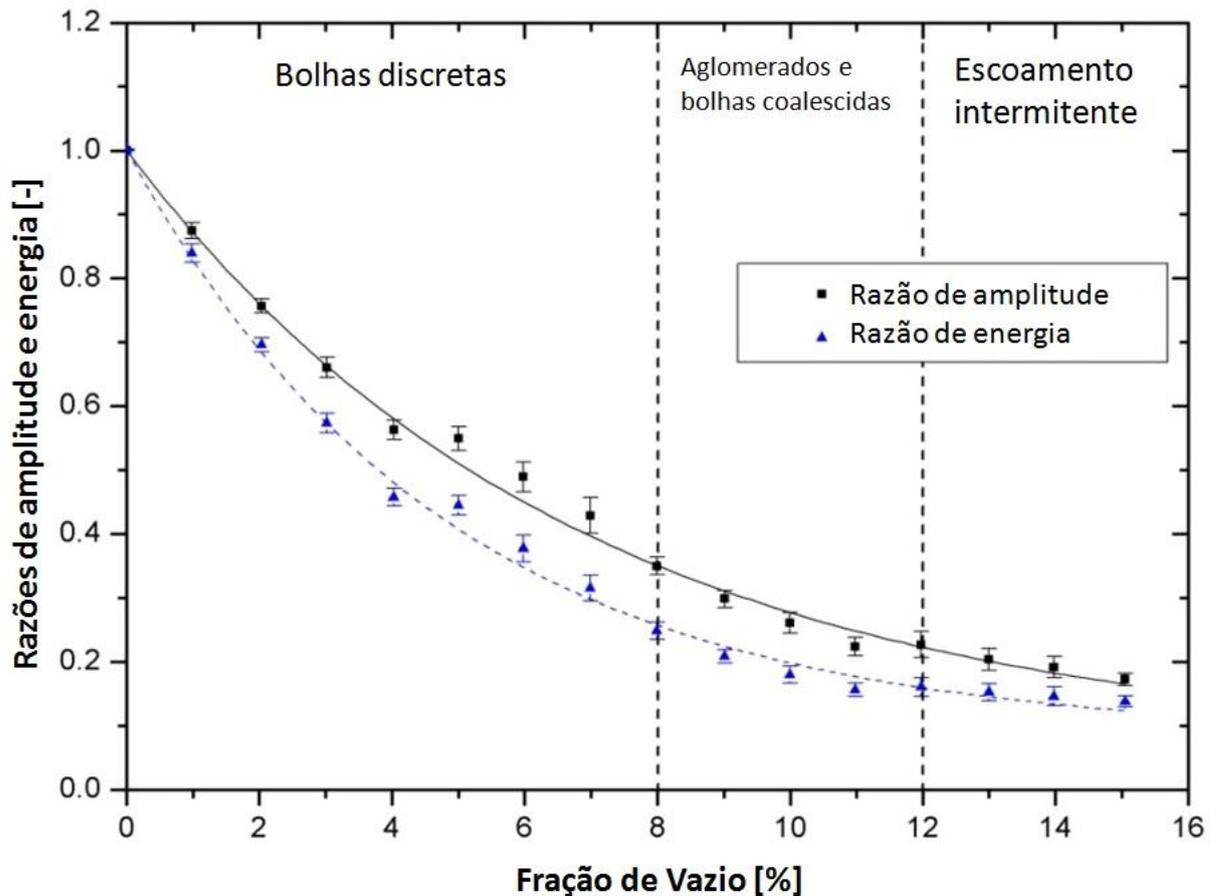


Figura 29: Razões de energia e amplitude em função da fração de vazio.

A Figura 30 mostra a razão de energia em função da fração de vazio e da densidade da área interfacial. Verifica-se que um aumento de 15 vezes na fração de vazio corresponde a um aumento de 10 vezes na densidade da área interfacial. Por outro lado, a dependência da razão de energia com relação à fração de vazio e densidade da área interfacial é muito parecida. Logo, a fração de vazio foi considerada o parâmetro mais apropriado para descrever as condições do escoamento bifásico água-ar devido à sua maior sensibilidade e maior facilidade de cálculo.

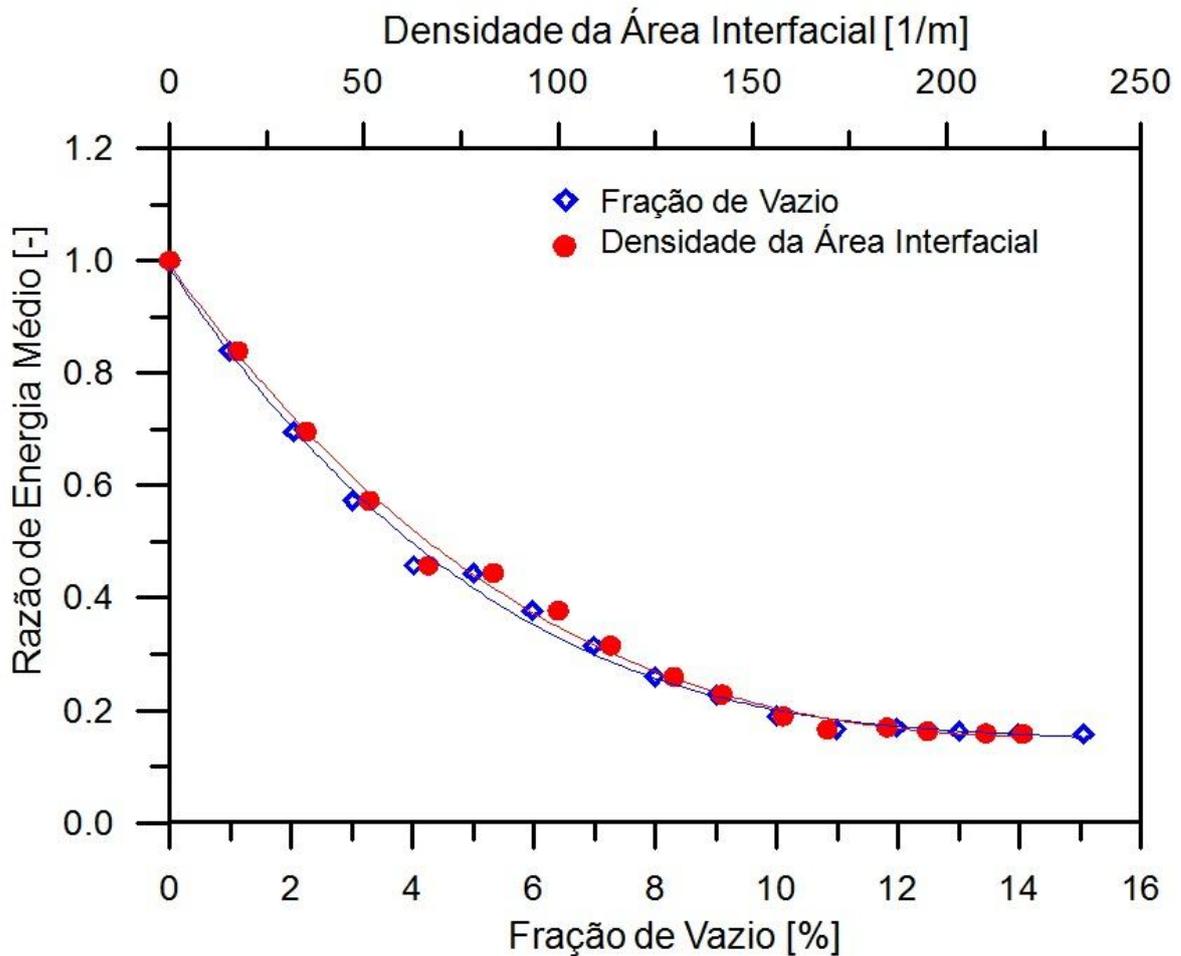


Figura 30: Razão de energia em função da área interfacial e razão de energia.

A Figura 31 mostra a razão de energia em função da fração de vazio para todas as séries de dados que foram adquiridas (Tabela 3). Pode-se observar que as séries n° 4, 5 e 6 concordam entre si, enquanto que as séries n° 1 e 2 estão acima e abaixo destas, respectivamente. Os coeficientes de correlação das curvas de ajuste das séries n° 1, 2, 3, 4, 5 e 6 são, nesta ordem, 0,996, 0,999, 0,995, 0,999 e 1,000. Portanto, todas as séries de dados apresentaram uma boa correlação. Apesar da boa correlação em todas as séries, há uma variação significativa nos valores numéricos de uma série a outra. O tempo de amostragem de 1,75 s é muito pequeno e não deve ser usado. A diferença entre as curvas para os tempos entre 2,98 e 15,61 s é menor, porém, significativa; esta diferença aumenta conforme o escoamento progride dentro do regime de escoamento borbulhante. A partir da fração de vazio de 12%, as curvas tendem para um mesmo ponto, momento em que o feixe acústico começa a ser severamente bloqueado pelas bolhas de Taylor incipientes, tornando o efeito do tempo de amostragem menos significativo.

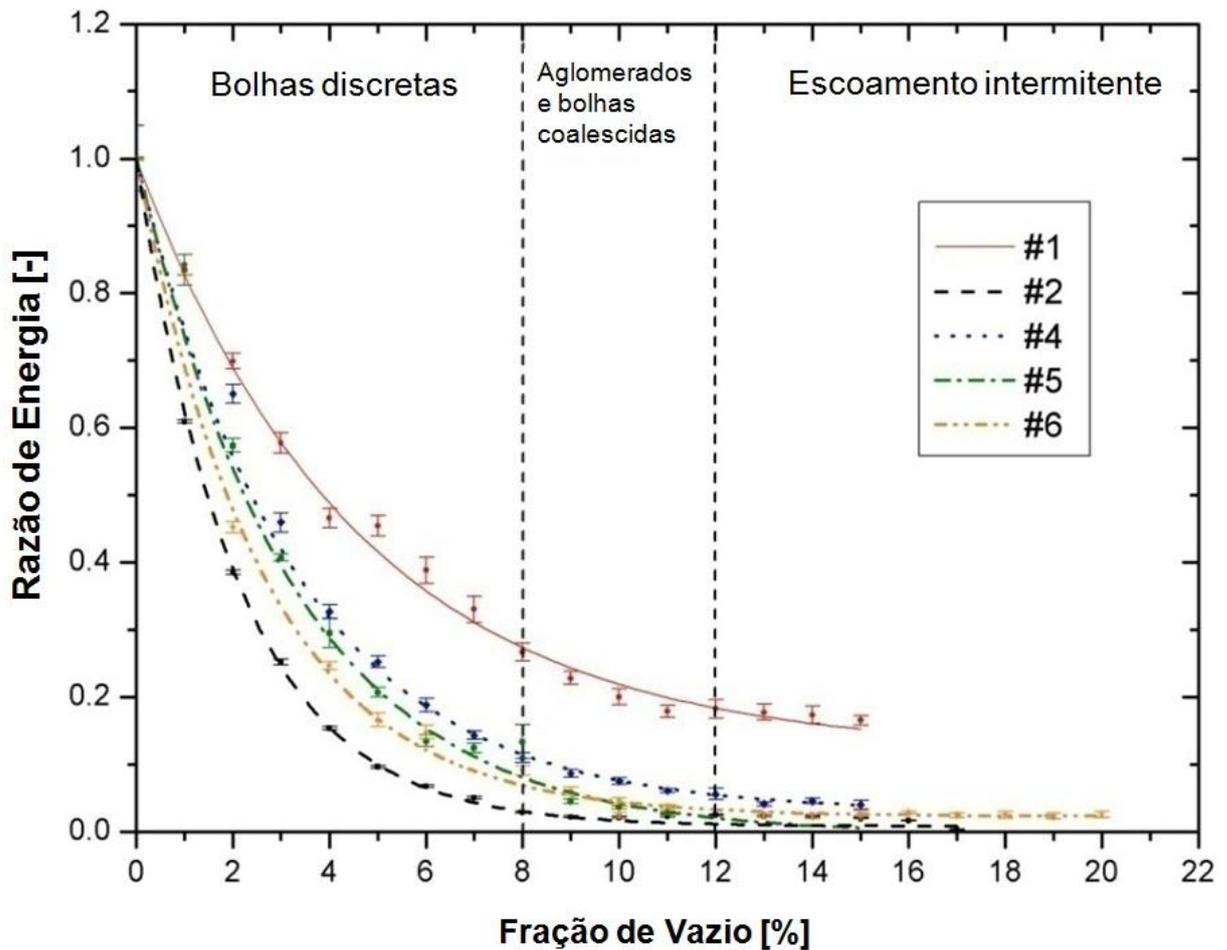
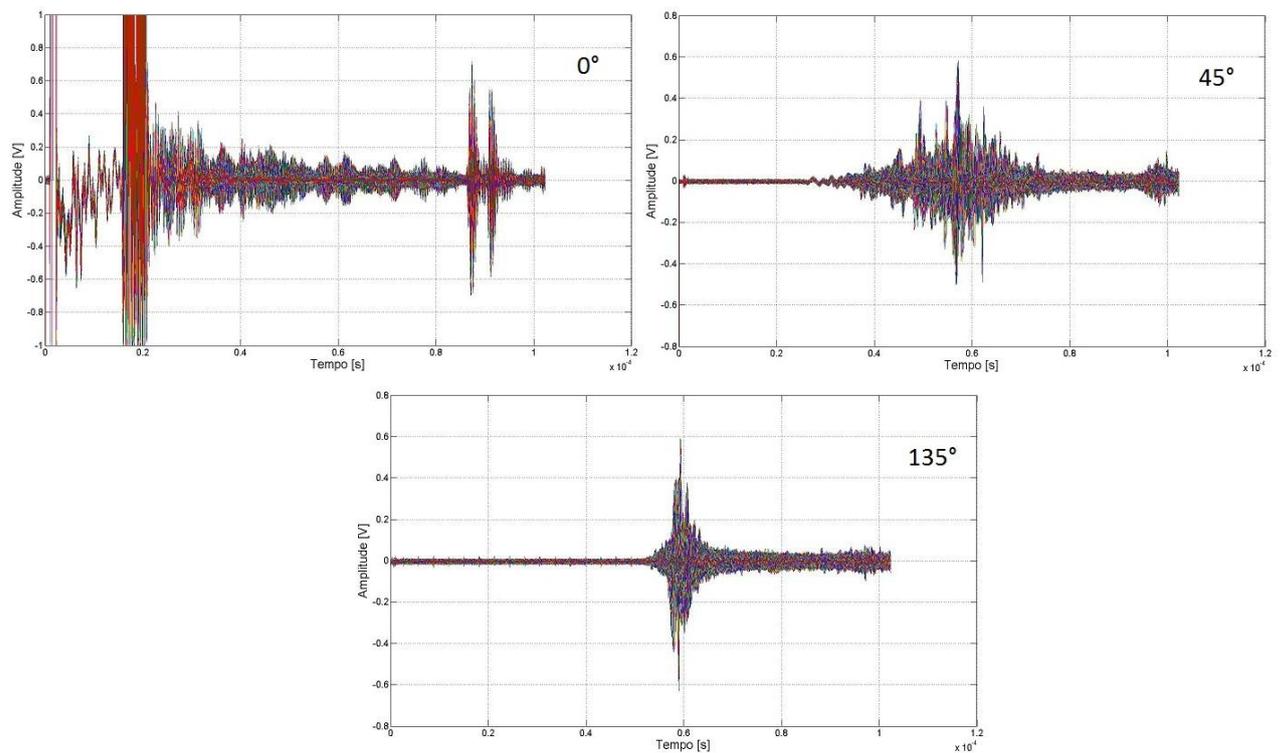


Figura 31: Razão de energia em função da fração de vazio para todas as séries de dados.

### 3.3.2 Análise dos sinais ultrassônicos dos receptores a 0°, 45° e 135°

Um sinal ultrassônico característico para os sensores a 0°, 45° e 135° não pôde ser identificado como foi feito para o sensor a 180°. Logo, não foi possível identificar tempo de trânsito e amplitude para estes sinais, tendo-se calculado apenas as razões de energia. A Figura 32 mostra todos os pulsos adquiridos de uma única amostra superpostos para cada um desses três sensores. Nota-se que, em todos os gráficos, os pulsos individuais diferem uns dos outros dentro da mesma amostra. Essa diferença ocorre devido ao grande espalhamento e flutuações dos sinais ao longo de todo o período de aquisição dos mesmos. A causa dessas variações são as reflexões aleatórias que tornam possível a divergência de uma quantidade expressiva do feixe acústico na direção de cada um desses sensores. A região de atividade, ou seja, a região afetada pelo escoamento bifásico se encontra na parte com mais flutuações da janela de aquisição do sinal. Por esta razão, fez-se necessário um tratamento preliminar do sinal para se descobrir exatamente em qual intervalo de tempo se encontrava a região de atividade,

mostrada anteriormente; O cálculo da energia recebida por esses sensores foi feito utilizando somente o intervalo de tempo da região de atividade, assim delimitada.



**Figura 32: Pulsos superpostos de uma amostra dos sensores  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $135^\circ$ .**

A Figura 33 mostra a razão de energia média em função da fração de vazio para o sensor a  $0^\circ$  (modo pulso-eco). A razão é referenciada ao escoamento monofásico, somente água, e corresponde ao sinal refletido na segunda interface água-acrílico no caminho ultrassônico (ponto H da Figura 2). As informações nesse sinal referem-se à transmissão através do escoamento bifásico e às reflexões provocadas pelas estruturas gasosas presentes no caminho ultrassônico. No sub-regime de bolhas discretas, nota-se que existe uma queda exponencial do sinal. Isso ocorre devido ao aumento na população de bolhas que bloqueia cada vez mais o caminho acústico, dificultando a passagem das ondas. No sub-regime das bolhas coalescidas, a razão de energia passa a ter um comportamento quase que constante devido aos efeitos compensatórios da atenuação do sinal e reflexões em bolhas do escoamento; ou seja, apesar do primeiro fenômeno diminuir a intensidade da energia recebida pelo sensor a  $0^\circ$ , o segundo aumenta, equilibrando a quantidade de energia que chega ao receptor. Para os níveis de fração de vazio mais altos, o aumento da razão de energia é explicado pelo fato de que o feixe ultrassônico é refletido na superfície da bolha de Taylor (ponto B da Figura 2) imediatamente após atravessar a primeira interface acrílico-água. A grande dispersão dos pontos e os grandes intervalos de incerteza nessa região são

provavelmente causados por intensas reflexões pelas bolhas de Taylor, como será visto a seguir.

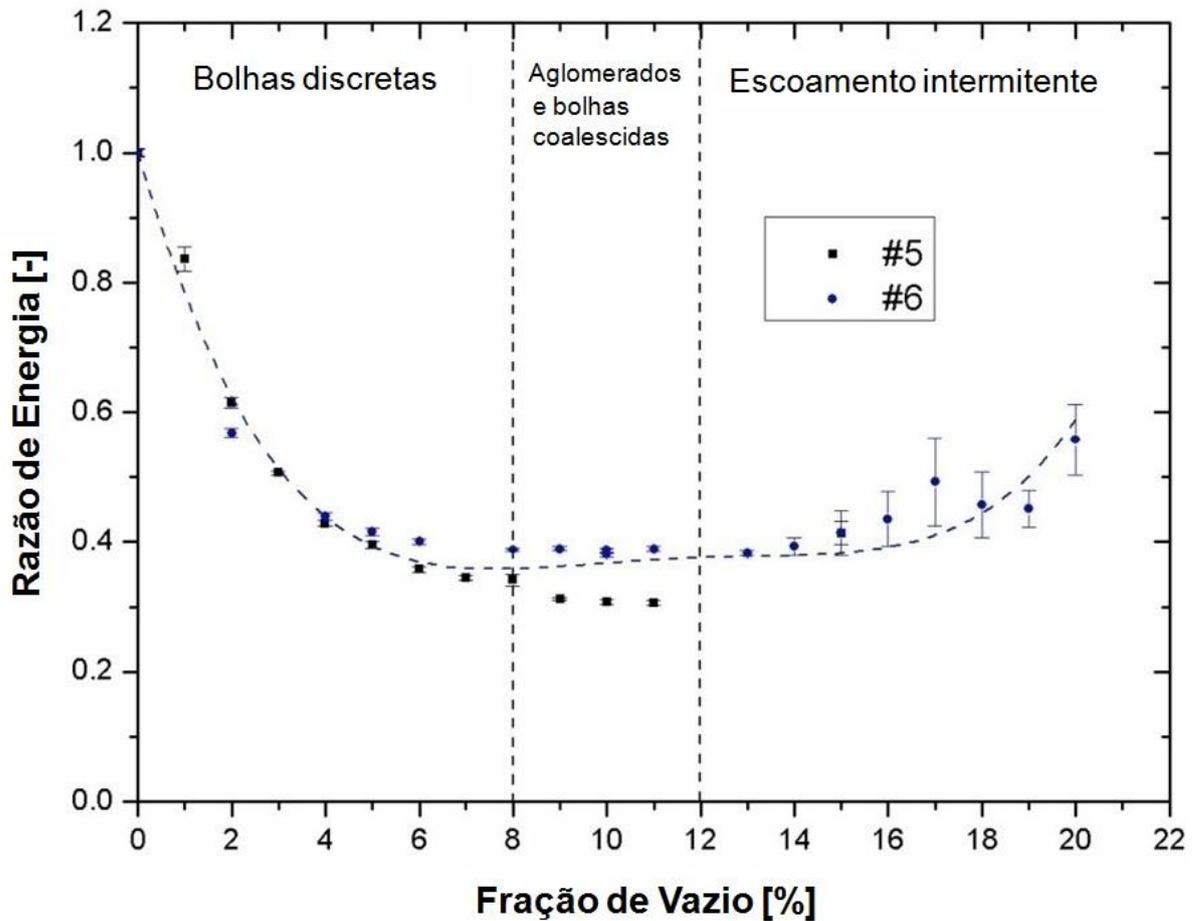


Figura 33: Razão de energia em função da fração de vazio para o pulso-eco (0°).

A Figura 34 e a Figura 35 mostram a atenuação acústica resultante para os sensores a 45° e 135°, respectivamente. Para esses sensores, não foi possível utilizar o escoamento monofásico como referência, pois para essa condição esses receptores não recebem nenhuma energia acústica. Neste ponto, é conveniente lembrar que é justamente no escoamento monofásico que os sensores a 0° e 180° recebem o máximo da energia acústica. Logo, para qualquer valor da fração de vazio tem-se valores da razão de energia menores do que a unidade. Portanto, a fim de manter este mesmo comportamento matemático para os sensores a

45° e 135°  $\left(0 \leq \frac{E_{2\phi}}{E_{1\phi}} \leq 1\right)$ , a referência utilizada foi a energia média recebida por esses

transdutores para  $\alpha = 11\%$ . Essa escolha foi norteadora por três motivos – existe uma grande concordância entre todas as séries experimentais nesse ponto (Figura 35), o nível de energia recebido está em seu máximo, e não há ocorrência de bolhas de Taylor.

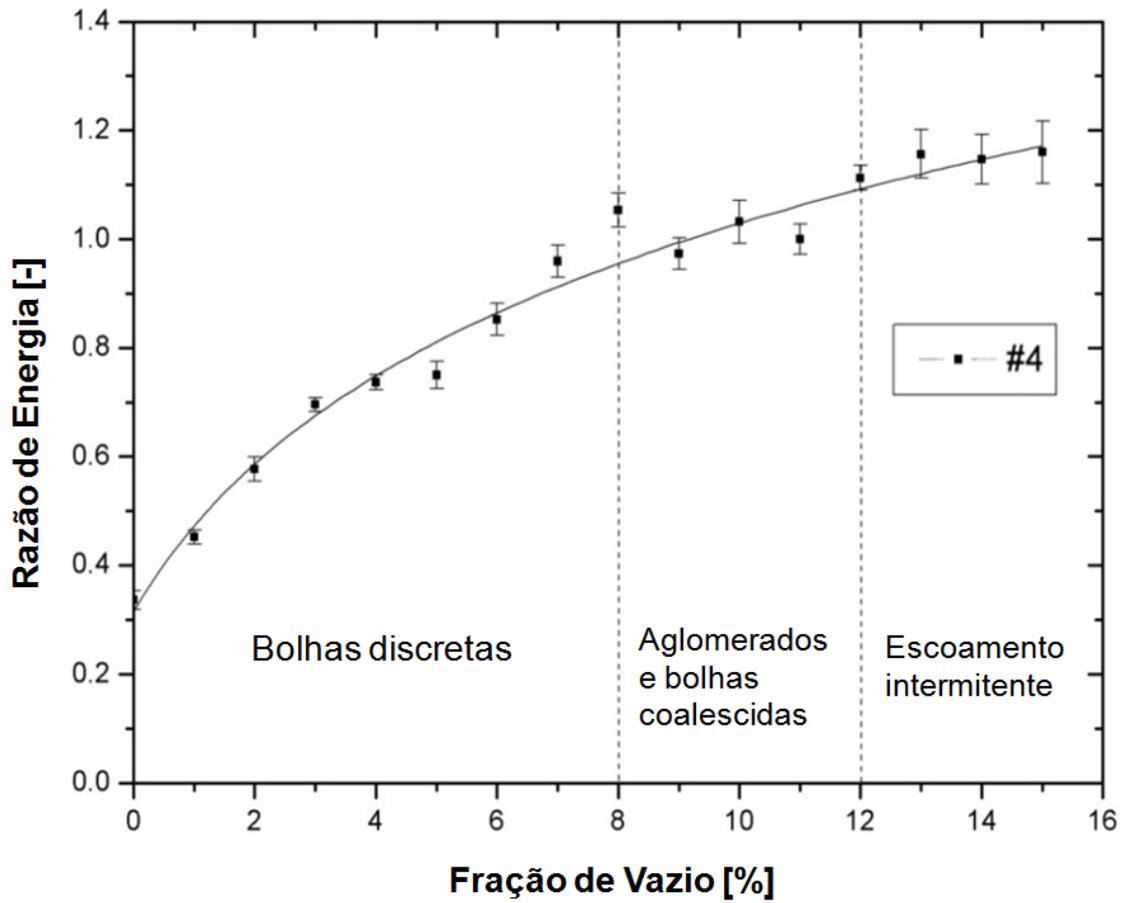


Figura 34: Razão de energia em função da fração de vazio para o sensor a 45° (série n° 4).

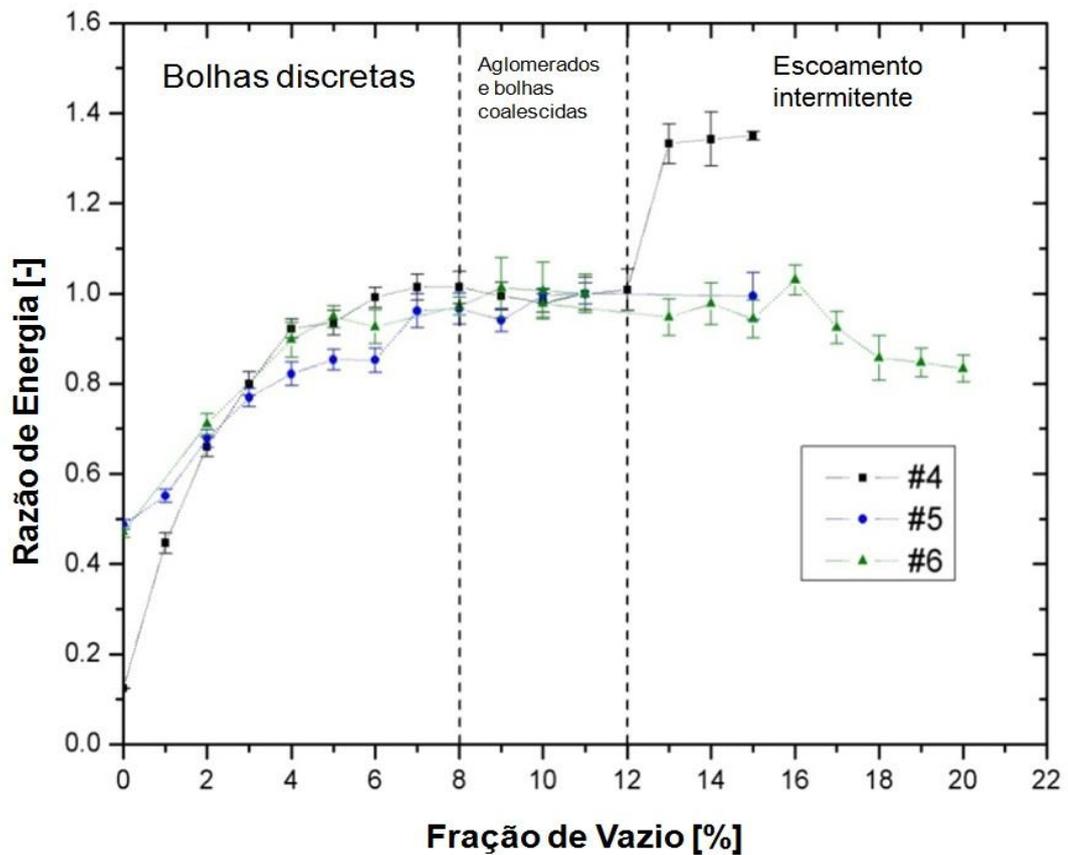


Figura 35: Razão de energia em função da fração de vazio (sensor a 135° séries n° 4, 5 e 6).

O comportamento do sensor a  $45^\circ$  (Figura 34) mostra claramente um contínuo aumento da quantidade de energia recebida ao longo de todo o intervalo de fração de vazio. Este comportamento evidencia o fato das reflexões para a periferia da tubulação aumentarem progressivamente com o aumento da ocorrência de estruturas gasosas na seção transversal da tubulação. Para o sensor a  $135^\circ$  (Figura 35), a energia recebida cresce rapidamente até  $\alpha = 7\%$  de fração de vazio; no intervalo entre  $8\%$  e  $12\%$ , os níveis de energia recebida se estabilizam. A partir deste ponto, o qual coincide com o aparecimento das bolhas de Taylor incipientes, existe uma discordância entre as séries de dados experimentais – a série n° 4 apresenta um degrau no sentido de aumentar a quantidade de energia recebida enquanto as séries n° 5 e 6 apresentam um decréscimo gradual. Uma análise dos pulsos individuais em função do tempo, discutida a seguir, mostrou que o sinal a  $135^\circ$  se comporta mais aleatoriamente nessa região; contudo, todas as três séries se referem ao mesmo tempo de amostragem e ao mesmo número de pulsos por amostra. Esperava-se, portanto, que o resultado médio fosse o mesmo.

A Figura 36 e Figura 37 mostram o comportamento de todos os sensores no regime do escoamento borbulhante em termos da razão de energia e da energia absoluta. A segunda nada mais é que a quantidade total de energia que chega ao receptor sem a normalização. Na Figura 36, pode-se notar uma clara correlação entre os sinais – o sinal recebido pelo sensor a  $180^\circ$  diminui gradualmente, evidenciando o bloqueio progressivo do feixe acústico; o sinal do modo pulso-eco (sensor a  $0^\circ$ ) não decresce até o mesmo nível por causa da parcela de energia refletida pelo escoamento. Os sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$  recebem praticamente a mesma quantidade da energia acústica, evidenciando o espalhamento essencialmente uniforme do feixe acústico ao longo de todo o perímetro da tubulação. Na Figura 37, vê-se que a partir de  $\alpha = 6\%$  os sensores a  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  e  $180^\circ$  começam a receber a mesma quantidade de energia acústica. Isso mostra que a transmissão direta através do escoamento para o sensor a  $180^\circ$  não prevalece mais sobre a energia espalhada para as outras direções.

De toda essa discussão, a principal conclusão é que todos os transdutores mantêm uma clara correlação com a fração de vazio no escoamento bifásico água-ar. Os sensores a  $180^\circ$  e  $0^\circ$  podem ser utilizados com mais facilidade para se medir a fração de vazio, pois o sinal adquirido no escoamento monofásico, somente água, pode ser utilizado como referência para ambos os receptores, as janelas de tempo que contêm os sinais recebidos são mais precisas, e eles são mais sensíveis à fração de vazio do que os sensores a  $45^\circ$  e  $135^\circ$ .

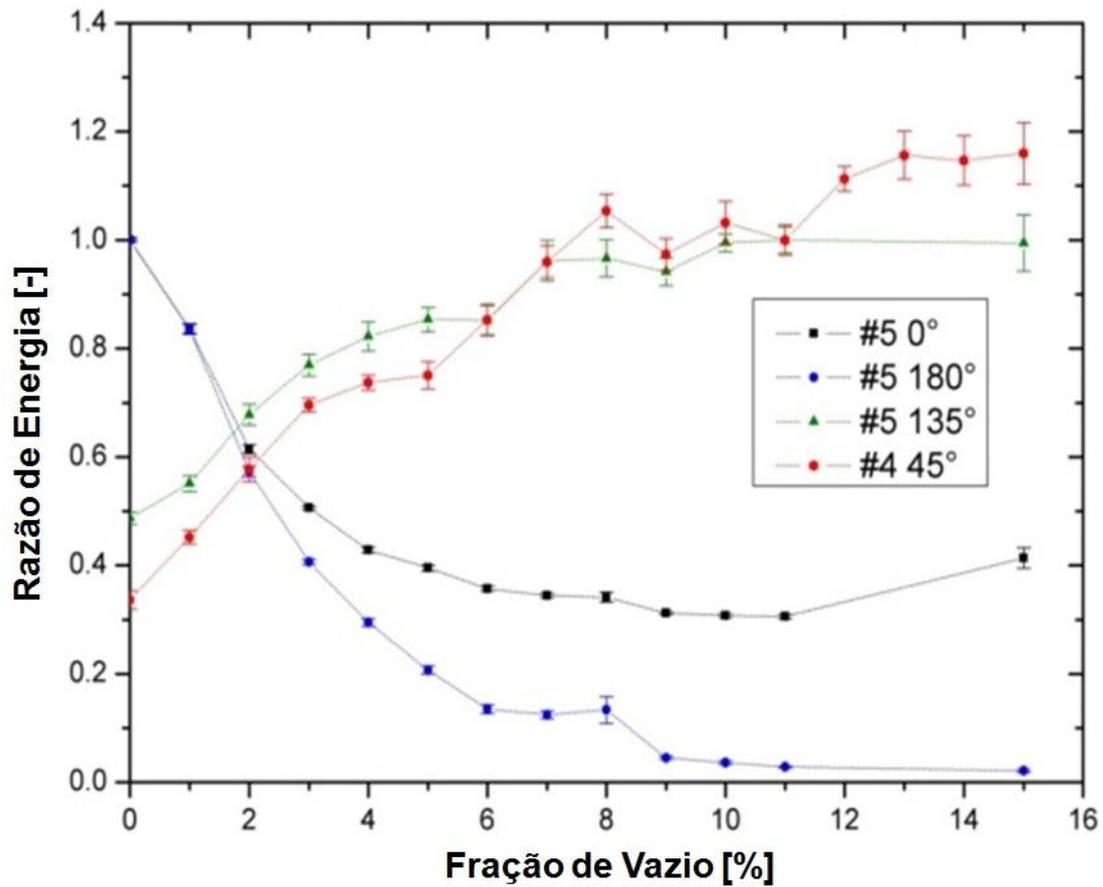


Figura 36: Razão de energia em função da fração de vazio para todos os sensores.

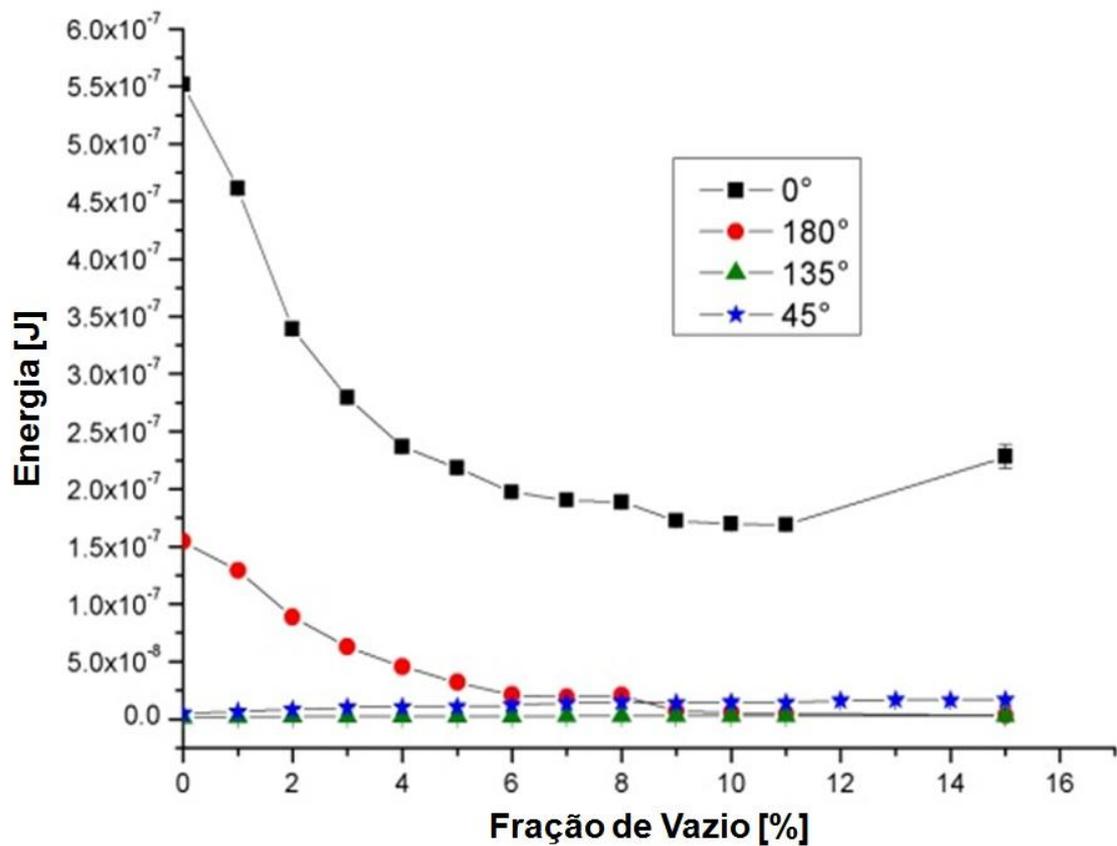


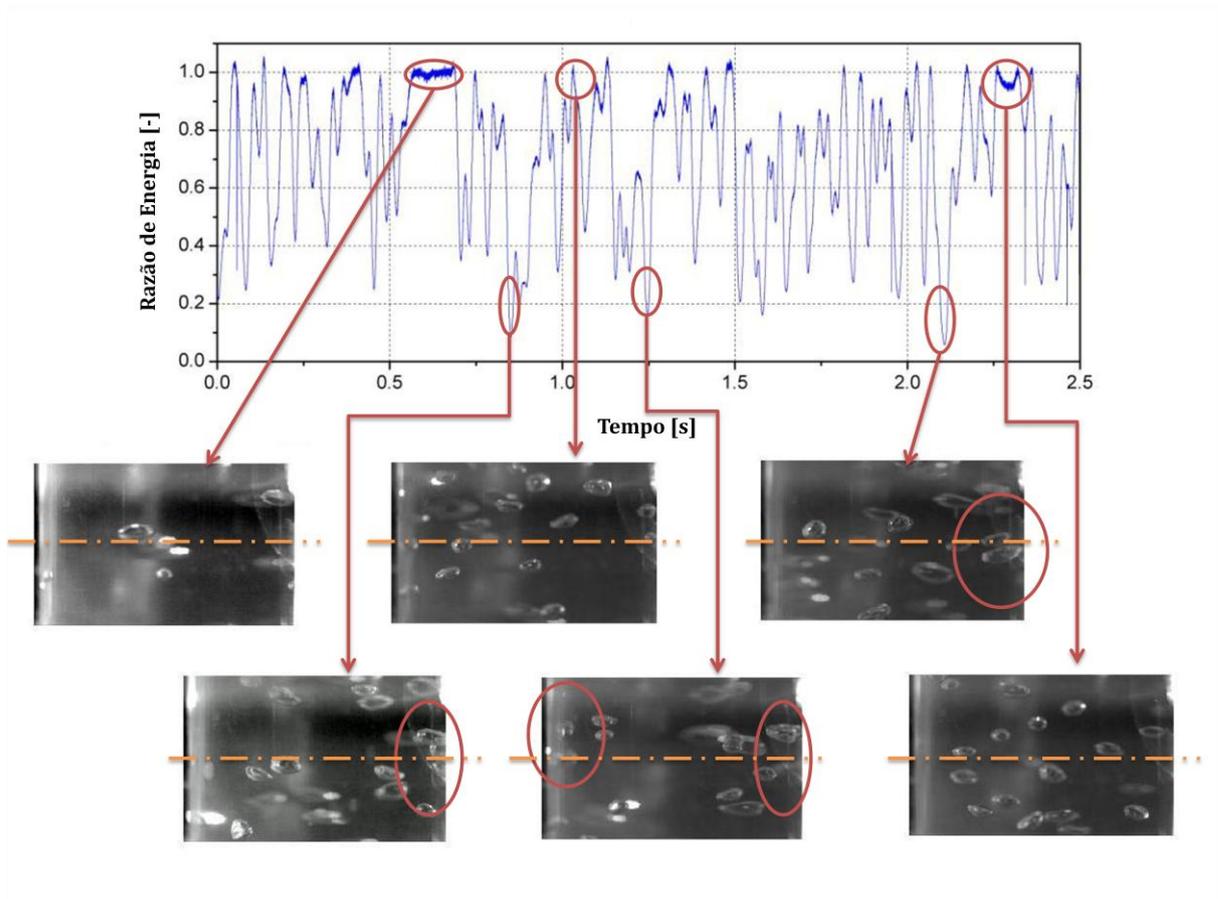
Figura 37: Energia absoluta em função da fração de vazio para todos os sensores.

## 3.4 ANÁLISE DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS SINCRONIZADOS COM AS FILMAGENS RÁPIDAS

### 3.4.1 Sinal do receptor a 180° sincronizado com as filmagens rápidas

A Figura 29 e a Figura 30 mostram uma clara correlação da atenuação acústica com a fração de vazio e a área interfacial; esses parâmetros foram determinados por Dias (29) para as mesmas condições de operação dadas nas figuras. Na ausência de um modelo da interação entre a onda ultrassônica e o escoamento bifásico para se determinar a fração de vazio a partir do ultrassom, é necessário efetuar uma aferição dos dados adquiridos. Jones *et al.* (31) desenvolveu um modelo deste tipo, mas são necessários dados empíricos e o modelo é restrito a baixas frações de vazio. A fim de se entender o fenômeno de dissipação da onda ultrassônica ao longo do seu trajeto no escoamento bifásico, foram traçados os gráficos na Figura 38 à Figura 43 que mostram as razões de energia dos pulsos individuais de uma amostra do sensor a 180° (série n° 3) em função do tempo juntamente com algumas imagens correspondentes. Nestas figuras foi indicado a posição do par de transdutores ultrassônicos (linha tracejada laranja). Os resultados podem ser resumidos da seguinte forma:

$\langle \alpha \rangle = 1\%$ : níveis de razão de energia muito baixos são relacionados com bolhas dispersas posicionadas próximas à parede da tubulação logo a frente dos sensores (Figura 38). Nas proximidades das paredes, a fração de vazio apresenta um leve decréscimo [(29)]. Todavia, esses decaimentos na razão de energia têm baixa ocorrência, o que é corroborado pelo respectivo histograma da Figura 44 – a frequência de ocorrência na faixa de 0,1 a 0,2 é de apenas 1,8%. Por outro lado, quando a razão de energia se aproxima da unidade (níveis de atenuação próximos aos níveis do escoamento monofásico de água líquida) observa-se não haver bolhas próximas aos sensores. Vale ressaltar a ocorrência significativa (7,7%) de níveis maiores que a unidade. Esse fenômeno é discutido mais adiante juntamente com o tempo de trânsito. Antecipa-se apenas que entre este fato pode estar relacionado a bolhas discretas posicionados de modo a focar o feixe ultrassônico na direção desse sensor [(31)].

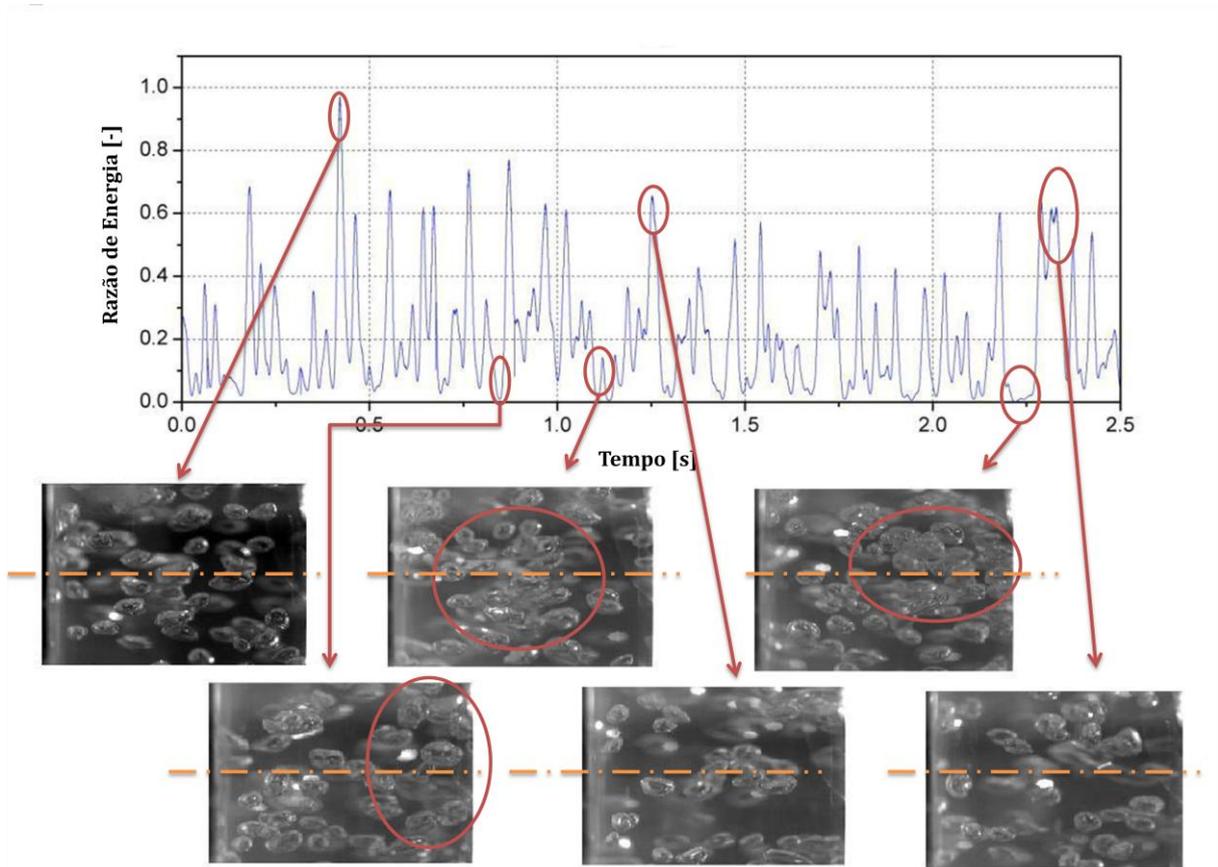


**Figura 38: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série nº 3,  $\alpha=1\%$ ).**

$\langle \alpha \rangle = 4\%$  : de forma geral, a razão de energia instantânea decai para níveis muito mais baixos do que para  $\alpha = 1\%$ , fato esperado já que a seção transversal é mais densamente ocupada pelas bolhas. Os picos maiores (razão de energia acima de 0,6) foram associados a imagens da seção transversal menos densamente povoadas por bolhas enquanto os mínimos próximos de zero foram associados a aglomerados de bolhas e/ou bolhas próximas à parede da tubulação (Figura 39). Essas estruturas gasosas compõem quase que 40% da topologia axial do escoamento de acordo com respectivo histograma (Figura 44), logo, para a frações de vazio seguintes a tendência é só aumentar as regiões onde o sinal tem baixos níveis de energia devido ao aumento na quantidade e na dimensão das bolhas.

$\langle \alpha \rangle = 8\%$  : as razões de energia são relativamente menores do que aquelas do caso anterior, mal conseguindo atingir o nível de 0,4. Nestes casos, as imagens correspondentes apresentam "clareiras" de líquido entre as bolhas. Por outro lado, imagens com a razão de energia chegando a zero mostram aglomerados de bolhas próximas à parede (Figura 40). Dias (29) observou que o perfil da fração de vazio local se mantinha constante na parte central da tubulação com um pequeno aumento perto da parede – aproximadamente 7% na porção central e 10% próximo das paredes da tubulação, o que corrobora o comportamento aqui

verificado. O correspondente histograma apresenta uma ocorrência próxima de 90% para níveis de razão de energia entre 0 - 0,1, significando que densos aglomerados de bolhas perfazem quase por inteiro a topologia do escoamento nessa fração de vazio.



**Figura 39: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série nº 3,  $\alpha=4\%$ ).**

$\langle \alpha \rangle = 10\%$ : os picos mais altos (chegando a 0,4) foram relacionados com imagens mostrando espaços vazios ou "clareiras" entre as bolhas (Figura 41); entretanto, esses picos foram eventos raros (Figura 44) com frequência de ocorrência menor que 1% (faixa entre 0,3 - 0,4). Outras imagens também mostraram clareiras, mas foram associadas a intervalos de razão de energia baixos; nesses casos, o sensor provavelmente estava bloqueado por bolhas perto da parede da tubulação. Quando a seção transversal estava preenchida por densos aglomerados de bolhas, o se manteve invariavelmente em baixos níveis de razão de energia. Finalmente, o histograma mostra uma ocorrência de 93% na faixa de 0,0 - 0,1, o que indica que estruturas gasosas como os densos aglomerados de bolhas perfazem quase integralmente a topologia do escoamento para essa fração de vazio.

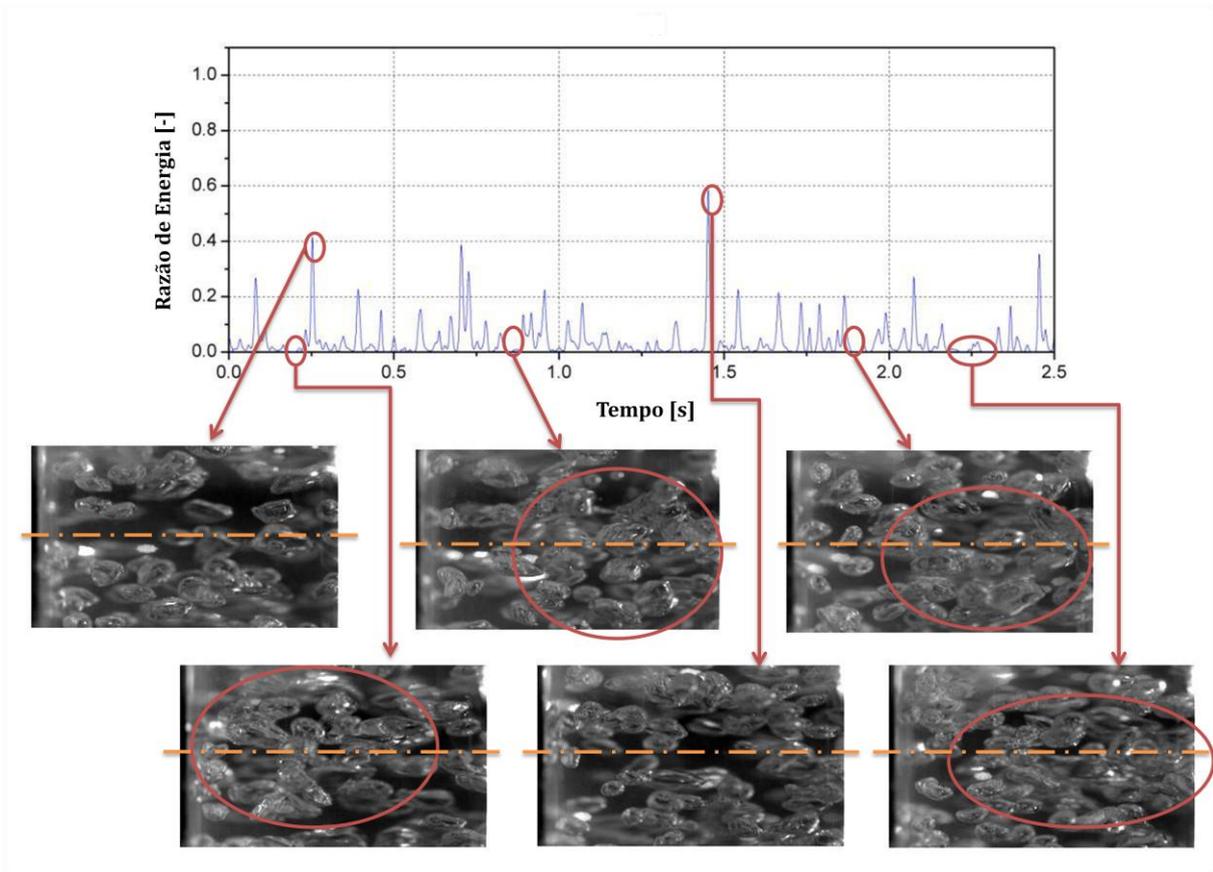


Figura 40: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série n° 3,  $\alpha=8\%$ ).

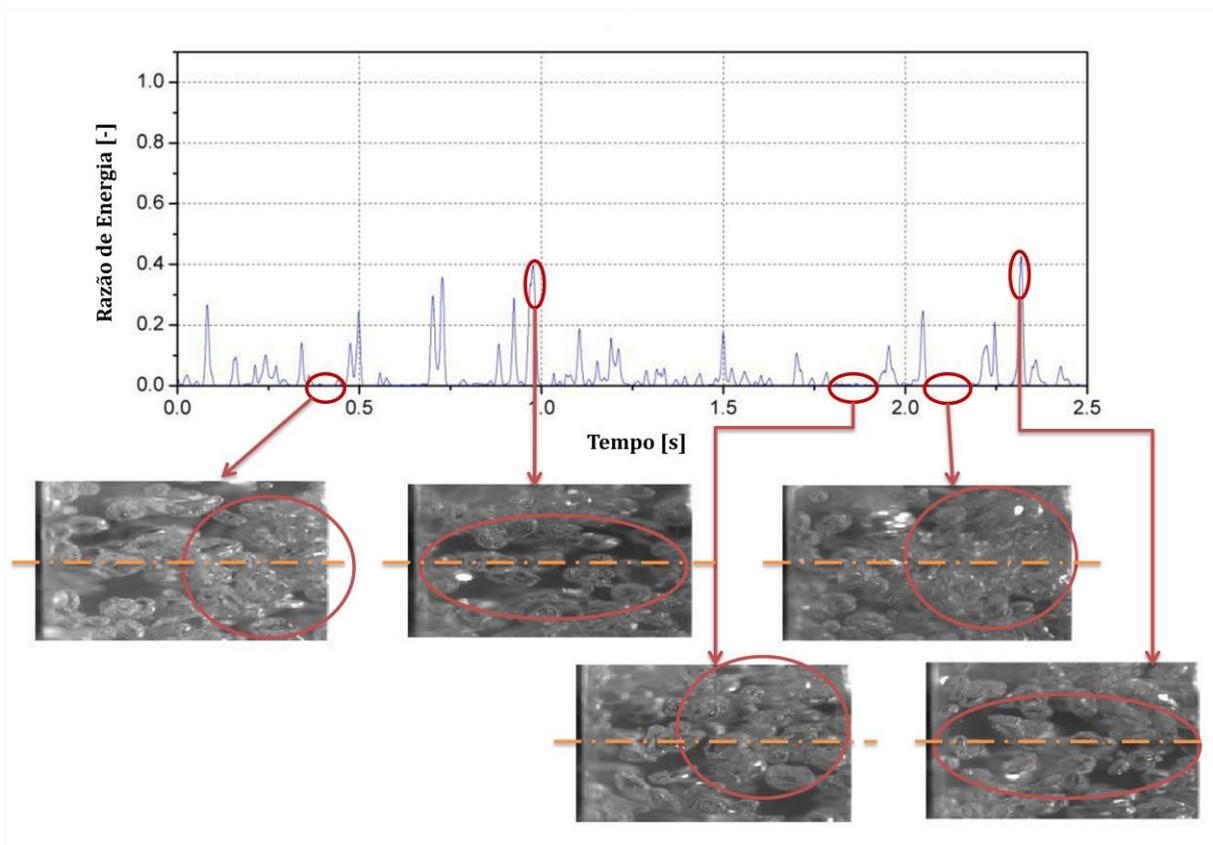
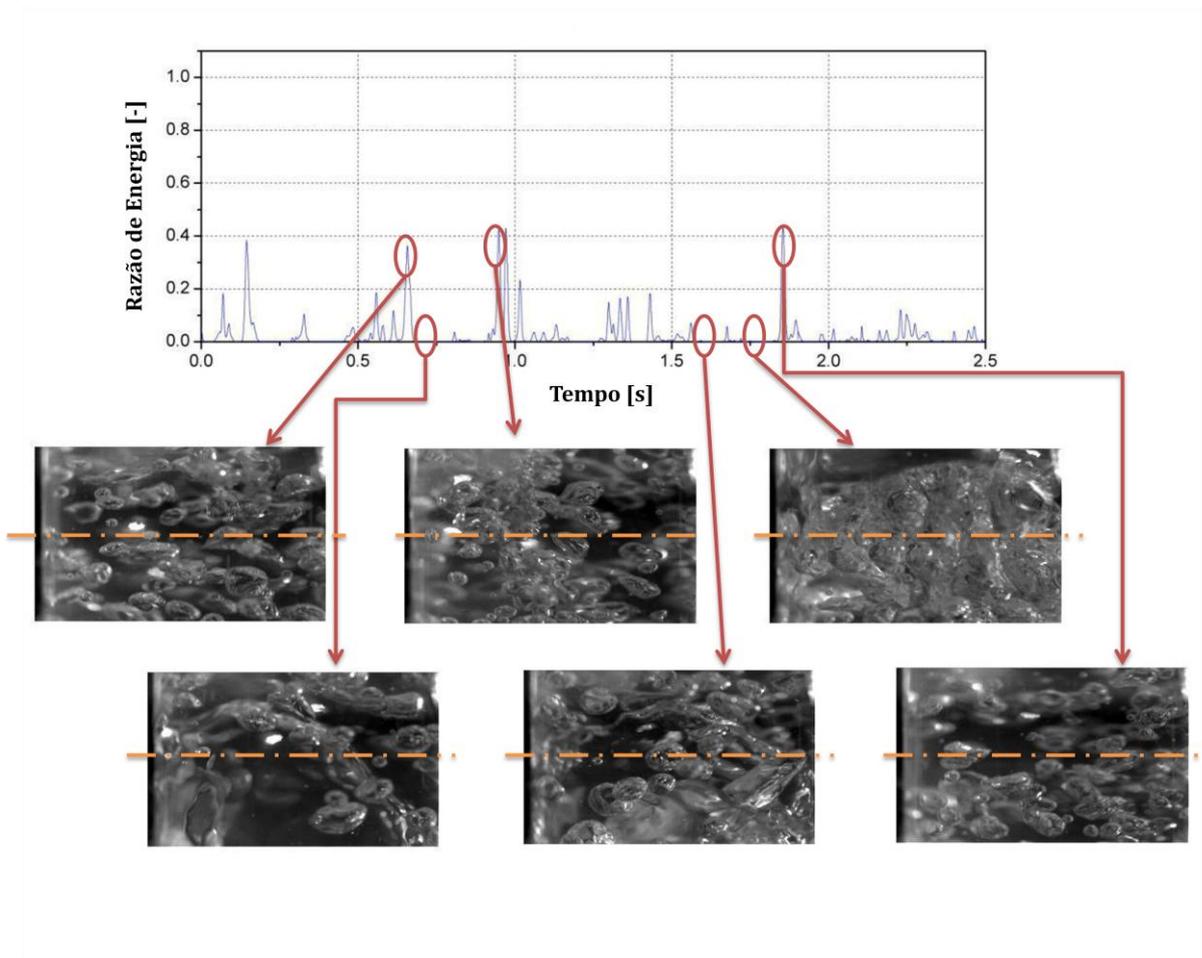


Figura 41: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série n° 3,  $\alpha=10\%$ ).

$\langle \alpha \rangle = 12\%$ : analogamente ao caso anterior, picos na razão de energia foram associados a clareiras entre as bolhas (Figura 42). Quedas nos sinais para níveis próximos de zero foram claramente associadas a calotas gasosas e a bolhas de Taylor embrionárias. Das imagens é claramente percebido que existe uma correspondência entre os picos no sinal e os discos de líquido aerado que precedem as bolhas de Taylor. O correspondente histograma é muito parecido com o do caso anterior, significando que as calotas gasosas e as bolhas de Taylor embrionárias perfazem quase toda a topologia do escoamento para essa fração de vazio.



**Figura 42:** Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série n° 3,  $\alpha=12\%$ ).

$\langle \alpha \rangle = 15\%$ : o padrão de escoamento intermitente já está firmemente estabelecido; bolhas de Taylor e discos de líquido aerado se sucedem conforme mostrado na Figura 43 juntamente com os correspondentes sinais acústicos. Mais uma vez, é observado que as bolhas de Taylor de fato bloqueiam o sinal transmitido para o sensor a  $180^\circ$  enquanto o disco de líquido permite momentaneamente um aumento na razão de energia.

Uma visão geral do perfil dos histogramas da Figura 44 mostra que o sub-regime de bolhas discretas corresponde a uma maior e mais ampla faixa de razões de energia; entretanto, o máximo é rapidamente deslocado da direita para a esquerda em decorrência do aumento de número de bolhas. Uma vez iniciada a coalescência de bolhas para 8% de fração de vazio, a frequência no intervalo de 0,0 - 0,1 de razão de energia cresce continuamente, enquanto os intervalos adjacentes não apresentam variação apreciável. Isto indica que o aumento na vazão de ar aumenta o tamanho e o número de estruturas gasosas mais complexas sem modificações significativas na população de bolhas discretas.

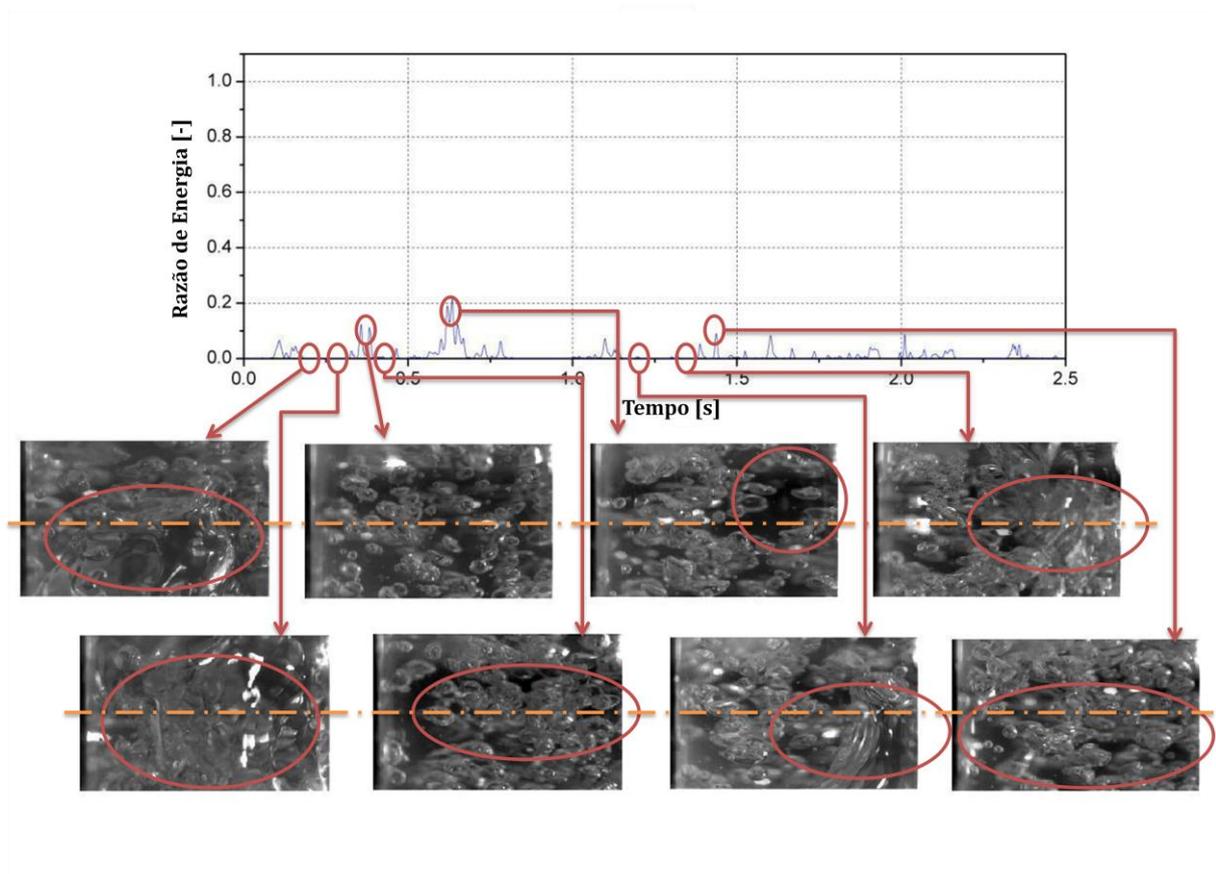


Figura 43: Energia do sinal e imagens do escoamento correspondentes (série nº 3,  $\alpha=15\%$ ).

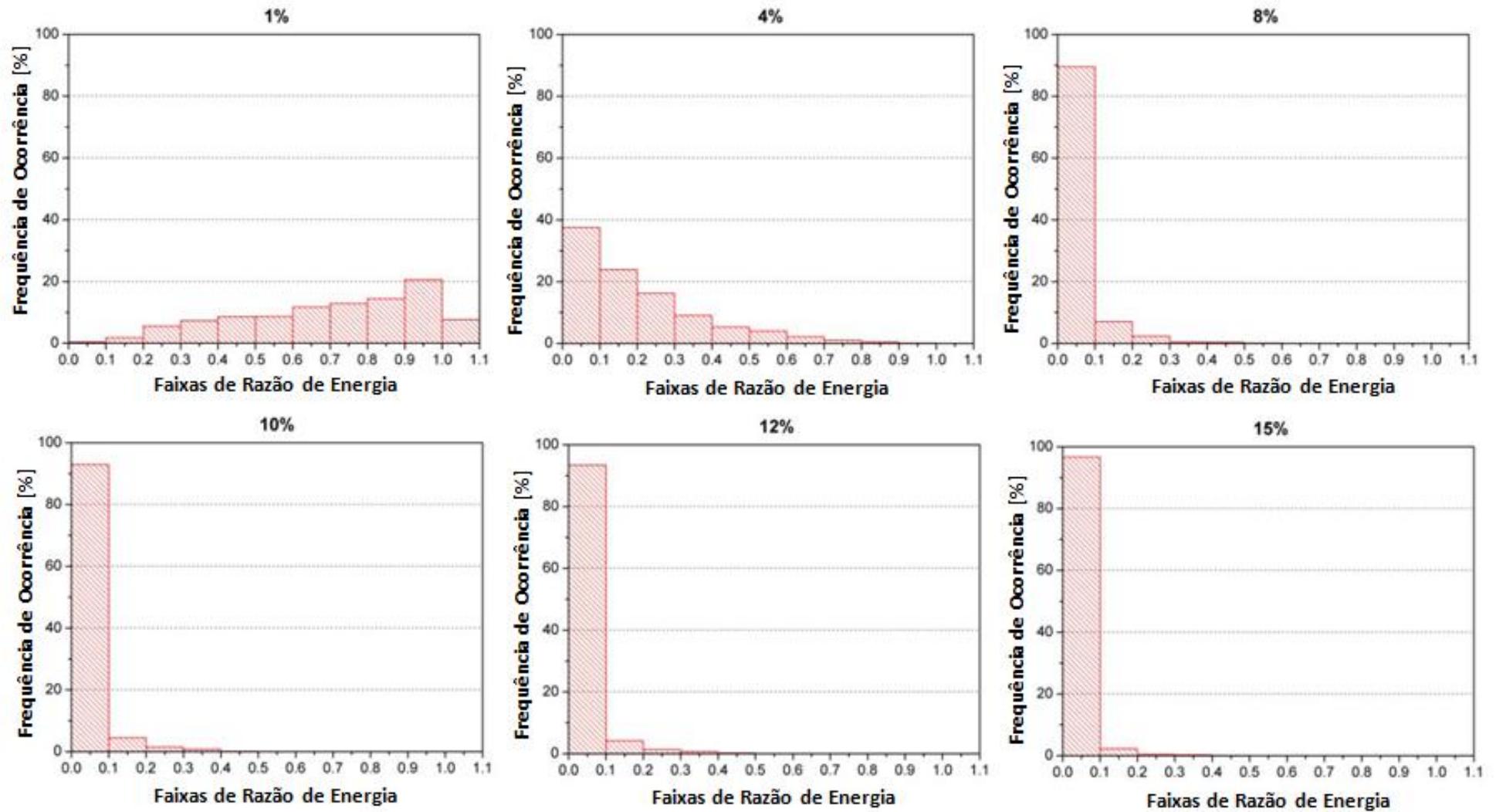


Figura 44: Histogramas da frequência em função da razão de energia instantânea para algumas frações de vazio da série n° 3.

### 3.4.2 Sinal dos receptores a 0°, 135° e 180° e as filmagens rápidas

Uma compreensão clara das tendências exibidas pelos dados nessas séries pode ser conseguida, primeiro, comparando simultaneamente os sinais dos sensores a 180° e 0° e, depois, os dados dos sensores a 180° e 135°. Para frações de vazio bem baixas (Figura 45), o efeito das reflexões no sensor pulso-eco é desprezível e os dois gráficos traçados (0° e 180°) se superpõem frequentemente. Com o aumento das reflexões, devido ao aumento da fração de vazio, os sinais se separam, porém, ainda mostrando uma concordância entre eles. Mais ainda, as flutuações no sinal do pulso-eco se tornam mais frequentes do que no sinal em 180°. Devido às reflexões na direção contrária de propagação do feixe acústico pela numerosa presença das bolhas bloqueando o caminho ultrassônico. A partir de 8% de fração de vazio, o deslocamento entre os sinais mantém-se aproximadamente constante e o sinal a 180° é gradualmente amortecido pelo aumento da atenuação acústica; contudo, a correspondência entre os sinais permanece.

Na Figura 46 e na Figura 47, junto com os sinais traçados são mostradas imagens correspondentes selecionadas para as frações de vazio em questão já dentro do sub-regime de escoamento intermitente. Na primeira figura, uma bolha de Taylor pode ser vista como a causa da permanência do nível do sinal a 180° em quase zero por um longo período de tempo, enquanto o sinal do pulso-eco cresce rapidamente. Esses picos no sinal a 0° podem ser relacionados com o aumento momentâneo das reflexões do feixe ultrassônico causado pela passagem das bolhas de Taylor; eles ocorrem todas as vezes em que uma bolha de Taylor passa, mas as suas amplitudes diferem drasticamente.

O disco de líquido aerado que levam a um aumento do sinal a 180° precedem as bolhas de Taylor, evidenciando o fato que o feixe ultrassônico consegue mais uma vez atravessar o escoamento bifásico. Simultaneamente, o sinal a 0° cai novamente ao seu nível mais frequente devido à diminuição das reflexões. Mesmo para frações de vazio maiores (Figura 47), a passagem de bolhas de Taylor e seus efeitos sobre o sensor a 180° podem ainda ser claramente notados; entretanto, agora o sinal do pulso-eco, em algumas situações, ultrapassa a linha da unidade de razão de energia. Isto pode ser explicado pelas reflexões do feixe ultrassônico na superfície das bolhas de Taylor imediatamente após a parede da tubulação, sem que o sinal atravesse o escoamento bifásico: devido ao trajeto muito mais curto o sinal do eco é menos atenuado do que no escoamento monofásico.

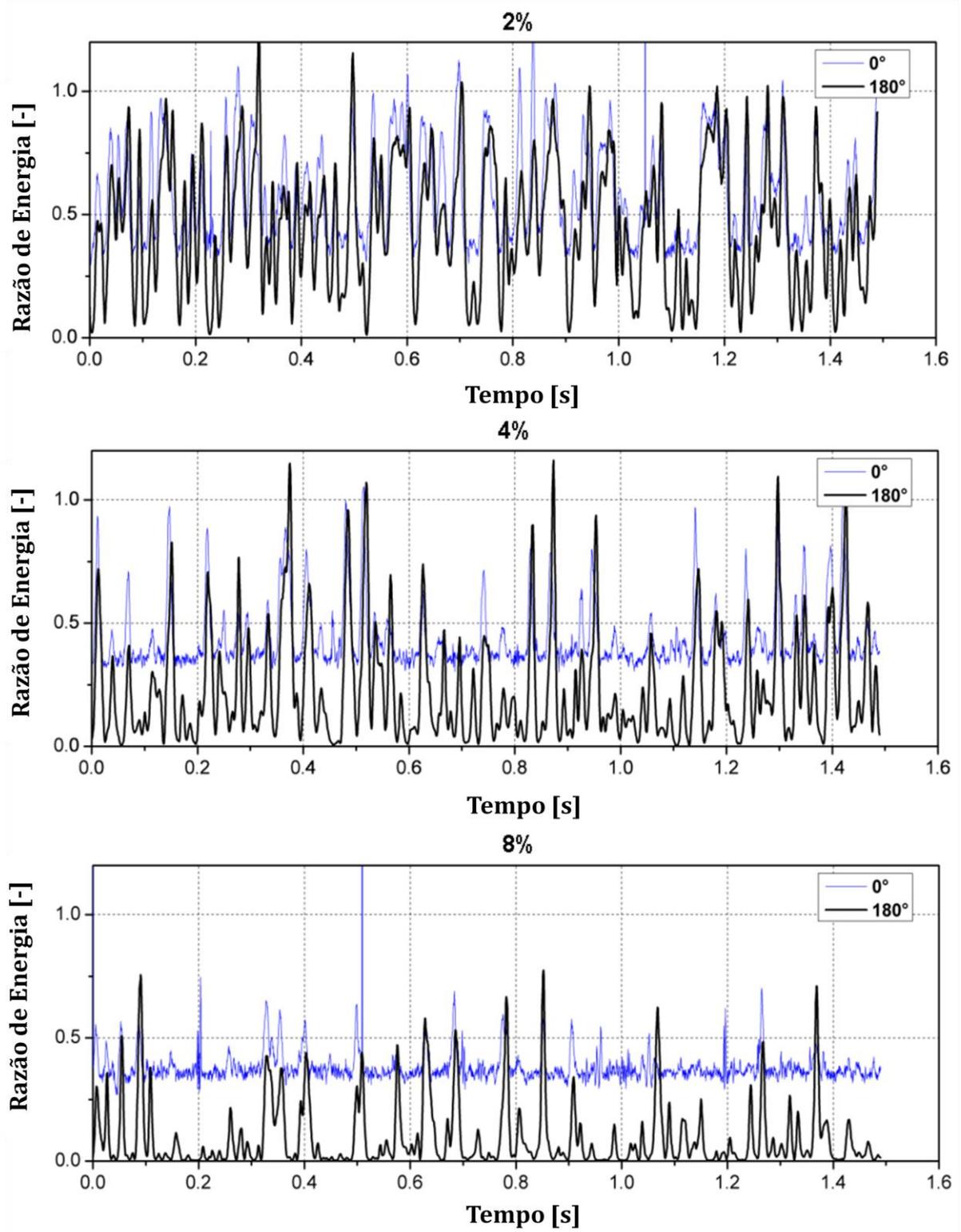


Figura 45: Sinais traçados para os sensores a 0° e 180° da série n° 6.

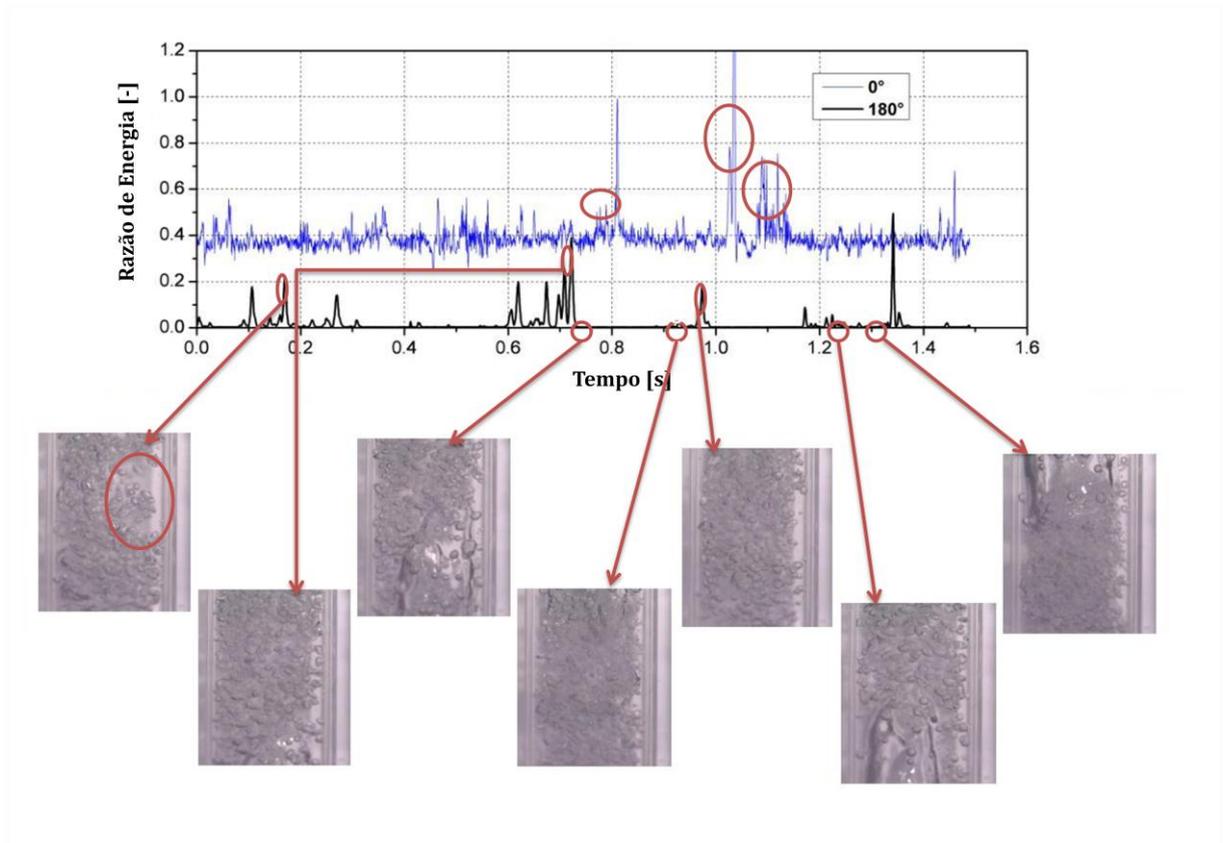


Figura 46: Sinal acústico e imagens correspondentes (série n° 6,  $\alpha = 18\%$ ).

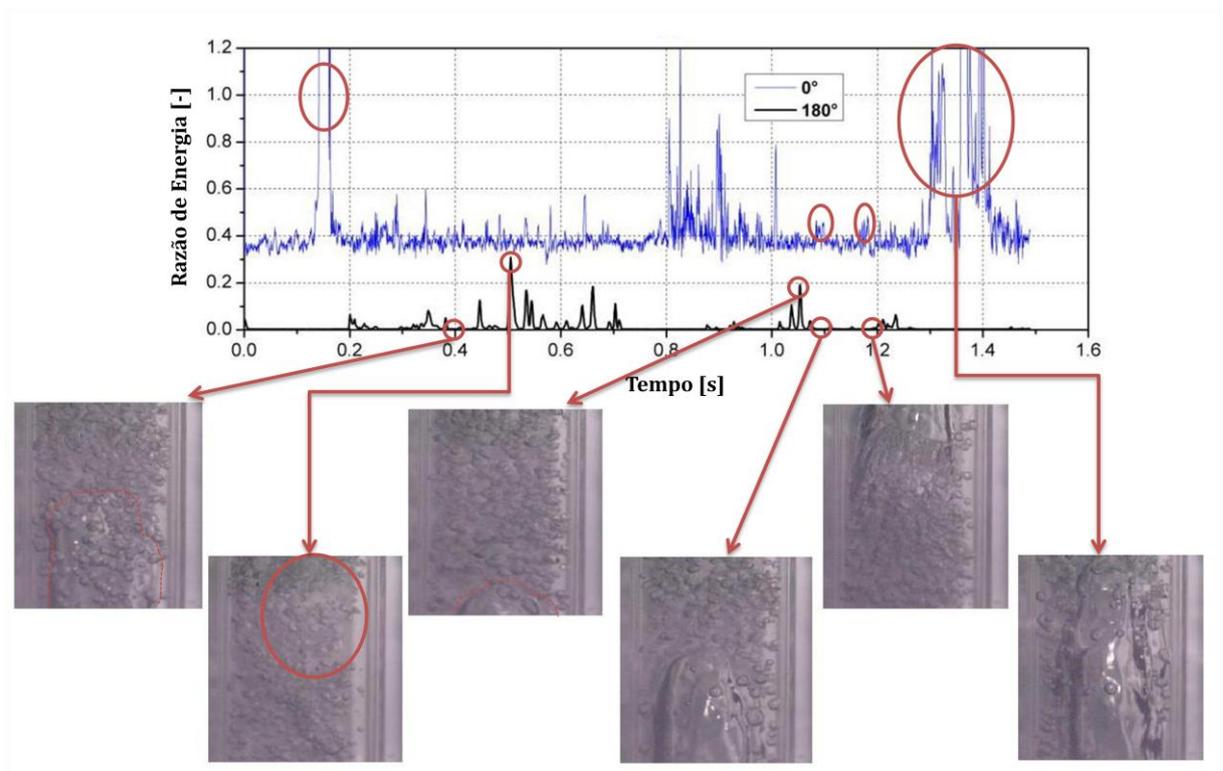


Figura 47: Sinal acústico e imagens correspondentes (série n° 6,  $\alpha = 20\%$ ).

Uma comparação entre os sinais dos sensores a  $135^\circ$  e  $180^\circ$  é mostrada na Figura 48. Para 2% de fração de vazio, o receptor a  $135^\circ$  recebe aproximadamente 45% da energia

recebida em 11% (referência usada para o sinal de 135°); existem alguns picos aleatórios que coincidem com quedas no sinal de 180°. Contrariamente, existem quedas no sinal de 180° sem aumentos correspondentes no sinal de 135°, o que significa que as bolhas estão refletindo o feixe ultrassônico para outra direção. Em 4% de fração de vazio, as flutuações no sinal aumentam substancialmente, indicando que mais energia está sendo refletida para a direção de 135°; os picos do sinal de 135° coincidem com as quedas do sinal de 180°. Este comportamento é consistente com o aumento da população de bolhas. Esta tendência genérica continua para 8% de fração de vazio com um aumento nas flutuações no sinal de 135°. Vale notar que, com o aumento da quantidade de ar no escoamento, os picos no sinal de 135° ficaram maiores, evidenciando o efeito acumulativo do espalhamento da energia pelas bolhas discretas.

A Figura 49 e a Figura 50 são o resultado da superposição do sinal de 135° na Figura 46 e na Figura 47, respectivamente. Pode ser visto que os decaimentos acentuados em 135° estão associados a fortes reflexões no sinal do pulso-eco. Isto significa que as bolhas de Taylor, que refletem fortemente a energia acústica de volta para o sensor a 0°, bloqueiam o espalhamento da energia para 135°. Além disso, o sinal varia mais aleatoriamente durante a passagem da bolha de Taylor, incluindo a sua esteira.

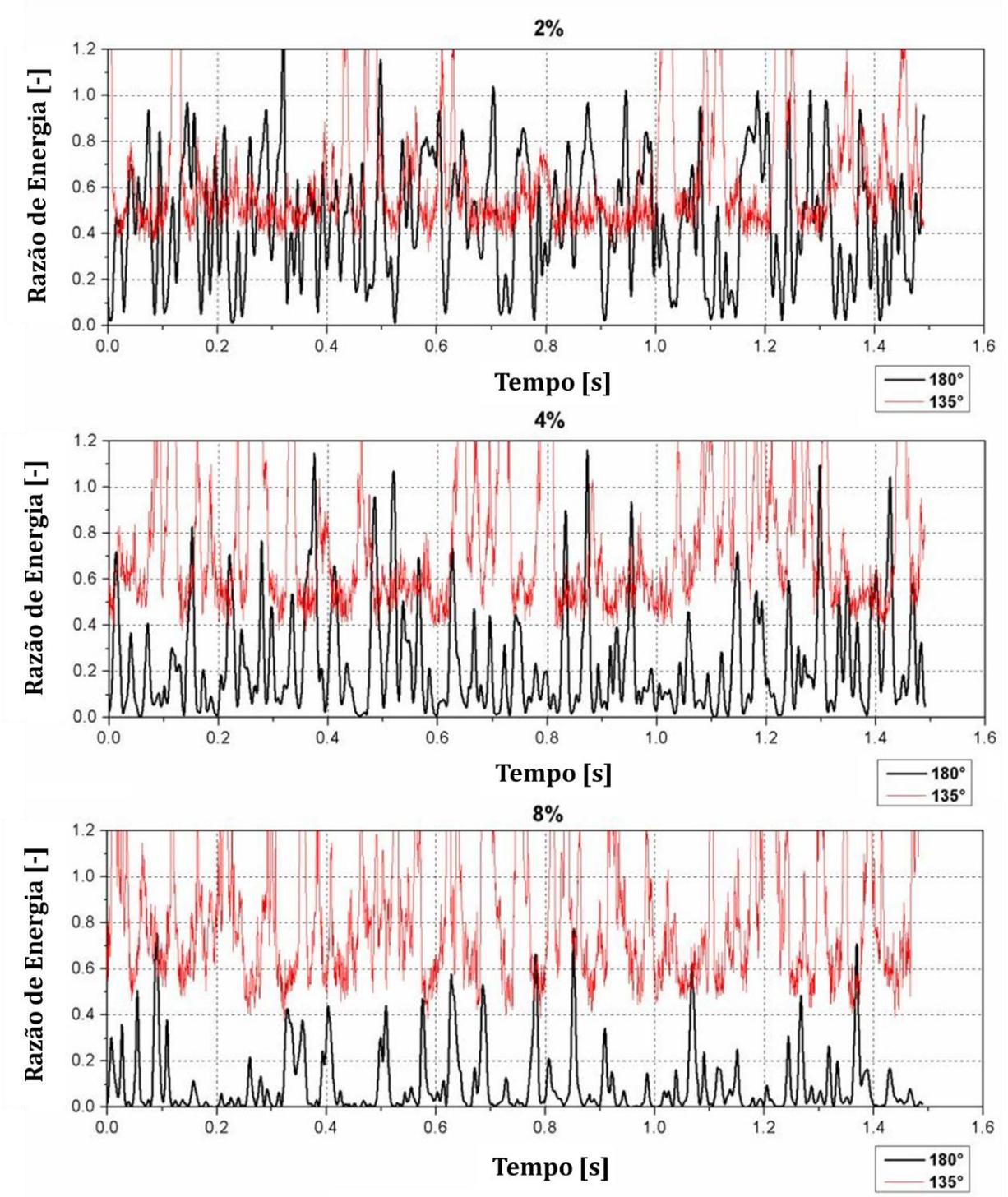


Figura 48: Sinais traçados para os sensores a 135° e 180° da série nº 6.

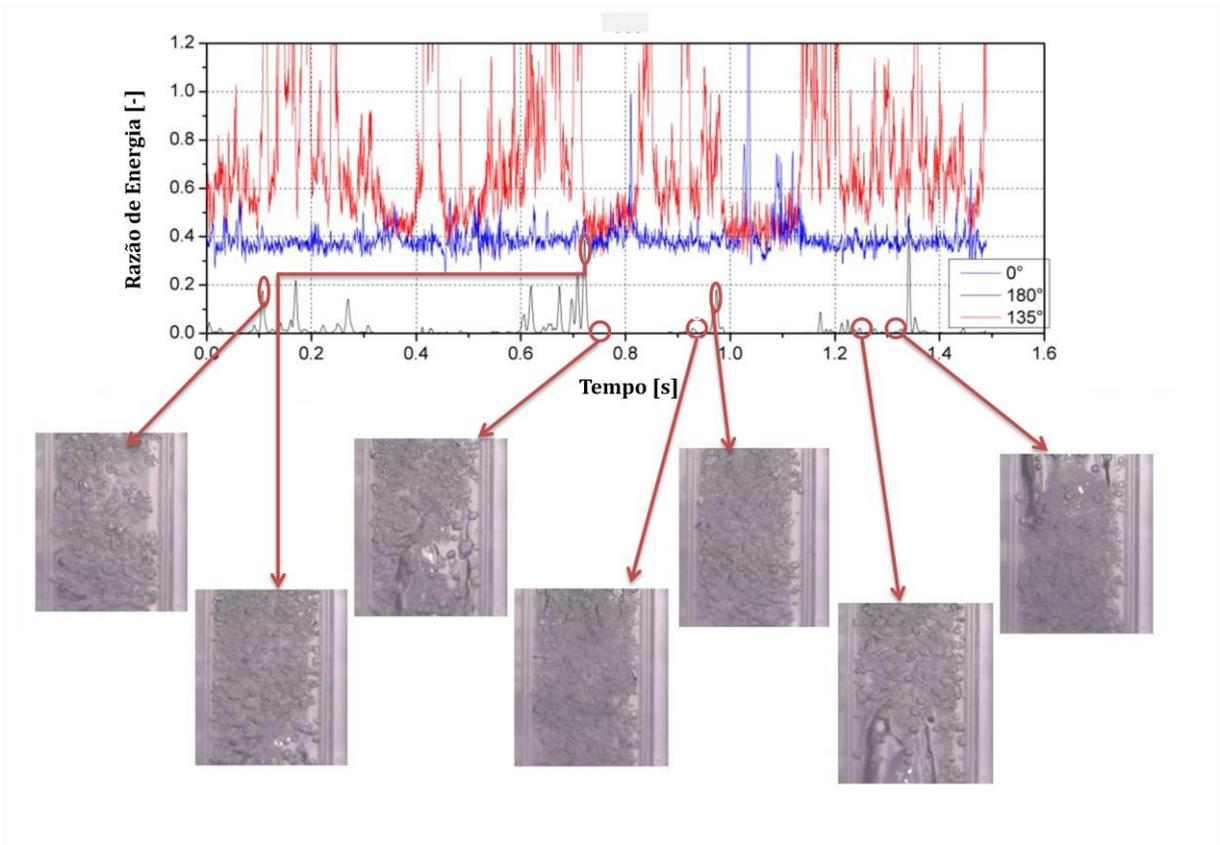


Figura 49: Sinal acústico e imagens correspondentes (série nº 6,  $\alpha = 18\%$ ).

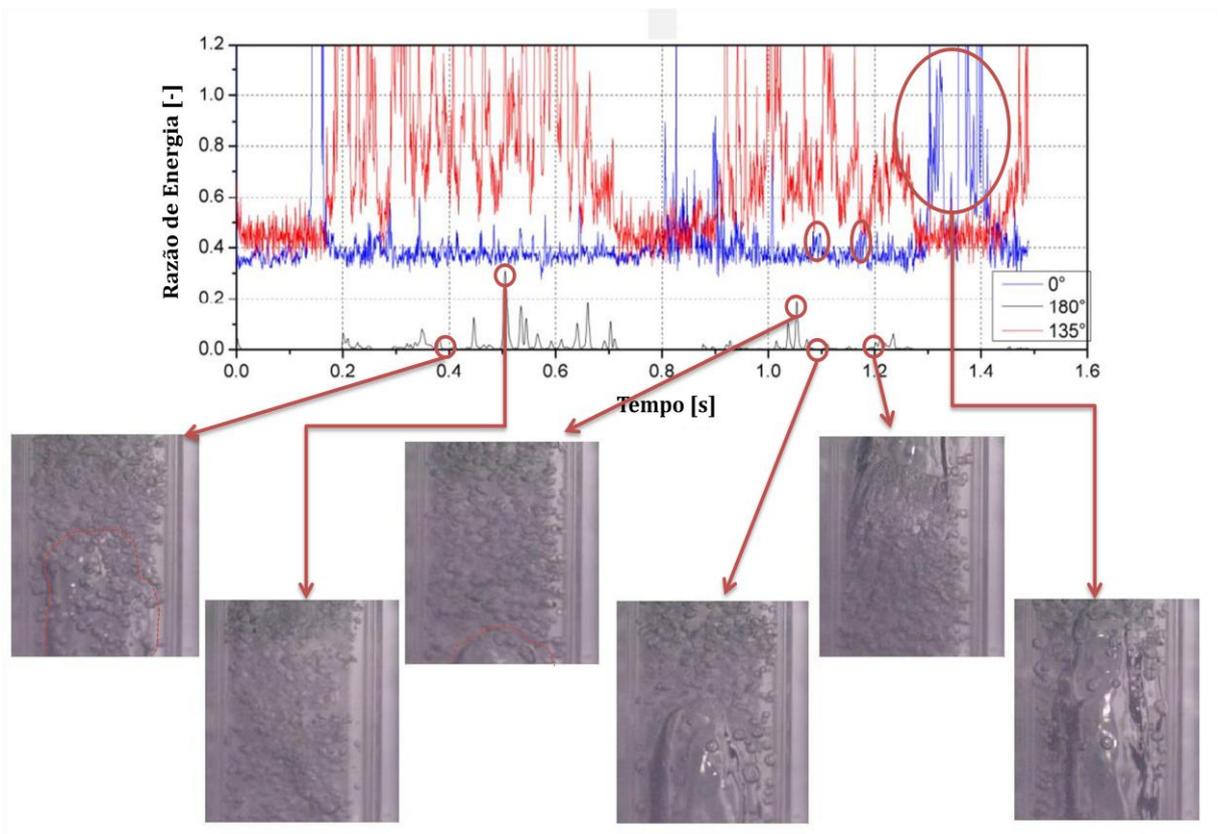


Figura 50: Sinal acústico e imagens correspondentes (série nº 6,  $\alpha = 20\%$ ).

### 3.4.3 Sinais dos receptores a 45° e 180° e as filmagens rápidas

Uma comparação entre os sinais dos sensores a 45° e 180° é apresentada na Figura 51. Para fração de vazio de 2%, o sinal a 45° exibe um comportamento mais flutuante do que aquele visto a 135° (Figura 48), indicando que a energia é direcionada para 45° mais aleatoriamente. Picos no sinal a 45° se relacionam com quedas no sinal de 180° e, ocasionalmente, os picos ultrapassam a unidade. Com o aumento da fração de vazio, esses picos passam a ser mais frequentes, mas ainda continua havendo uma correspondência entre os sinais. Flutuações de pequena amplitude se tornam agora mais frequente sugerindo que o espelhamento da energia se torna mais uniforme ao longo da circunferência da tubulação. Este comportamento é coerente com o aumento da população de bolhas.

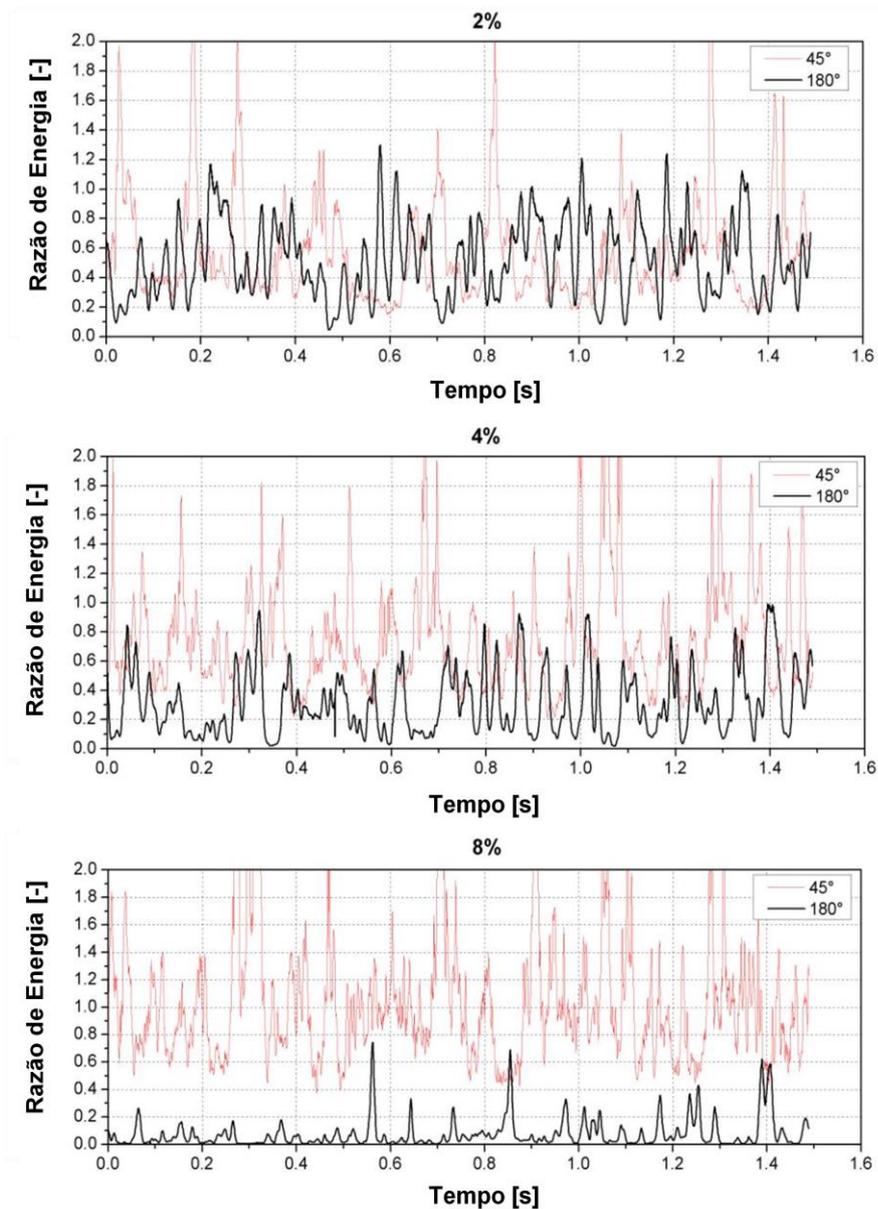


Figura 51: Sinais traçados para os sensores a 45° e 180° da série n° 4.

### **3.4.4 Identificação instantânea do padrão de escoamento a partir dos dados acústicos**

A Tabela 5 resume as observações experimentais mais importantes desta seção. Os patamares de razão de energia escolhidos representam uma tentativa de colocar em números o comportamento sistemático inter-relacionado observado nos sinais simultâneos de todos os sensores. As imagens apresentadas são os padrões de escoamento que melhor exemplificam a combinação de razões de energia escolhidas. Devido aos efeitos contrários da transmissão acústica e reflexão no sensor a  $0^\circ$ , o sinal do pulso-eco não se presta muito facilmente à uma identificação instantânea do padrão de escoamento.

É esperado que a simples combinação de níveis instantâneos de razão de energia, como mostra a Tabela 5, seja suficiente para o monitoramento em tempo real do escoamento bifásico, pelo menos na montagem laboratorial.

Nota-se uma diferença entre as imagens da Tabela 5. Isto decorre delas terem sido obtidas em series de dados diferentes. Estas duas séries tiveram o foco e a cor do anteparo posicionado na parte anterior da seção de filmagem variados entre uma série e outra. O anteparo serve de contraste para a imagem adquirida pela filmadora.

As imagens presentes na Tabela 5 mostram a tubulação vertical com o escoamento ascendente. As linhas horizontais presentes nas figuras mostram aproximadamente a posição dos transdutores em relação à filmadora. Já as linhas verticais mostram que existem momentos em que as bolhas tendem a se posicionar mais em uma determinada porção da tubulação, direita ou esquerda da imagem.

Tabela 5: Faixas de razão de energia associados a padrões típicos de escoamento.

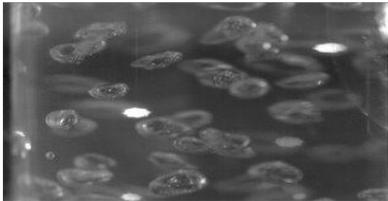
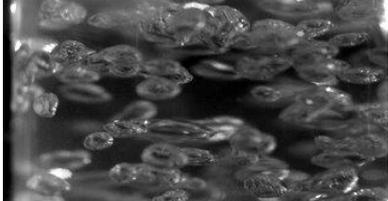
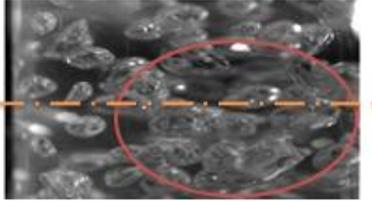
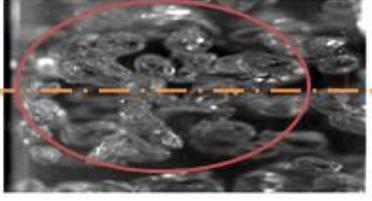
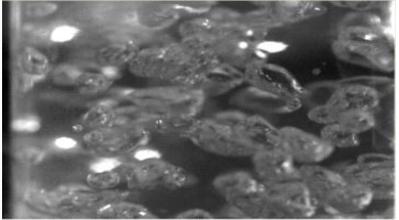
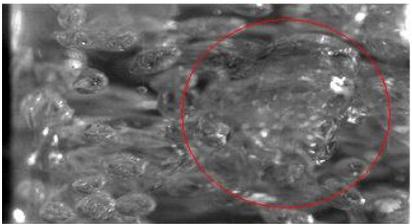
$\alpha$	Níveis de Razão de Energia				Padrão de Escoamento	Imagem
	180°	0°	135°	45°		
2%	< 0,2	-	< 0,8	> 1,2	Bolhas próximas ao transdutor emissor	
	< 0,2	-	> 0,8	< 0,6	Bolhas próximas ao transdutor a 180°	
	> 0,9	-	< 0,6	< 0,6	Bolhas bem espalhadas	
4%	> 0,6	-	< 0,6	< 0,6	Bolhas bem distribuídas	
8%	> 0,6	-	< 0,6	< 0,6	Bolhas bem distribuídas (população mais densa)	
	< 0,1	-	-	> 1,2	Aglomerado de bolhas nas proximidades do sensor emissor	
	< 0,1	-	> 0,8	-	Aglomerado de bolhas nas proximidades do sensor a 180°	

Tabela 5: Faixas de razão de energia associados a padrões típicos de escoamento (continuação).

$\alpha$	Níveis de Razão de Energia				Padrão de Escoamento	Imagem
	180°	0°	135°	45°		
10%	> 0,4	-	> 0,8	-	Bolhas bem distribuídas (população mais densa)	
	< 0,1	-	< 0,6	-	Bolhas coalescidas	
> 13%	< 0,1	-	-	-	Bolha de Taylor	

### 3.5 ENERGIA PONDERADA PELO TEMPO DE TRÂNSITO

Como discutido anteriormente, a duração do pulso ultrassônico recebido pelo sensor a 180° permaneceu praticamente constante com a fração de vazio. Também foi observado que o tempo de trânsito inicial – o intervalo de tempo entre o disparo e o momento em que a onda longitudinal começa a chegar no receptor – permaneceu constante em toda a faixa de frações de vazio testada. De qualquer maneira, uma nova definição de tempo de trânsito foi estudada para se investigar como o escoamento bifásico afeta a propagação da onda. Esta é:

$$\Delta t_{total} = \Delta t_{inicial} + \frac{\int_{E_1}^{E_2} t dE}{E_{total}} \quad (5)$$

Na equação acima,  $\Delta t_{inicial}$  representa o tempo de trânsito inicial já definido. O segundo termo é o intervalo de tempo de trânsito médio ponderado pela quantidade de energia

que chega ao receptor a cada incremento infinitesimal de tempo; e pode ser interpretado como o resultado global da topologia do escoamento sobre a onda acústica que se propaga. A soma dos tempos inicial e ponderado representa o tempo total ( $\Delta t_{total}$ ) que o sinal acústico gasta desde sua emissão até sua chegada no receptor. A Figura 52 mostra os tempos inicial e total em função da fração de vazio para o sensor a  $180^\circ$ .

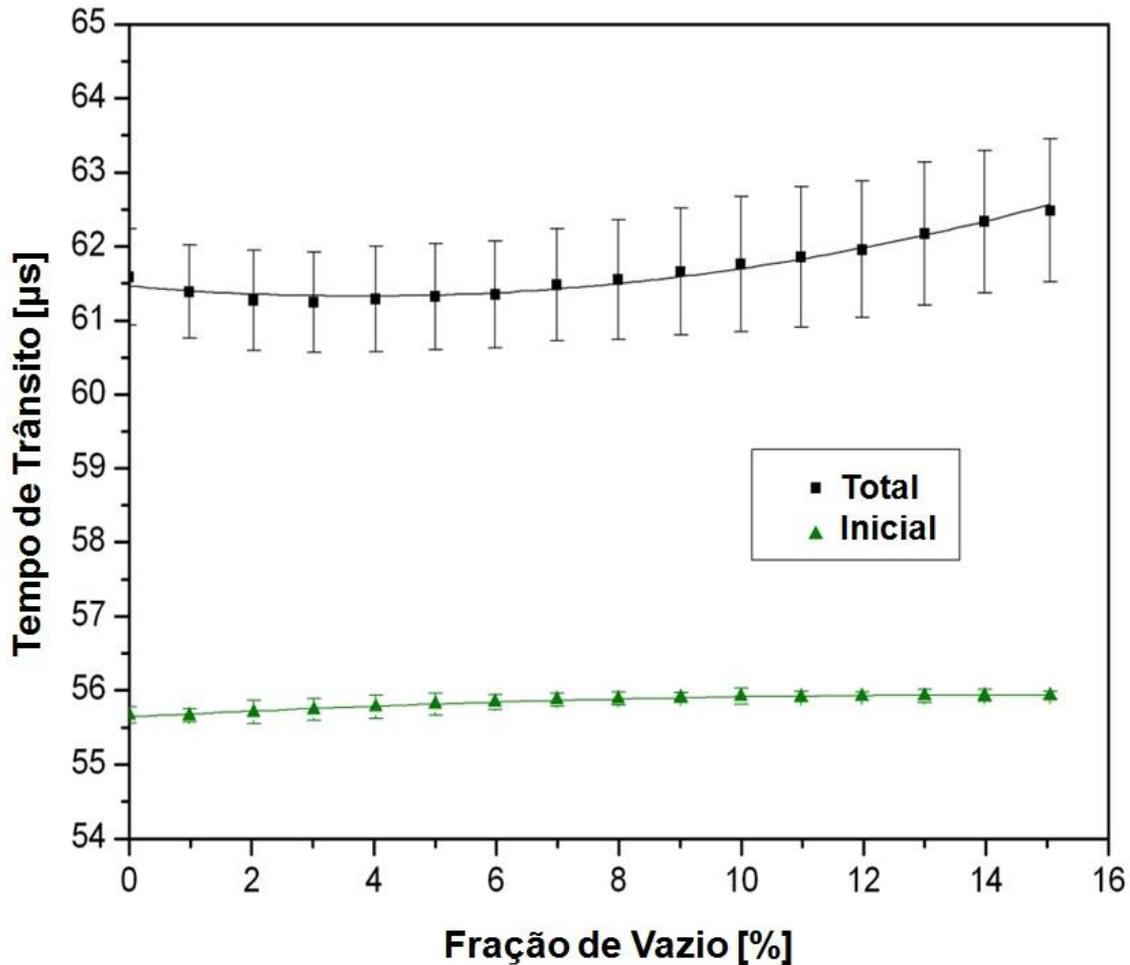


Figura 52: Tempos inicial e total em função da fração de vazio (sensor a  $180^\circ$  série n° 1).

Pode ser visto que  $\Delta t_{inicial}$  apresenta um crescimento bem discreto ( $<1\mu s$ ) ao longo de todo o regime de escoamento borbulhante; o intervalo de incerteza foi menor que 0,2%. Esse pequeno intervalo advém do estabelecimento preciso dos pontos de início e fim de  $\Delta t_{inicial}$  utilizando um programa computacional. Já para  $\Delta t_{total}$ , foi notado uma variação de  $1\mu s$  ao longo de toda a faixa de frações de vazio testada, mas o intervalo de incerteza para essa grandeza foi muito maior do que para o parâmetro anterior, de 1% a 1,5%. A razão para este comportamento foi a dificuldade em se estabelecer um ponto final para a duração do pulso; o sinal se extingue gradualmente e acaba se confundindo com o ruído que o transdutor capta.

Portanto, o final do sinal teve que ser determinado visualmente analisando diversos sinais escolhidos aleatoriamente para uma dada amostra; o tempo correspondente era então inserido na rotina computacional.

O comportamento apresentado por  $\Delta t_{inicial}$  é coerente com a hipótese de que está associado à porção da energia acústica que chega no receptor com um mínimo ou nenhuma perturbação das bolhas, representando principalmente a transmissão através da fase contínua. Desse ponto de vista, os resultados para  $\Delta t_{inicial}$  corroboram a afirmação de Vatanaku *et al.* (9) de que a velocidade do som é independente da quantidade de gás presente devido à grande distorção do ultrassom ao redor das bolhas. A variação observada em  $\Delta t_{total}$  não é conclusiva por causa da grande faixa de incerteza que os resultados apresentaram; entretanto, foi feito um grande esforço para correlacionar esses valores com as observações feitas na análise visual e com os resultados das razões de energia média.

Um melhor entendimento do comportamento do  $\Delta t_{total}$  pode ser adquirido da Figura 53, a qual mostra a segunda parcela do lado direito da Equação (5) em função da fração de vazio.

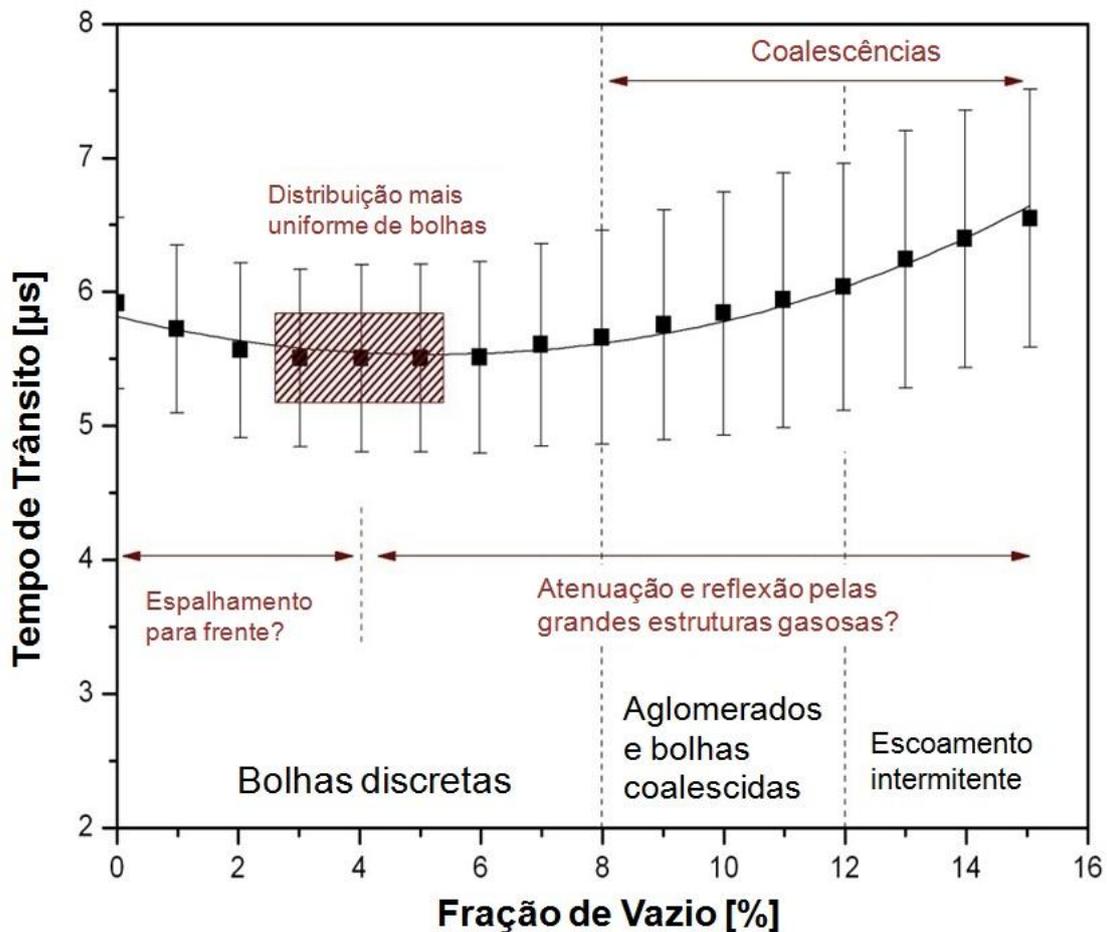


Figura 53: Tempo de trânsito médio ponderado em função da fração de vazio (sensor a 180° série n° 1).

Mais uma vez, o grande intervalo de incerteza é devido à dificuldade em se estabelecer um ponto final para a integração do sinal. No intervalo de 0% até aproximadamente 5% ou 6% de fração de vazio, a média do tempo de trânsito ponderada pela energia diminui. Mesmo que a contribuição do espalhamento dianteiro da energia do sinal seja pequena, um acréscimo significativo na energia total incidente no receptor devido a esse espalhamento é totalmente possível [(31)]. Portanto, é plausível que a contribuição positiva do espalhamento da energia acústica no sentido de propagação prevaleça sobre a contribuição negativa da atenuação e reflexões, causando um decréscimo no tempo de trânsito ponderado. Mais ainda, Xu *et al.* (14) realizou um experimento utilizando esferas (simulando bolhas) alinhadas ao longo do caminho ultrassônico. Os resultados medidos foram comparados com os cálculos feitos admitindo que as esferas fossem refletoras perfeitas da onda incidente. Foi constatado um pequeno aumento no valor do pico do sinal de resposta medido. Essas observações são confirmadas pela ocorrência significativa de valores de razão de energia maiores que a unidade (Figura 44). De 6% em diante, o tempo de trânsito médio cresce monotonicamente; os histogramas corroboram essa tendência pelo deslocamento contínuo do máximo da direita para a esquerda, evidenciando a formação de estruturas gasosas cada vez maiores. O rápido crescimento do tempo de trânsito médio a partir de 8% de fração de vazio concorda com o aparecimento dos primeiros aglomerados de bolhas e início do processo de coalescências.

Finalmente, o tempo de trânsito ponderado do pulso é significativamente maior que o tempo de duração do pulso. Todavia, enquanto o último se refere a um tempo cronológico, o primeiro mede a interação da onda acústica com as estruturas gasosas.

### **3.6 ATENUAÇÃO EM BANDA LARGA (BUA)**

A determinação da BUA é sempre feita comparando-se o espectro de um sinal de referência com o espectro do sinal adquirido no meio desejado. Matematicamente, a comparação é feita através da subtração dos espectros de ambos os sinais como mostrado na Equação (6). No espectro resultante, existe uma faixa de frequência onde a relação com a atenuação é aproximadamente linear. No caso da caracterização de ossos, o intervalo é de 0,1 a 1 Mhz; abaixo de 0,1 Mhz, a atenuação é relativamente insensível à variação na frequência; acima de 1 Mhz, a interferência no sinal se torna o fator limitante [(32)]. Desta, através da regressão linear [Equação (7)], calcula-se o coeficiente angular da reta que, numericamente, representa a BUA do sinal.

$$\alpha(f) = 20 * \log_{10}(|V_{ref}(f)|) - 20 * \log_{10}(|V(f)|) \quad (6)$$

onde:

$\alpha(f)$ : atenuação do sinal de ultrassom em função da frequência

$|V_{ref}(f)|$ : módulo do espectro do sinal de referência no domínio da frequência

$|V(f)|$ : módulo do espectro do sinal no meio em estudo no domínio da frequência

$$y(\alpha(f)) = A * \alpha(f) + B \quad (7)$$

onde:

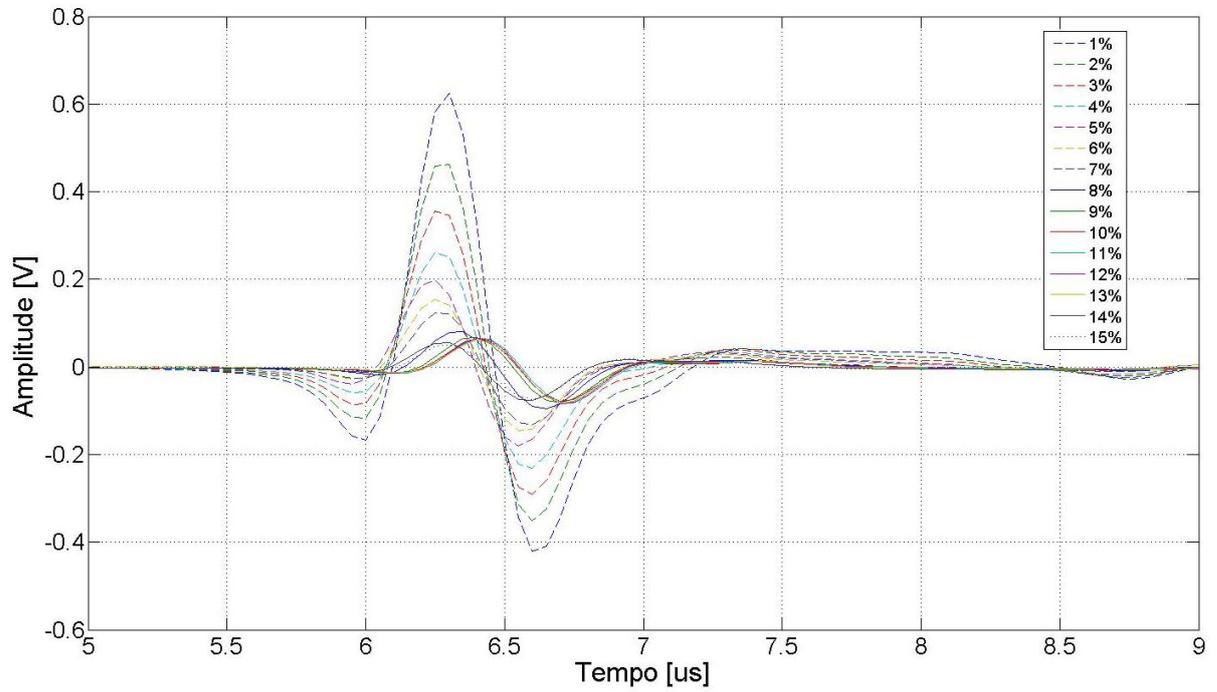
$A$ : coeficiente angular da reta (BUA [dB/Hz])

Usualmente, para se calcular a BUA utiliza-se a técnica de transmissão direta, sensores a 0° e 180° como mostra a Figura 2. Deste fato, a distância entre os transdutores se torna mais um fator de interferência no sinal. Para normalizar este efeito, deve-se dividir o coeficiente da reta calculada pela distância existente entre os transdutores. Assim, um novo parâmetro é criado, a nBUA (BUA normalizada [dB/Hz.m]).

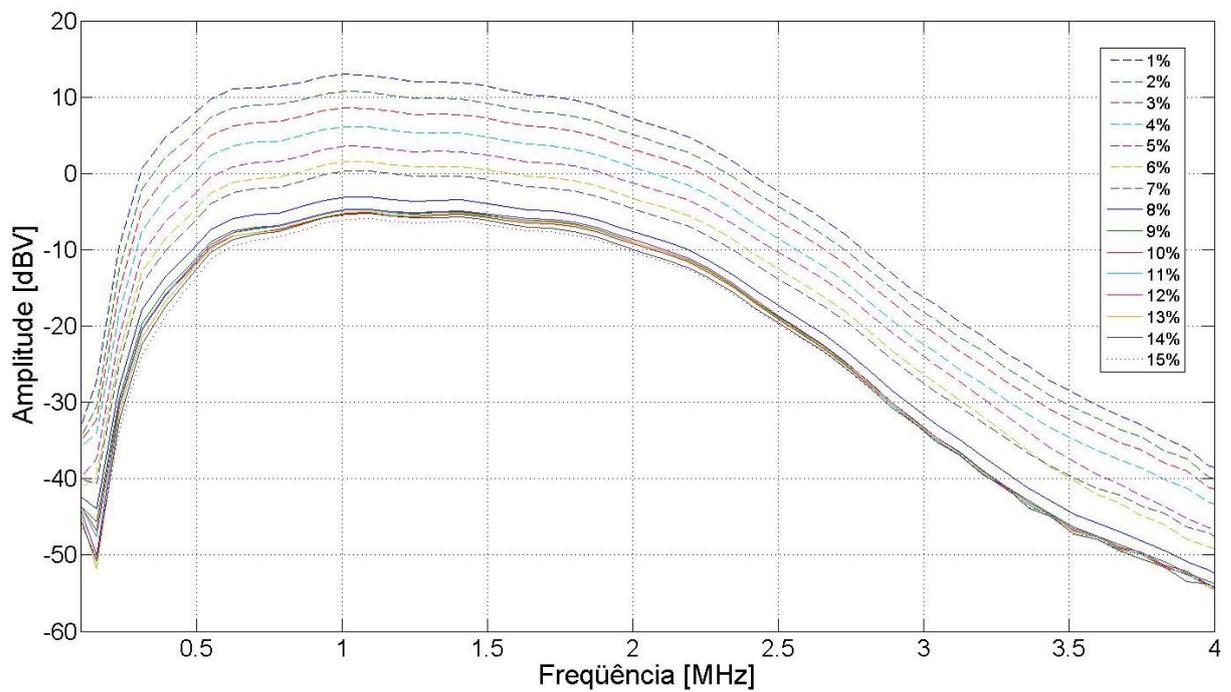
No presente estudo, o meio de referência para aplicação da atenuação em banda larga foi o escoamento monofásico, somente água. Já os demais sinais de comparação foram os sinais que atravessam o escoamento bifásico água-ar, perfazendo todo o regime do escoamento borbulhante. A Figura 54 mostra os pulsos médios representando cada condição de operação para a série n° 2 (Tabela 3). Nota-se que o comportamento dos sinais é proporcional a variação da fração de vazio, ou seja, com o aumento gradativo da fase dispersa os pulsos são cada vez mais atenuados. Para as frações de vazio mais altas, a diferença da atenuação entre frações de vazio passa a ser menos expressiva. Este fato decorre da transição do escoamento de bolhas discretas para o escoamento intermitente já discutido anteriormente.

O espectro de frequência dos sinais da Figura 54 é mostrado na Figura 55. O comportamento dos sinais nos dois gráficos é semelhante. À medida que a concentração da fase dispersa aumenta, a atenuação nos pulsos passa a ser menor na região onde começam aparecer as estruturas gasosas maiores, aglomerados, coalescências, bolhas de Taylor incipientes. Nota-se que a variação da amplitude entre cada fração de vazio dentro da faixa de  $\alpha = 1\%$  e  $\alpha = 8\%$  parece ser uniforme para ambas as situações, tempo e frequência. Este fato corrobora o comportamento apresentado pela razão de energia em função da fração de vazio.

Inicialmente, o espalhamento da energia é mais uniforme conforme a fração de vazio aumenta e, quando se dá a transição para o escoamento intermitente e o escoamento pistonado, a divergência do feixe acústico praticamente não sofre alteração.

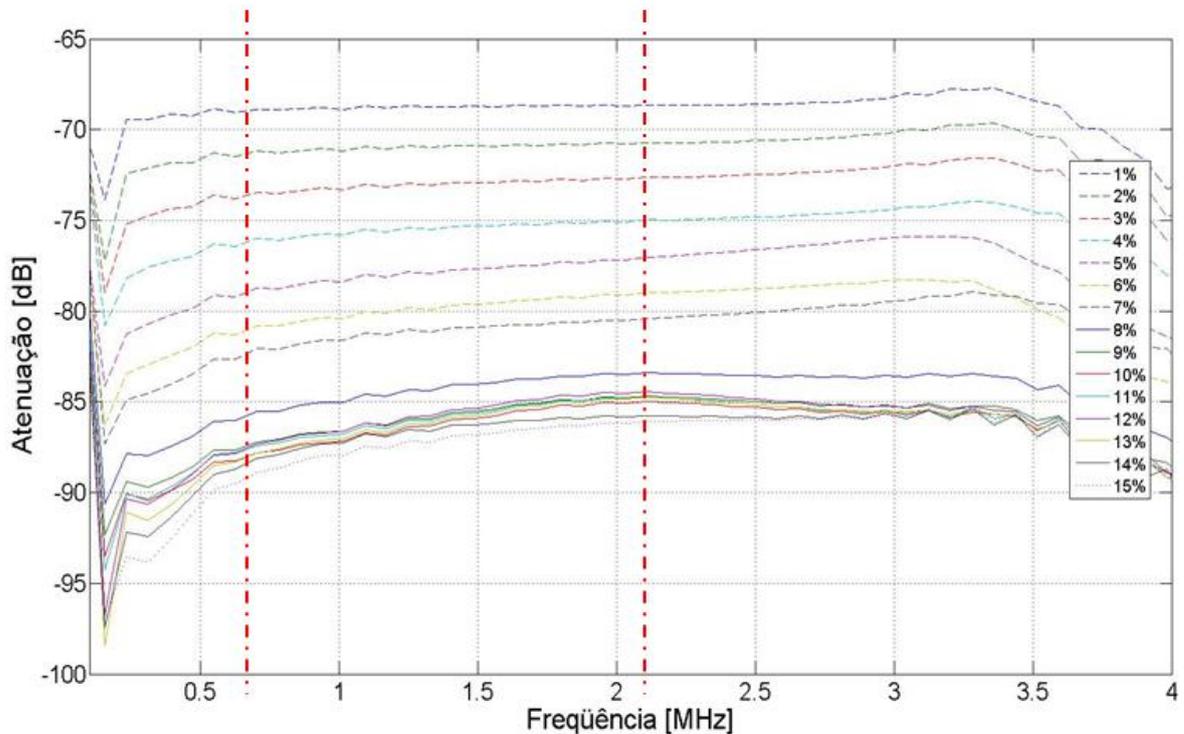


**Figura 54: Pulsos médios de cada condição de operação.**



**Figura 55: Espectro de frequência das médias de todas as condições de operação.**

A faixa de frequência escolhida para o cálculo da BUA foi 625 kHz a 2,265 MHz, por apresentar um ótimo coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para toda a faixa de fração de vazio e também conter a região linear necessária para se determinar o coeficiente BUA [(22)]. A Figura 56 mostra esta região para  $\alpha = 1\%$  até  $\alpha = 15\%$ . Mais uma vez, o comportamento da atenuação é muito similar àquela dos gráficos já apresentados nesta seção.



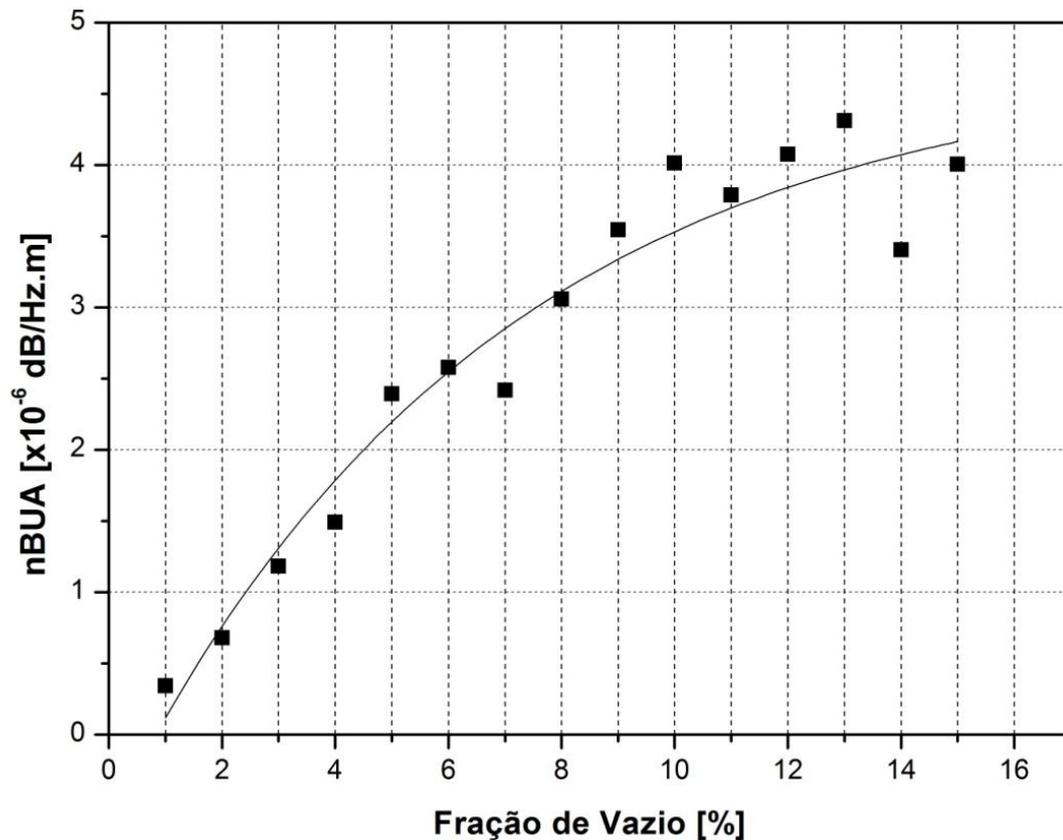
**Figura 56:** Região onde a atenuação em função da frequência é quase linear para todas as condições de operação.

Os coeficientes calculados utilizando-se a regressão linear são apresentados na Tabela 6 e graficamente na Figura 57. Conforme aumenta a concentração de ar no escoamento, o coeficiente tende a crescer. Nota-se que esse crescimento é bem expressivo com o aumento da fase dispersa. A faixa de fração de vazio de 1% a 10% apresenta um crescimento quase uniforme, exceto para  $\alpha = 7\%$ , na qual há um decaimento no valor da nBUA. Entretanto, esse ponto corresponde ao início das coalescências e aglomerados de bolhas (Figura 13). Neste caso a variação no escoamento começa a ser percebida no cálculo do parâmetro, oscilações nos valores, assim como é visto na atenuação do sinal no tempo e na frequência (Figura 55 e Figura 56). As oscilações se evidenciam mais a partir do instante que o escoamento intermitente se estabelece ( $\alpha = 11\%$  a  $\alpha = 15\%$ ). Essa variação está associada à intermitência entre discos de aerados de líquido e a passagem das bolhas de Taylor. Como justificado anteriormente, existe uma grande oscilação no sinal do sensor a  $180^\circ$ , quando há passagem da

bolha de Taylor o sinal cai para níveis muito baixos de amplitude e, quando há passagem do disco aerado de líquido, o sinal cresce.

**Tabela 6: Valores da nBUA.**

$\alpha$ [%]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
nBUA [ $\times 10^{-6}$ dB/Hz.m]	3,42	6,79	11,82	14,89	23,93	25,76	24,16	30,57	35,44	40,13	37,87	40,75	43,11	34,03	40,03



**Figura 57: nBua em função da fração de vazio.**

Por fim, a BUA se mostra capaz de identificar a variação na fração de vazio com bastante clareza dentro do sub-regime de bolhas discretas definido aqui neste trabalho. Entretanto, na mudança de sub-regime a precisão se torna menor devido à aleatoriedade apresentada pelo escoamento. A atenuação em banda larga representa, assim, uma ferramenta adicional para caracterização de escoamentos bifásicos, porém por si esta técnica não permite conclusões definitivas sobre a estrutura do escoamento e o valor da fração de vazio.

# CONCLUSÕES

Um aparato experimental foi projetado e construído para aplicação da técnica ultrassônica na medição da fração de vazão em escoamentos bifásicos água-ar, verticais e ascendentes. O dispositivo ultrassônico consistia em um sensor emissor/receptor e outros três sensores receptores posicionados ao longo da circunferência da tubulação; filmagens rápidas dos padrões de escoamento foram feitas a 250 e 1000 fps. Os dados de atenuação acústica (razão de energia média) mostraram um comportamento sistemático inter-relacionado dos vários sensores com a fração de vazão, evidenciando o potencial da técnica ultrassônica para a determinação em parâmetros hidrodinâmicos de escoamentos bifásicos água-ar. Os sensores a  $180^\circ$  (transmissão direta) e a  $0^\circ$  (pulso-eco) podem ser utilizados com mais facilidade do que os sensores a  $45^\circ$  e a  $135^\circ$ , pois o sinal adquirido no escoamento monofásico pode ser usado como referência para eles. Além disso, os sinais a  $0^\circ$  e  $180^\circ$  possuem limites mais bem definidos dentro da janela de aquisição, e são mais sensíveis a variações na fração de vazão.

Nos pulsos individuais (razão de energia instantânea) também foi observado uma inter-relação entre os sinais de todos os sensores. Verificou-se que a energia acústica do sensor a  $180^\circ$  é progressivamente desviada para os demais transdutores com o aumento na fração de vazão. O sensor a  $0^\circ$  recebe mais energia do que os outros receptores devido às reflexões nas estruturas gasosas para trás. Das filmagens em alta velocidade, foi possível verificar o efeito de estruturas gasosas específicas como aglomerado de bolhas e bolha de Taylor no sinal acústico.

Foi também desenvolvida uma metodologia para limpeza do sinal no domínio do tempo. Essa filtragem pôde ser aplicada aos sinais recebidos de todos os receptores, diminuindo a influência dos ruídos na atenuação acústica e otimizando o espaço de memória exigido para o armazenamento dos mesmos.

Finalmente, estes trabalhos já possibilitam a utilização da técnica de ultrassom em laboratórios para estudo da estrutura de escoamentos intermitentes horizontais água-ar. Para aplicação da técnica a outros escoamentos multifásicos e em escoamentos reais da indústria petrolífera, mais estudos são necessários. Parte deles já foi feita no contexto do Convênio FINEP/PETROBRAS 01.07.0131.00.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Valle, A. Multiphase Pipeline Flow in Hydrocarbon Recovery. *Multiphase Science and Technology*, 1998, Vol. 10, pp. 1-139.
- [2] Chen, Y., Hong, T., Gopal, M. e Jepson, W. P. EIS Studies of a Corrosion Inhibitor Behavior Under Multiphase Flow Conditions, *Corrosion Science*, 2000, Vol. 42, pp. 979-990.
- [3] Powell, R. L. Experimental Techniques for Multiphase Flows. *Physics of Fluids*, 2008, Vol. 20, pp. 1-20.
- [4] Jaworek, A., Krupa, A., and Trela, M. Capacitance Sensors for Void Fraction Measurement in Water/Steam Flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2004, Vol. 15, pp. 317-324.
- [5] Bond, L. J., Morra, M., Greenwood, M. S., Bamberger, J. A., and Pappas, R. A.. *Ultrasonic Technologies for Advanced Process Monitoring, Measurement, and Control*. Vail, CO, USA. 2003, 20<sup>th</sup> IEEE Instrumentation and Measurement Technology, pp. 1288-1293.
- [6] Bamberger, J. A., and Greenwood, M. S. Measuring Fluid and Slurry Density and Solids Concentration Non-Invasively, *Ultrasonics*, 2004 Vol. 42, pp. 563-567.
- [7] Bouchard, J. G., Payne, P. A., and Szyszko, S. Non-Invasive Measurement of Process States Using Acoustic Emission Techniques Coupled with Advanced Signal Processing, *Trans. I. Chem. E.*, 1994, Vol. 72, Part A.
- [8] Horne, M. K., and Roland, N. Ultrasonic Rate Measurement in Two-Phase Bubble Flow, Dallas, USA. 2003, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, pp. 711-713, SPE 30596.
- [9] Kytömaa, H. K. Theory of Sound Propagation in Suspensions: A Guide to Particle Size and Concentration Characterization. *Powder Technology*, 1995, Vol. 82, pp. 115-121.
- [10] Murakawa, H., Kikura, H., Aritomi, M. Application of Ultrasonic Doppler Method for Bubbly Flow Measurement Using Two Ultrasonic Frequencies, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, Vol. 29, pp. 843-850.
- [11] Vatanakul, M., Zheng, Y., Couturier, M. Application of Ultrasonic Technique in Multiphase Flow. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2004, Vol. 43, pp. 5681-5691.
- [12] Wada, S., Kikura, H., and Aritomi, M. Pattern Recognition and Signal Processing of Ultrasonic Echo Signal on Two-Phase Flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2006, Vol. 17, pp. 207-224.

- [13] Warsito, Ohkawa, M., Kawata, N., and Uchida, S. Cross-Sectional Distributions of Gas and Solid Holdups in Slurry Bubble Column Investigated by Ultrasonic Computed Tomography. *Chemical Engineering Science*, 1999, Vol. 54, pp. 4711-4728.
- [14] Xu, L. A., Green, R. G., Plaskowski, A., Beck, M. S. The Pulsed Ultrasonic Cross-Correlation Flowmeter for Two-Phase Flow Measurements. *J. Phys. E.: Sci. Instrum.* 1988, Vol. 21, pp. 406-414.
- [15] Zheng, Y., and Zhang, Q. Simultaneous Measurement of Gas and Solid Holdups in Multiphase Systems Using Ultrasonic Technique. *Chemical Engineering Science*, 2004, Vol. 59, pp. 3505-3514.
- [16] Xu, L., Han, Y., Xu, L., and Yang, J. Application of Ultrasonic Tomography to Monitoring Gas/Liquid Flow. *Chemical Engineering Science*, 1997, Vol. 52, 13, pp. 2171-2183.
- [17] Xu, L. J., and Xu, L. A. Gas/Liquid Two-Phase Flow Regime Identification by Ultrasonic Tomography. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1997, Vol. 8, 3/4, pp. 145-155.
- [18] Chang, J. S., Ichikawa, Y., Irons, G. A. Flow Regime Characterization and Liquid Film Thickness Measurement in Horizontal Gas-Liquid Two-Phase Flow by an Ultrasonic Method. 1982, pp. 7-12.
- [19] Fiedler, S., Yildiz, S., Auracher, H. Determination of Film Thickness and Flooding during Reflux Condensation in a Small, Inclined Tube with an Ultrasonic Transducer. *International Journal of Energy Research*, 2003, Vol. 4, pp. 315-325.
- [20] Caicedo, G. R., Marqués, J. J. P., Ruíz, M. G., and Soler, J. G. A Study on the Behaviour of Bubbles of a 2D Gas-Solid Fluidized Bed Using Digital Image Analysis. *Chemical Engineering and Processing*, 2003, Vol. 42, pp. 9-14.
- [21] Shen, L., Johnsson, F., and Leckner, B. Digital Image Analysis of Hydrodynamics Two-Dimensional Bubbling Fluidized Beds. *Chemical Engineering Science*, 2004, Vol. 59, pp. 2607-2617.
- [22] Massignan, J. P. D. Métodos de Análise de Sinais de Ultrassom para Caracterização de Escoamentos bifásicos, Dissertação de Mestrado, 2009, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, PR, Brasil.
- [23] Maia, J. M. Sistema Ultrassônico para Auxílio ao Diagnóstico da Osteoporose, Tese de Doutorado, 2001, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- [24] Laakonen, M., Honkanen, M., Saarenrinne, P., and Aittamaa, J. Local Bubble Size Distributions, Gas-Liquid Interfacial Areas and Gas Holdups in a Stirred Vessel with Particle Image Velocimetry. *Chemical Engineering Journal*, 2005, Vol. 109, pp. 37-47.

- [25] Pincovschi, I., Oprina, G., and Bunea, F. Photographic Method Applied to Local Gas Hold-Up Measurements. Palermo, Italy, 2008. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Multiphase Flow in Industrial Plants, pp. 667-674.
- [26] Ayala, O. F., Ayala, L. F., and Ayala, O. M., 2007, "Multi-phase Flow Analysis in Oil and Gas Engineering Systems and its Modelling", Hydrocarbon World 2007, Touch Oil and Gas Publications, Issue I, pp. 57-61.
- [27] Ultrasonic Transducers Technical Notes. Panametrics-Olympus.  
<http://www.olympusndt.com/en/> [Online] 2009.
- [28] Dias, S., França, F. A., Rosa, E. S. Statistical Method to Calculate Local Interfacial Variables in Two-Phase Bubbly Flows Using Intrusive Crossing Probes. Journal of Multiphase Flow, 2000, Vol. 26, 11, pp. 1797-1830.
- [29] Dias, S. G. Phase Distributions in Axially Symmetrical Bubbly Flows: Application of the Two-Fluid Model and Experimental Verification Using Intrusive Crossing Probes (in Portuguese). Ph.D. Thesis, 1998, Campinas State University (UNICAMP), Campinas, SP, Brazil.
- [30] Carvalho, R. D. M., Venturini, O. J., Neves Jr., F., e França, F. A. Axial Bubbly Flow Topology: A Comparative Study Using the Ultrasonic Technique and High-Speed Filming. HEAT 2008, Fifth International Conference on Transport Phenomena In Multiphase Systems, Bialystok, Polônia.
- [31] Jones, S. W., Amblard, A., Favreau, C. Interaction of an Ultrasonic Wave with a Bubbly Mixture. Experiments in Fluids, 1986, Vol. 4, p. 341-349.
- [32] Langton, C. M. e Njeh, C. F. The Measurement of Broadband Ultrasonic Attenuation in Cancellous Bone—A Review of the Science and Technology, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, Vol. 55, pp. 1546-1554