

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS PARA
ANÁLISE DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS DO
TIPO LÍQUIDO-SÓLIDO E LÍQUIDO-SÓLIDO-GÁS**

Autor: **Túlio André Paiva**

Orientador: **Prof. Osvaldo José Venturini**

Co-orientador: **Prof. Ricardo Dias Martins de Carvalho**

Itajubá, Junho de 2011

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS PARA
ANÁLISE DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS DO
TIPO LÍQUIDO-SÓLIDO E LÍQUIDO-SÓLIDO-GÁS**

Autor: **Túlio André Paiva**

Orientador: **Prof. Osvaldo José Venturini**

Co-orientador: **Prof. Ricardo Dias Martins de Carvalho**

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, Junho de 2011

MG – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS PARA
ANÁLISE DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS DO
TIPO LÍQUIDO-SÓLIDO E LÍQUIDO-SÓLIDO-GÁS**

Autor: Túlio André Paiva

Orientador: Prof. Osvaldo José Venturini

Co-orientador: Prof. Ricardo Dias Martins de Carvalho

Composição da Banca Examinadora:

Dr. Valdir Estevam - PETROBRAS

Prof. Dr. Marcelo José Pirani

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

Prof. Dr. Osvaldo José Venturini - IEM/UNIFEI

Dedicatória

*Aos meus pais Paulo e Terezinha
aos meus amigos
e todos companheiros de trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Osvaldo José Venturini, pela competência, dedicação, paciência e amizade.

Ao meu Co-orientador, Prof. Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho, pela colaboração e amizade.

Aos amigos, Enio Tanahashi, Tiago Mendes, José Luiz Gonçalves, Luis Felipe Carollo, Bruno Cantarutti, e aos amigos do NEST, pelo permanente incentivo, colaboração, amizade, momentos de convívio profissional.

Aos Professores da Universidade Federal de Itajubá, Luiz Fernando Barca, Marcos Aurélio de Souza, pelo apoio e valiosas sugestões, que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, representado pelos seus dedicados Professores e Funcionários, pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho, e aos amigos desse Instituto, pelo convívio profissional.

Ao CNPq, através do Programa de bolsas, pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, Paulo Roberto Paiva e Terezinha das Graças Paiva, que sempre me incentivaram na formação e no desenvolvimento cultural.

O que deve ser alto é o valor de suas idéias, e não o tom de sua voz.

RESUMO

PAIVA, T. A. (2011), *Aplicação de Técnicas Ultrassônicas para Análise de Escoamentos Multifásicos do Tipo Líquido-Sólido e Líquido-Sólido-Gás*, Itajubá, 131p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Os requisitos da medição de vazão multifásica e garantia do escoamento da produção de poços de petróleo impõem vários desafios tecnológicos. Estes desafios são muito comuns na indústria, e envolvem ambientes hostis e partículas em suspensão. A superação destes desafios requer novas metodologias que vão desde estudos dos fenômenos básicos de escoamentos multifásicos ao desenvolvimento de técnicas para aplicação imediata em situações específicas da indústria petrolífera. Por esta razão, existe um grande interesse no estudo de técnicas não invasivas e de resposta rápida para medição das fases dispersas. Além disso, informações da estrutura do escoamento são essenciais para classificar e para analisar os processos de transporte envolvidos. Assim, neste trabalho, será descrito um estudo para a utilização da técnica de ultra-sônica para as medidas de frações de sólidos e medidas das frações de vazão para caracterização de escoamentos multifásicos verticais com baixa concentração das fases dispersas. Os dados obtidos de uma montagem experimental construída para simulações de escoamentos simplificados foram utilizados para estudar a natureza do sinal de ultrassom (tempo de trânsito e atenuação acústica) em escoamentos multifásicos, ou seja, procura-se identificar como os fenômenos acústicos de atenuação e transmissão através destes escoamentos se refletem nos sinais de ultrassom. Deste modo, pretende-se disponibilizar informações importantes para o futuro desenvolvimento de instrumentos não-intrusivos (sondas) para medição multifásica de vazão e caracterização de escoamentos baseados em ultrassom.

Palavras-chave: Escoamento do tipo líquido-sólido; líquido-sólido-gás; técnicas ultrassônicas; atenuação acústica; tempo de trânsito.

ABSTRACT

PAIVA, T. A. (2011), *Application of Ultrasonic Technique for Multiphase Flows Analysis of Type Liquid-Solid and Solid-Liquid-Gas*, Itajubá, 131p. Dissertation (Master Degree in Energy Conversion) - Institute of Mechanical Engineering, University of Itajubá.

The requirements of measurement of multiphase flow and ensure the flow of production oil wells require several technological challenges. These are very common in industry, involve harsh environments and fluids and suspended particle. The overcoming of these challenges demands studies of the basic multiphase flow phenomena and the development of specific techniques that can be immediately applied in the oil or any other industry. For this reason, there is a need to determine noninvasive fast responding techniques, besides, knowledge of the flow structure is essential for the assessment of the transport processes involved. Thus, this work will be described an study the technique using ultrasound to measure the void fraction and measure fractions of solids to characterize vertical multiphase flow with a low concentration of dispersed phases. Data from this experimental setup will be used to study the nature of the signal of ultrasonic (transit time, acoustic attenuation) in multiphase flow, and attempt will be to identify how the phenomena of acoustic attenuation and transmission through these outlets are reflected in the signs of ultrasound. Thus, it is intended to provide important information for the future development of non-intrusive instruments (probes) for measuring multiphase flow and flow characterization based on ultrasound. 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: liquid-solid flow; liquid-solid-gas flow; ultrasonic technique; acoustic attenuation; transit time.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	IV
SUMÁRIO	II
LISTA DE FIGURAS.....	IV
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. MOTIVAÇÃO.....	3
1.2. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	3
1.3. JUSTIFICATIVA.....	4
1.4. DELINEAMENTO	5
CAPÍTULO 2.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO.....	7
2.2 ESCOAMENTOS HORIZONTAIS.....	8
2.3 ESCOAMENTOS VERTICAIS.....	10
2.4 ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA	12
CAPÍTULO 3.....	35
3 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTO DE MEDIDA	35
3.1 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	35
3.1.1 <i>Circuito Trifásico Água-Areia-Ar</i>	35
3.1.2 <i>Instrumentação Ultra-sônica</i>	40
3.2 PROCEDIMENTO DE MEDIDA	44
3.2.1 <i>Escoamento Bifásico e Aquisição de Dados</i>	46

3.2.2	<i>Procedimento de Operação de Circuito Trifásico e Tomada de Dados</i>	54
	CAPÍTULO 4	58
	4 RESULTADOS	58
4.1	TRATAMENTO DOS PULSOS ULTRASSÔNICOS.....	58
4.2	ATENUAÇÃO ACÚSTICA EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS	66
4.2.1	<i>Análise do sinal em Transmissão Direta (Sensor a 180°)</i>	67
4.2.2	<i>Tempo de Trânsito</i>	77
4.3	ATENUAÇÃO EM BANDA LARGA BUA.....	83
	CAPÍTULO 5	96
	5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	96
5.1	CONCLUSÕES.....	96
5.2	SUGESTÕES.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	APÊNDICE	105
I.	ANÁLISE DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS PARA OS SENSORES DE 0°, 45° E 135°	105
II.	CÁLCULO DA PROPAGAÇÃO DO ERRO.....	107
a)	DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	107
b)	ERRO	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Padrões de escoamento em tubulação horizontal. [Fonte: Silva (2000)].	9
Figura 2: Padrões de escoamentos em tubulação vertical [Fonte: Silva (2000)].	10
Figura 3: Regime de escoamento ascendente do tipo líquido-gás. [Fonte: (Ali, 2009)].	15
Figura 4: Velocidade em função da concentração de sólidos [Fonte: Kytömaa (1995)].	24
Figura 5: Limites de baixa e alta frequência pelo raio das partículas [Fonte:Kytömaa(1995)]	25
Figura 6: Método Pulso-Eco [Fonte: Maia (2001)].	27
Figura 7: Método transmissão-recepção [Fonte: Maia (2001)].	28
Figura 8: Exemplos para se determinar o tempo de trânsito [Maia (2000)].	31
Figura 9: Tipos de ondas.	32
Figura 10: Representação da seção de teste de ultrassom.	34
Figura 11: Circuito de teste de escoamento multifásico.	36
Figura 12: Desenho esquemático da estação de ultrassom.	41
Figura 13: Sensores de ultrassom. [Fonte: Ultrasonic Transducers Technical Notes]	42
Figura 14: Campo próximo característico [Fonte: Ultrasonic transducers technical notes]	43
Figura 15: Espessura da camada limite (δ).	51
Figura 16: Sinal no domínio do tempo.	60
Figura 17: Espectro característico do transdutor da panametrics modelo DHC706-RM 2,25 MHz	62
Figura 18: Espectro característico do sensor ultrassônico	63

Figura 19: Sinal no domínio da frequência.	63
Figura 20: Corte dos ruídos no domínio da frequência.....	65
Figura 21: Sinal no tempo sem ruído.	66
Figura 22: Sinal em transmissão direta (180°). [Fonte: Tanahashi et al. (2010)].....	68
Figura 23: Onda longitudinal para algumas concentrações (bifásico 180°).....	69
Figura 24: Onda longitudinal para algumas concentrações (Trifásico 180°).....	71
Figura 25: Razão de energia em função da concentração de sólidos (Bifásico).	74
Figura 26: Razão de Energia em função da concentração de sólidos (Trifásico).....	75
Figura 27: Tempo de trânsito para o sensor de 180°	78
Figura 28: Tempo de trânsito inicial (180° Trifásico)	79
Figura 29: Atenuação de alguns pulsos em função da concentração (Bifásico 180°).	86
Figura 30: Atenuação de alguns pulsos em função da concentração (Trifásico 180°).	86
Figura 31: Espectro de frequência das médias de todas as concentrações (Bifásico 180°).	87
Figura 32: Espectro de frequência das médias de todas as concentrações (Trifásico 180°). ...	88
Figura 33: Detalhamento do espectro para quatro concentrações diferentes (Bifásico 180°) .	89
Figura 34: Detalhamento do espectro para quatro concentrações diferentes (Trifásico 180°)	90
Figura 35: Atenuação em banda larga (Bifásico 180°)	90
Figura 36: Atenuação em banda larga (Trifásico 180°)	91
Figura 37: Região de atenuação quase linear para algumas concentrações (Bifásico 180°)....	92
Figura 38: Região de Atenuação quase linear para algumas concentrações (Trifásico 180°) .	93
Figura 39: nBua em função da concentração de sólidos para os dois escoamentos.	94

Figura 40: Sinal no Domínio do Tempo para o Sensor 0°	105
Figura 41: Sinal no Domínio do Tempo para o Sensor 45°	106
Figura 42: Sinal no Domínio do Tempo para o Sensor 135°	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros para identificação de regimes de propagação.	23
Tabela 2: Composição química das micro-esferas de vidro.....	46
Tabela 3: Distribuição do tamanho das micro-esferas.	47
Tabela 4: Faixas de concentração das micro-esferas de vidro	49
Tabela 5: Parâmetros de aquisição.....	53
Tabela 6: Dados básicos para o experimento bifásico	53
Tabela 7: Dados adquiridos na seção de teste (bifásico).....	54
Tabela 8: Comparação entre as amplitudes do escoamento bifásico e trifásico (180°).....	72
Tabela 9: Dados acústicos em sistemas multifásicos de alguns autores na literatura.....	81
Tabela 10: Valores de nBUA para o bifásico e trifásico.....	94

NOMENCLATURA

k	número de onda [m^{-1}]
a	raio da partícula sólida [μm]
Re	Número de Reynolds [-]
δ	espessura da camada limite [μm]
ρ	massa específica [kg/m^3]
ω	freqüência angular partícula ω [rad/s]
μ	viscosidade dinâmica N.s/ m^2]
f	freqüência sensor [MHz]
T	elemento emissor
d_i	comprimento meios ($i=1,2,\dots$)
AR1	parte da onda refletida no meio 1
AR2	parte da onda refletida no meio 2
At	parte da onda transmitida
A_i	Amplitudes nos meios ($i=1,2,\dots$)
VR	velocidade de propagação do som no meio de referência (água)
dtr	distância entre os transdutores
TR	tempo de propagação do som no meio de referência (sem o objeto)
V_{psm}	velocidade de propagação do som no material analisado
d	espessura do material a ser analisado
t_m	tempo de propagação apenas no objeto
Z	comprimento da tubulação de acrílico
D	diâmetro da tubulação de acrílico
N	distância do campo próximo
D_{sensor}	diâmetro do elemento do transdutor
c	velocidade do som no meio [m/s]
λ	comprimento de onda. λ [m]
u	velocidade relativa do perfil de velocidades
u_∞	velocidade não perturbada do perfil de velocidades
f_a	freqüência de amostragem [MHz]
f_p	freqüência de pulsação
V_p	Voltagem do Pulsador [V]

T_{LFE}	Temperatura do ar no bocal de injeção de ar absoluta [K]
T_{Teste}	Temperatura da água que passa pelo medidor de vazão absoluta [K]
P_{LFE}	Pressão do ar no bocal de injeção de ar [bar]
P_{Teste}	Pressão da água próxima o bocal de injeção de ar [bar]
$D_{tubulação}$	diâmetro da tubulação de acrílico [m]
Q_{std-ar}	Vazão de ar registrado pelo medidor de vazão (laminador)
$Q_{água-coriolis}$	vazão de água do escoamento [m ³ /s]
$Q_{atual-ar}$	vazão de ar em [m ³ /s]
$Q_{atual-seção\ de\ teste}$	vazão de ar volumétrica na secção de teste
$\rho_{ar-Teste}$	massa específica do ar na seção de teste
$\rho_{água-Teste}$	massa específica da água na seção de teste
$Q_{água-seção\ de\ teste}$	vazão de água na secção de teste
$A_{tubulação}$	área da tubulação de acrílico; [m ²]
J_{ar}	velocidade do ar na seção de teste; [cm/s]
$J_{água}$	velocidade da água na seção de teste; [cm/s]
J_{Total}	soma das duas velocidades na seção de teste
α_{real}	fração de vazio [%]
C_o	parâmetro de distribuição para cálculo da fração de vazio média. [-]
V_{gj}	velocidade de deslocamento média ponderada. [cm/s]
E	energia total que chega ao receptor [J]
$\frac{E_{2\phi}}{E_{1\phi}}$	Razão de energia. [-]
I	intensidade do sinal. [V]
dt	diferencial de tempo. [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]
$\Delta t_{inicial}$	Tempo de trânsito inicial
m.e.v	micro-esferas de vidro
BUA	<i>Broadband Ultrasound Attenuation</i> - Atenuação em banda larga
nBUA	Atenuação em Banda Larga normalizada [dB/Hz. m]

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Os requisitos de medição multifásica da vazão e garantia do escoamento da produção de poços de petróleo impõem vários desafios tecnológicos. Tais desafios requerem estudos que vão desde os fenômenos básicos de escoamentos multifásicos ao desenvolvimento de técnicas para aplicação imediata em situações específicas da indústria petrolífera.

Entre estes desafios também está a medição da concentração das fases dispersas em escoamentos multifásicos de óleo, gás, água e partículas sólidas. A realização destas medidas requer a compreensão e o domínio de fenômenos complexos, tais como a influência da configuração das fases e da presença de contaminantes sobre o princípio de funcionamento dos medidores utilizados. Portanto, medidas da fração de vazio e de concentrações de partículas sólidas em escoamentos multifásicos requerem instrumentação apropriada para que se possa inferir a topologia das fases em situações nas quais não é possível introduzir medidores na tubulação, tampouco visualizar este escoamento. Esta instrumentação, em alguns casos, ainda necessita ser desenvolvida utilizando-se técnicas de medição não intrusivas, de resposta rápida e que permita o tratamento do sinal em tempo real.

1.2. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho tem por objetivo utilizar técnicas ultrassônicas em um circuito de teste de escoamento multifásicos, focado em escoamentos bifásicos líquido-sólido e trifásicos líquido-sólido-gás, tendo este circuito o objetivo de permitir a aquisição e o tratamento dos dados

experimentais. Os escoamentos multifásicos a serem estudados são uma simplificação daqueles que ocorrem na indústria petrolífera.

Os seguintes objetivos específicos podem ser citados:

- Construção de um aparato experimental para realizações dos escoamentos multifásicos;
- Utilização de um programa computacional para aquisição dos dados de operação do aparato experimental (temperatura, pressão e vazão) e aquisição de dados ultrassônicos.
- Análise dos dados ultrassônicos no domínio de tempo para os escoamentos citados acima:
 - a. Correlação entre níveis de atenuação acústica e concentração de areia no escoamento bifásico e concentração de areia e de fração de vazio no escoamento trifásico;
 - b. Correlação entre o tempo de trânsito com as concentrações de micro-esferas de vidro nos escoamentos bifásico e trifásico.

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

1.3. JUSTIFICATIVA

Escoamentos multifásicos são comumente encontrados nas indústrias de petróleo, química e nuclear, geralmente envolvendo ambiente perigoso, de difícil acesso, insalubre, bastante remoto, entre outros. Por inúmeros motivos, no estudo de escoamentos multifásicos, as técnicas de medidas não invasivas vêm ganhando um grande interesse para medição de fases dispersas em escoamentos multifásicos.

Considerando esses desafios encontrados para se medir as concentrações das fases dispersas em escoamentos multifásicos, este trabalho tem por objetivo fazer uso de um

programa computacional para a aquisição e tratamento em tempo real de dados acústicos obtidos a partir de uma instrumentação ultra-sônica de configuração mais simples em um circuito de testes.

Este estudo permite em uma escala laboratorial reproduzir de maneira mais simplificada os fenômenos em grandes escalas encontrados nos escoamentos reais. Onde dificuldades em se entender o comportamento dos escoamentos multifásicos encontrados em aplicações industriais podem ser compreendidos em experimentos em pequena escala.

Neste circuito de teste foi previsto uma estação ultra-sônica mantida intencionalmente bastante simples, fazendo uso apenas de quatro sensores em meio hemisfério de uma tubulação vertical de acrílico. Os dados obtidos desta estação ultra-sônica em conjunto com dados da instalação como vazão, pressão, temperatura entre outros, em conjunto fornecem dados suficientes para estudar os dados e compreender o comportamento da variação das fases dispersas nos escoamentos multifásicos simplificados que serão estudados.

1.4. DELINEAMENTO

Capítulo 1 é apresentado uma descrição sucinta da motivação do trabalho, procurando mostrar e situar o contexto deste trabalho. Aborda também o objetivo da dissertação, explicitando qual o foco do trabalho. Por fim a justificava, deixa evidente qual meta pretende-se atingir com esta dissertação.

No capítulo 2 faz-se uma revisão da literatura relevante ao tema, abordando os principais assuntos correlacionados ao estudo da técnica ultra-sônica e escoamentos multifásicos. Passando por definições básicas de escoamentos, técnicas utilizadas na literatura para caracterização destes tipos de escoamentos e finalmente revendo quais tipos de técnicas e métodos existentes permitiram embasar todo este trabalho

No capítulo 3 é descrito o dispositivo experimental, apresentando detalhadamente todo o ciclo de teste, as seções da estação ultra-sônica e tomada de dados bem como as formas que se obtiveram os escoamentos bifásicos e trifásicos. Será descrito também, as formas que se deram a operação do circuito multifásico bem como a aquisição dos pulsos ultrassônicos.

No capítulo 4 são analisados os dados acústicos. Neste capítulo é descrito como se deram os tratamentos dos sinais ultrassônicos, como estes foram interpretados e correlacionados com a atenuação acústica em função das concentrações das fases dispersas, bem como suas correlações com o tempo de trânsito além de uma análise da atenuação acústica considerando o método de atenuação em banda larga.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões resultantes deste trabalho, para cada um dos escoamentos estudado. Também apresenta uma contribuição científica bem como sugestões para trabalhos futuros

Nos apêndices, são expostas as análises dos pulsos ultrassônicos para os sensores de 0° , 45° e 135° , bem como o cálculo de propagação de incertezas nas medidas efetuadas no trabalho.

Capítulo 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

Escoamento é definido como o ato de escoar, ou seja, fazer ou deixar correr/escorrer um líquido ou fluido que escorre ou flui, um termo muito utilizado para se referir ao movimento de fluidos. Outro termo largamente utilizado é o Escoamento Multifásico que consiste em uma fase líquida (ou meio fluído), e uma fase em partículas ou dispersa em uma fase contínua Nascimento (2007).

A fase contínua pode ser representada por um meio líquido ou gasoso e a fase dispersa podem ser constituídos de partículas sólidas, bolhas de gases ou gotas de líquido. Assim sendo, um sistema multifásico é uma região ou sistema onde coexistem dois ou mais fluidos não miscíveis, separados por uma interface contínua (escoamentos estratificados) ou dispersa (escoamentos dispersos de bolhas ou suspensão).

Desta forma, um escoamento multifásico é definido como dois ou mais fluidos com propriedades diferentes e imiscíveis, escoando simultaneamente em uma dada tubulação. Com relação à fase, esta não é relativa ao estado da matéria (sólido, líquido, gasoso, plasma), mas sim quantidade de interfaces presentes no escoamento multifásico. Por exemplo, escoamento

bifásico significa a presença de uma interface, e pode ser do tipo líquido-líquido imiscíveis, líquido-sólido ou líquido-gás.

Quando as fases líquidas e gasosas escoam juntas dentro de uma tubulação, essas fases distribuem-se segundo configurações interfaciais próprias, isto é, há uma distribuição espacial das fases na mistura, que depende de condições operacionais (vazão, pressão, temperatura etc.), condições geométricas da tubulação (dimensão, inclinação, forma etc.) e de propriedades das fases (densidade, viscosidade etc.), Silva et al. (2000).

Estas características (condições operacionais, condições geométricas e propriedades físicas das fases) combinadas determinam certas classes de configurações interfaciais, normalmente denominadas regime ou padrão de escoamento multifásico. Os padrões mais conhecidos, em escoamento multifásico, são classificados em função de como as fases estão arranjadas dentro da tubulação. Essas classificações são concordantes entre diferentes pesquisadores, e o escoamento pode ser horizontal e vertical.

2.2 ESCOAMENTOS HORIZONTAIS

As classificações dos escoamentos multifásicos são muito recorrentes no setor industrial, tanto na produção quanto no transporte de escoamentos multifásicos. No setor petrolífero, por exemplo, o escoamento bifásico é bastante freqüentemente no interior de colunas de produção e nas tubulações de escoamento. Muitas vezes estas tubulações de produção e transporte destes escoamentos são através de trechos horizontais, inclinados ou verticais.

Devido ao caráter complexo dos escoamentos multifásicos diversas metodologias foram desenvolvidas com a finalidade de identificar padrões de escoamento e estimar gradientes de pressão, por exemplo, Silva et al. (2000)

O conhecimento dessas classificações e padrões de escoamentos é essencial para o dimensionamento de dutos e dos equipamentos da produção petrolífera. Na Figura 1, é possível observar alguns exemplos de padrões de escoamento, no sentido horizontal,

encontrados na produção industrial, representando neste caso, exemplos de escoamentos bifásicos do tipo líquido-gás, segundo Silva et al. (2000).

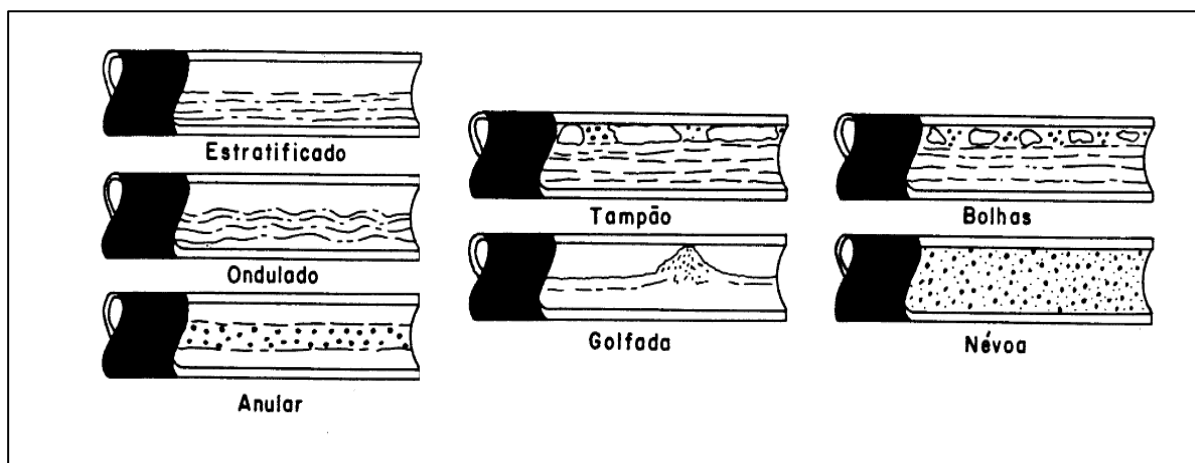


Figura 1: Padrões de escoamento em tubulação horizontal. [Fonte: Silva (2000)].

Descrição dos tipos de escoamentos bifásicos horizontais, Silva et al. (2000):

- Estratificado: o escoamento estratificado se caracteriza pela separação gravitacional total das fases líquida e gasosa com escoamento contínuo de cada fase;
- Ondulado: com o aumento da velocidade da fase gasosa, no escoamento estratificado, ondas são formadas na interface de separação entre a fase líquida e a fase gás, gerando o regime ondulado;
- Anular: o escoamento anular ocorre com altas vazões de gás. O líquido escoar na superfície interna da tubulação, formando um filme com bolhas dispersas, e o gás escoar no centro da tubulação, carregando líquido atomizado. Devido ao efeito gravitacional, a espessura do filme formado pela fase líquida diminui quando se caminha para o topo da tubulação.
- Tampão: com o aumento da velocidade da fase gasosa no escoamento em bolhas, há o coalescimento, formando bolhas alongadas em forma de balas, que tendem a escoar no topo da tubulação;
- Golfada: aumentando ainda mais a velocidade do gás no escoamento ondulado, as ondas passam a ocupar, em alguns casos, toda a seção transversal da tubulação formando golfadas de gás e/ou líquido, que são rapidamente deslocadas dentro da tubulação. Golfadas de gás e líquido se sucedem na tubulação com a de líquido carregando pequenas bolhas dispersas;

- Bolhas ou borbulhante: o escoamento em bolhas, devido ao efeito gravitacional (a fase gasosa em forma de bolhas discretas), tende a se dispersar no topo da tubulação com a fase líquida contínua;
- Névoa: este padrão de escoamento é caracterizado por velocidades superficiais de gás e líquido muito altas. Todo líquido encontra-se disperso no núcleo gasoso e as gotículas formadas pelo líquido viajam à mesma velocidade superficial do gás;

2.3 ESCOAMENTOS VERTICAIS

Da mesma forma que no escoamento horizontal, estes padrões de escoamentos também são classificados em tubulações dispostas na direção vertical, sendo nesta configuração vertical a apresentada no presente trabalho. Analogamente ao caso de escoamento horizontal apresentado anteriormente, os padrões de classificação de escoamento na configuração vertical são apresentados na Figura 2, utilizando novamente como exemplo o escoamento bifásico líquido e gás, Silva (2000).

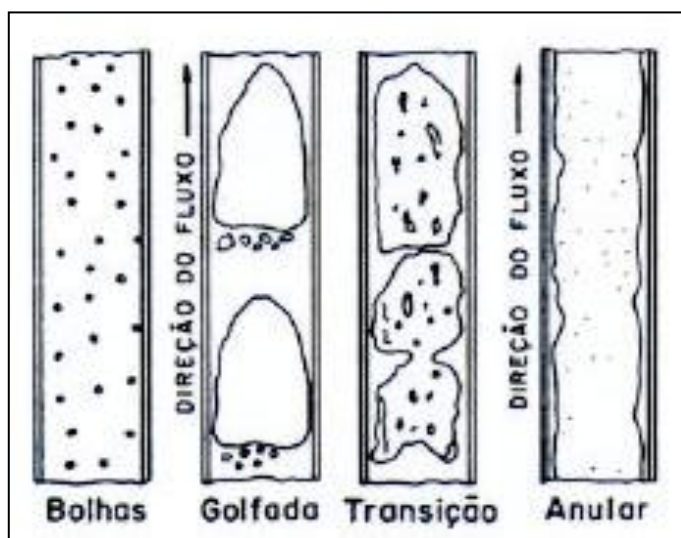


Figura 2: Padrões de escoamentos em tubulação vertical [Fonte: Silva (2000)].

- Bolhas ou bolhas discretas: no escoamento em bolhas, a fase gasosa se encontra dispersa na fase líquida em bolhas discretas, sendo a fase líquida contínua. Esse escoamento ocorre tipicamente para baixas velocidades superficiais de gás;

- Golfadas: aumentando a velocidade da fase gasosa, as bolhas coalescem e o diâmetro destas novas bolhas atingem dimensões similares com a da tubulação. Quando isto ocorre, formam-se bolhas grandes em formato de bala, também denominadas bolhas de Taylor, com isto, golfadas de gás e líquido se sucedem na tubulação com a golfada de líquido apresentando pequenas bolhas dispersas;
- Transição: com as velocidades de gás e líquido maiores do que no caso anterior, a quebra das bolhas do escoamento em golfadas conduz a um padrão instável e desordenado, onde existe um movimento oscilatório de líquido para cima e para baixo na tubulação;
- Anular: o líquido escoar na periferia do duto formando um filme com bolhas dispersas, e o gás escoar no centro da tubulação, carreando gotículas de líquido.

Na indústria de petróleo, o escoamento multifásico está presente em todo o percurso dos fluidos produzidos, desde a rocha-reservatório às unidades de separação, passando pela coluna de produção e as unidades industriais de refino.

Como na maioria das atividades industriais, os escoamentos multifásicos são indesejáveis e inevitáveis, a sua ocorrência causa forte impacto no modo de operação dessas atividades e conseqüentemente sobre os seus custos operacionais, como por exemplo, os escoamentos em golfadas, por causarem sérias instabilidades operacionais.

Para minimizar o impacto causado pela ocorrência do escoamento multifásico, a medição em tempo real de propriedades e parâmetros (vazão, conteúdo de água no óleo, fração volumétrica, quantidade de sólidos etc.) permite encontrar soluções mais adequadas para redução dos custos, aumento da produtividade, melhoria na qualidade dos produtos, minimizando os desperdícios.

Com este estudo, pretende-se apresentar os problemas gerados pelos escoamentos multifásicos assim como as vantagens apresentadas pela substituição dos métodos convencionais (amostragem, separação) de medição de propriedades e parâmetros em escoamento multifásico, por medidores multifásicos.

2.4 ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

Escoamentos multifásicos podem ser encontrados em diversas áreas de conhecimento, tais como nas indústrias química, alimentícia e petrolífera, como na produção, transporte e refino de petróleo e gás natural. O conhecimento das propriedades relacionadas a este tipo de escoamento é fundamental para o planejamento e dimensionamento adequado de equipamentos e técnicas utilizados nesses setores.

Durante as fases de produção e transporte de petróleo, líquido, gás e partículas sólidas podem ser encontrados escoando simultaneamente no interior de dutos. As fases presentes podem, portanto, estar dispostas em diversas configurações espaciais, que são denominadas de padrões de escoamento.

Os padrões de escoamento estão diretamente relacionados às velocidades superficiais das fases presentes, isto é óleo, água, partículas sólidas e gás, os quais estão diretamente relacionados com o retorno ou os gastos econômico do investimento realizado no campo.

A identificação dos padrões de escoamento é essencial para a determinação do gradiente de pressão ao longo das linhas de produção e transporte de óleo e gás, cujo conhecimento é indispensável ao adequado dimensionamento dessas linhas.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas com o objetivo de desenvolver métodos para previsão dos padrões de escoamento e estimativa dos gradientes de pressão ao longo de tubulações de produção de petróleo.

Em geral, duas abordagens são consideradas: os modelos fenomenológicos mecanicistas e as correlações empíricas. Os primeiros visam ao desenvolvimento de correlações para cálculo de perda de carga e frações volumétricas, através da análise dos fenômenos a partir das leis da mecânica dos fluidos.

A moderna metodologia empírica, por outro lado, é baseada no estabelecimento das variáveis físicas que governam a perda de carga (vazões, propriedades físicas das fases e geometria do duto), buscando determinar uma relação matemática entre os grupos

adimensionais relevantes ao problema. Tanto os modelos fenomenológicos quanto as correlações empíricas precisam ser validados através de dados experimentais.

Considerando que os fluídos são imiscíveis e formam uma interface entre eles, tem-se como exemplo o sistema água-areia, onde as duas substâncias, uma no estado líquido e a outra no estado sólido, formam no contexto deste trabalho, um sistema bifásico do tipo líquido-sólido. Outros exemplos de escoamentos multifásicos podem ser encontrados de acordo com suas combinações:

- Escoamentos do tipo líquido-gás;
- Escoamentos do tipo líquido-líquido;
- Escoamentos do tipo líquido-gás-sólido, entre outros.

Este trabalho é focado em escoamentos do tipo líquido-sólido e líquido-sólido-gás. Em sistemas envolvendo micro-partículas sólidas, seja a fase contínua líquida ou gasosa, as partículas sólidas constituem sempre uma fase dispersa, embora possa existir mudança nas dimensões das partículas mediante a quebra ou agregação das mesmas. Já em sistemas líquido-gás as formas das gotas ou bolhas podem variar dependendo da fração volumétrica e velocidade das fases, ocasionando mudanças nos padrões do escoamento, Ali (2009).

Os escoamentos podem adotar várias distribuições físicas conhecidos como padrões de escoamentos (ou regimes de escoamentos) Esses padrões de escoamentos podem ser detectados por vários métodos, no entanto, eles podem ser classificados em métodos tradicionais (observação direta ou fotografia em tubo transparente) ou métodos comparativos "indiretos" (variação da fração de vazio, variação de pressão, raios x, raios gama, luz fluorescente, tomografia etc.), Ali (2009).

Diferentes princípios físicos são usados para medição e determinação de parâmetros e propriedades em escoamento multifásico. Geralmente, as propriedades são medidas diretamente e os parâmetros são determinados e correlacionados com alguma propriedade.

A medida de propriedade em escoamento multifásico, permite a determinação de diferentes parâmetros, tais como, fração volumétrica, concentração de partículas, conteúdo de água em óleo, e velocidade, Silva et al. (2000).

A medida da fração volumétrica, em um escoamento de duas ou mais fases, é feita combinando-se diferentes princípios físicos. Por exemplo, em escoamento de vapor úmido (duas fases), a qualidade do vapor, pode ser determinada com um instrumento. No caso de óleo, água e gás (três fases), dois instrumentos.

Quando duas ou mais fases escoam em uma tubulação, normalmente suas velocidades são diferentes, ou seja, existe um escorregamento entre as fases. O escorregamento é a diferença entre a velocidade de uma fase em relação à outra.

Desta forma, em alguns tipos de escoamentos é possível medir a velocidades de algumas fases do escoamento multifásico, por exemplo, utilizando princípios e métodos como variação de velocidades (Venturi, placa de orifício) ou medidores de deslocamento positivo ou correlação cruzada, entre outras. Os métodos mais usados são a correlação cruzada e o Venturi.

Sendo os escoamentos multifásicos muito comuns nas indústrias petrolíferas, e por inúmeros motivos, técnicas de medição não invasivas tem atraído muito interesse tanto para a medição da concentração da fase dispersa (partículas sólidas, líquidas ou gás) quanto para detecção do padrão de escoamento. A necessidade de conhecer os padrões de escoamento e classificá-los fica evidente.

Alguns tipos recorrentes de padrões de escoamentos encontrado na literatura, considerando os escoamentos verticais ascendente, foram identificados três tipos de escoamentos segundo as classificações propostas por Carvalho et al. (2008) e Nascimento (2007).

Bolhas dispersas "bubbly flow", escoamento em golfadas "slug flow" e o escoamento anular "Annular", sendo possível ainda segundo outros autores outras classificações ou subclassificações desses escoamentos.

Na Figura 3, observa-se a seqüência de padrões que seria normalmente vista com o aumento da velocidade superficial do gás em um escoamento do tipo líquido-gás.

- Escoamento borbulhante
- Escoamento em golfadas/Intermitente
- Escoamento anular

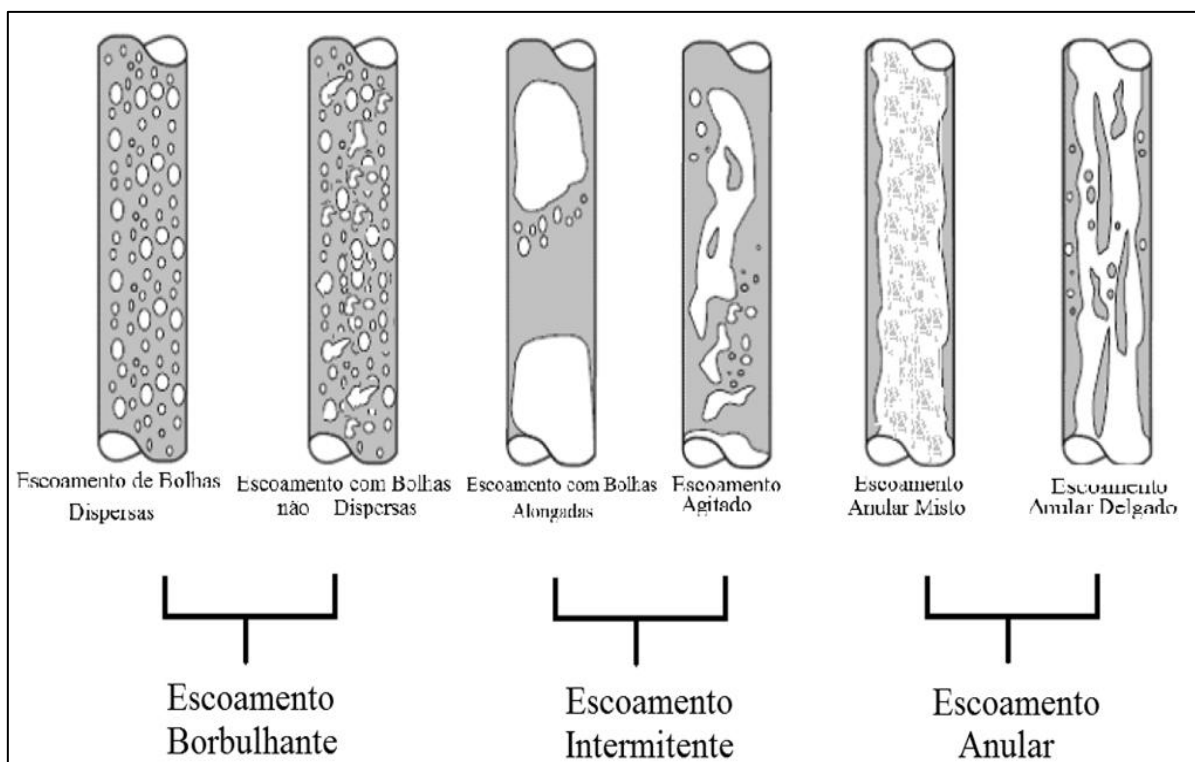


Figura 3: Regime de escoamento ascendente do tipo líquido-gás. [Fonte: (Ali, 2009)].

Métodos para detecção e análise de escoamentos ajudam nas indústrias petroquímicas, por exemplo, em projetos e operações eficientes de escoamentos trifásicos, o grau de dispersão das partículas sólidas em um reator químico deve ser controlado e entendido detalhadamente.

Estudos aplicados a escoamentos multifásicos são realizados com a intenção de se desenvolver técnicas para suprir as necessidades das indústrias no que diz respeito aos escoamentos multifásicos.

Segundo Powell et al. (2008), são usados normalmente cinco métodos de medição não invasivos para determinar parâmetros de um sistema multifásicos. O foco principal são técnicas que podem ser aplicadas imediatamente em casos reais.

- MRI (Magnetic Resonance Imaging): É uma técnica muito versátil, sendo capaz de fornecer medidas para uma ampla faixa de concentração, velocidade, constituintes químicos, e difusão. Considerado muito caro, este é de difícil transporte e necessita de mão-de-obra especializada para sua operação;

- UPDV (Ultrasonic Pulsed Doppler Velocimetry): oferece as mesmas vantagens que o MRI, porém com um custo bem menor em termos de equipamentos usados e de mão de obra especializada;
- EIT (Electrical Impedance Tomography): tem sido pioneiro em estudos de escoamentos multifásicos, com equipamentos de fácil configuração, mas apresentam algumas dificuldades na interpretação dos dados e exigindo uma intensa análise e processamento dos dados. Vem sendo utilizado para estudar a distribuição da concentração de particulados em tubulações;
- Radiografia por Raios-X: é bastante especializada e tem sido usada em estudos de escoamentos multifásicos;
- Radiografia por Nêutrons: Para estudo de sistemas multifásicos envolvendo metais e líquidos. Obtenção de imagens que representam a projeção tridimensional de um objeto no plano, o que limita esta técnica é sua complexidade de operação.

Dessas técnicas, a utilização do ultrassom vem ganhando um enorme interesse para monitoramento de escoamentos multifásicos. Comparado aos métodos citados acima, o ultrassom apresenta maior facilidade de ser manuseado e preço relativamente mais barato.

O ultrassom já é muito utilizado na medicina para diagnósticos e acompanhamentos médicos como também na engenharia na detecção de falhas de materiais sólidos, por exemplo. Os transdutores ultrassônicos e outros equipamentos necessários estão disponíveis comercialmente relativamente com baixos custos comparados a outras técnicas de medição. Além da facilidade e o relativo baixo custo dos uma série de outras vantagens podem ser descritas dos sensores de ultrassom, conforme segue:

- Bastante resistentes;
- Compactos;
- Facilidade na execução do ensaio;
- Velocidade de realização das medidas;
- Alta sensibilidade;
- Ampla gama de dimensões que podem ser utilizadas.

O ultrassom baseia-se no fenômeno de reflexão de ondas acústicas, quando estas ondas encontram obstáculos (meio com diferentes impedâncias acústicas) em seu percurso, parte desta onda sonora é refletida retornando até a sua fonte geradora. A outra parte da onda

continua sua propagação no interior deste outro meio, com diferentes características acústicas (amplitudes e velocidades acústicas) inerentes deste novo meio (obstáculo).

O ultrassom é composto por ondas acústicas com frequências acima do limite audível. Normalmente, as frequências ultrassônicas situam-se na faixa de 0,5 a 25 MHz, sendo este um dos métodos de testes não destrutivo mais utilizado mundialmente para o ensaio de descontinuidades internas em materiais na engenharia.

O pulso ultrassônico é transmitido para o material através de um transdutor especial chamado de emissor. Os pulsos ultrassônicos refletidos por uma descontinuidade (obstáculos), ou por uma interface (diferentes substâncias em contato), são captados pelo transdutor receptor, e desta forma convertidos em sinais eletrônicos que são adquiridos por um computador.

A escolha do equipamento, transdutores e os procedimentos de medidas requerem um cuidadoso estudo para que se obtenha o nível de sensibilidade requerido e a correta interpretação do resultado. Considerando o contexto do presente trabalho, a técnica ultrassônica que foi utilizada leva em conta o contato entre a superfície de uma tubulação e a face do sensor. Deste modo o transdutor é diretamente posicionado em contato com objeto por meio de um acoplamento que permite a ausência de qualquer espaço vazio entre o sistema a se medir e o transdutor/acoplamento.

A escolha da técnica deve ser feita levando-se em consideração a sensibilidade, forma geométrica da tubulação a se analisar, simplicidade de operação, velocidade necessária para a inspeção, etc. Porém, existem certos detalhes nas técnicas ultrassônicas que devem ser lavados em consideração para a realização das medidas. Por exemplo, materiais com alta atenuação acústica (madeira, concreto, certos ferro fundidos e metais não ferrosos), ou a alta temperatura, são materiais que requerem alguns cuidados para realização de medidas acústicas. As superfícies com formato complexo podem afetar a sensibilidade dos pulsos.

O sinal ultrassônico consegue penetrar meios sólidos como paredes de tubos, tanques e se propagar através de fluidos e particulados, sem que este seja degradado ao longo de uma longa faixa pelas condições dos processos, e pode ser monitorado em tempo real e no local de operação, Bond (2003). Porém o ultrassom necessita de aferição para correlação entre os níveis de atenuação acústica com as concentrações das fases dispersas.

Os principais parâmetros acústicos utilizados no monitoramento, controle e medição de processos multifásicos através do ultrassom 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 e espalhamento do feixe acústico. Estas alterações, por sua vez, dependem da concentração e da 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 i.e, o escoamento monofásico, a mesma temperatura, Bond (2003).

Xu et al. (1988), mencionam que uma das dificuldades da técnica ultrassônica é o mal acoplamento entre as impedâncias acústicas das fases, como por exemplo, em escoamentos água-ar ou água-areia. Outra dificuldade é o complexo campo acústico provocado pelos transdutores que gera erro devido à superposição ou múltiplas reflexões dos sinais.

As classificações dos padrões de escoamentos são obtidas a partir de correlações das frações de vazão presente em um escoamento bifásico por exemplo. Porém, essas classificações de padrões de escoamentos são a respeito de escoamentos bifásicos do tipo líquido-gás, por exemplo.

Já para escoamentos que apresentam partículas sólidas dispersas em um escoamento, é possível correlacionar as concentrações das fases dispersas com o tipo de escoamento semelhantes aos padrões de escoamentos encontrados em escoamentos do tipo líquido-gás, conforme trabalho de Doron e Barnea (1996). Estes autores procuram mostrar alguns tipos de escoamentos que são frequentemente encontrados em alguns setores industriais e diferenciá-los. Alguns tipos de escoamentos do tipo sólido-líquido têm influência direta na queda de pressão em tubulações e também podem causar erosão nas paredes da tubulação por exemplo.

Escoamentos que possuem partículas sólidas como fases dispersas tendem apresentar deposições destas partículas no fundo da tubulação, ou até mesmo não acompanhar a direção do escoamento. Estas deposições e acúmulos de partículas sólidas nas tubulações dão origem a três diferentes classificações de escoamentos, Doron e Barnea (1996).

Para estes escoamentos que possuem como fase dispersa partículas sólidas a definição dos padrões baseia-se principalmente em observações visuais, que levam em conta as velocidades de transição entre os padrões, os quais podem ser divididos conforme segue:

- *Escoamento Inteiramente Suspenso*: com altas taxas de misturas devido aos altos valores do escoamento das partículas. Este padrão se subdivide em dois sub-padrões diferentes;
 - ✓ *Suspensão homogênea*: onde as partículas sólidas são distribuídas de forma homogênea em toda seção da tubulação. Para este, as velocidades de mistura são muito altas e não são encontrados na prática.
 - ✓ *Suspensão com escoamento heterogêneo*: onde há um aumento de concentração na direção perpendicular ao eixo do tubo, ou seja, a concentração de partículas é maior na parede da tubulação e diminui seguindo na direção interna da tubulação. Nesta configuração, mais partículas são transportadas em uma parte do tubo que na outra, sendo esse o caso de maior aplicação na prática;
- *Escoamento com Leito Móvel*: com a baixa velocidade do escoamento, existe uma pequena mistura das partículas sólidas. Essas partículas sólidas tendem a se acumular na parte inferior da tubulação. Estas camadas acumuladas formam um leito com um aglomerado de partículas. Este aglomerado de partículas, apesar de muito próximos se move ao longo da tubulação. Na parte superior, é ocupada por uma mistura homogênea;
- *Escoamento com Leito Fixo*: com a velocidade do escoamento muito baixa a mistura das partículas também é muito baixa. Não há como todas as partículas se movimentarem, e neste caso ocorre um depósito estacionário de partículas no fundo da tubulação. Na parte superior existem partículas que se desprendem deste leito fixo de partículas, ou seja, somente as partículas acima deste leito fixo se movimentam, e seguem o sentido do escoamento.

A partir desta diferenciação entre os tipos de escoamentos que apresentam partículas sólidas dispersas em uma suspensão, é possível, com a técnica ultrassônica, fazer correlações com as concentrações de partículas em um dado padrão de escoamento.

Em se tratando das técnicas ultrassônicas, antes é necessário falar um pouco a respeito do ultrassom. O ultrassom é definido como a faixa de frequência acima de 20 kHz, passando pelas faixas de MHz e, finalmente, até atingirem frequências em torno de 1 GHz. Acima destes limites estas frequências são consideradas como regime hipersônico.

Os estudos utilizando ultrassom começaram realmente com o desenvolvimento de transdutores submarinos durante a Primeira Guerra Mundial. Estes emissores de pulsos

ultrassônicos utilizavam a água para a transmissão eficaz de ondas acústicas para grandes distâncias, Cheeke (2002).

Estes esforços na detecção de submarinos foram estimulados em 1912 com o naufrágio do RMS Titanic pela colisão do navio com um iceberg. Esta tecnologia demonstrou que a resolução para a detecção do iceberg foi melhorada em altas frequências, acelerando o desenvolvimento de técnicas ultrassônicas. Este desenvolvimento levou ao trabalho pioneiro de *Langevin*, que é geralmente creditado como o pai do campo de ultrassônico.

O estímulo imediato para seu trabalho foi à ameaça de submarinos durante a primeira guerra mundial. O Reino Unido e a França criaram um programa conjunto para a detecção de submarinos. *Langevin* também conduziu experimentos em larga escala, até 2 km de distância, no rio Sena, onde ele substituiu o antigo transdutor de pulsos por um elemento de quartzo, resultando em uma melhora no desempenho e na detecção em uma distância de até 6 km, (Cheeke, 2002).

O ultrassom, em sua definição mais simples, refere-se à energia associada a ondas acústicas com uma frequência de 20.000 Hz ou mais, Butz e Tauscher (2002). O ouvido humano é capaz de perceber sons de frequências compreendidas entre 16 Hz e 20.000 Hz, aproximadamente.

Warsito et al. (1999), também utilizaram técnicas ultrassônicas denominado UCT (Ultrasound Computerized Tomography), técnica esta que vem sendo estudada por muitos pesquisadores desde o início dos anos 80 para a visualização da distribuição do escoamento bifásico líquido/gás ao longo da seção transversal da tubulação. Estes autores fizeram uma revisão das técnicas não invasivas para monitoramento de escoamentos borbulhantes gás-líquido. O UCT foi dito como a técnica mais apropriada para aplicação em meios com pouca penetração de luz ou outra radiação eletromagnética. Isto é o caso de meios homogêneos e de alta densidade.

Entretanto, duas limitações da técnica UCT se opõem a sua utilização em aplicações onde o desempenho em tempo real é essencial. Estas limitações foram na utilização da técnica para medir a distribuição de partículas sólidas e bolhas ao longo de uma seção transversal de uma coluna de mistura de água. E o complexo campo acústico provocado pelos transdutores gera erro devido à superposição ou múltiplas reflexões dos sinais e a lenta propagação do ultrassônico

Xu et al. (1997), mostraram outra dificuldade relacionada a técnica UCT, onde o mau acoplamento entre as impedâncias acústicas das fases, por exemplo, em escoamentos água-ar. Já nos trabalhos de Xu et al. (1997) e Xu e Xu (1997), os autores 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 UCT|. Onde 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.

Zheng e Zhang (2004), também apresentaram um estudo a respeito da técnica ultrassônica, onde utilizaram a técnica para obter medidas da concentração das fases dispersas em escoamentos bifásicos do tipo (óleo-gás e óleo-sólido) e trifásicos do tipo (óleo-sólido-gás). Os autores observaram uma queda exponencial na intensidade do sinal recebido com o aumento da área interfacial de ambas as fases dispersas, ou seja, das partículas sólidas e as frações de gás, além de observarem também um aumento no tempo de trânsito, efeito este conseqüente da presença de bolhas de ar.

Considerando que os pulsos ultrassônicos são formados por variações de pressão em um dado meio, estes pulsos podem ser considerados como um tipo de energia mecânica que envolve movimentos vibratórios. Considerando que exista uma força vibratória que mova certas quantidades de massas em um dado escoamento durante um intervalo de tempo é possível obter-se a energia despendida neste processo, sendo esta energia considerada de energia acústica. Esta energia acústica ao atravessar um meio heterogêneo cai rapidamente, devido ao espalhamento e absorção do feixe acústico. A combinação destes efeitos resulta em mudanças na velocidade e na atenuação acústica do pulso ultrassônico, Zheng e Zhang (2004).

Quando um feixe ultrassônico encontra uma interface, por exemplo, água-ar, parte deste feixe acústico é transmitido e outra parte é refletida. A parte do feixe que foi refletido volta pelo mesmo meio que foi emitido, retornando com a mesma velocidade. Já a parte do feixe que é transmitido, ou seja, que atravessa a fase ar esta exposto a um meio com impedâncias acústicas diferentes, e conseqüentemente apresentara uma nova velocidade com diferenças em sua amplitude também.

As bolhas de gás afetam a velocidade do som devido as grandes distorções que as superfícies destas bolhas causam no feixe acústico ao seu redor, acarretando em uma ligeira variação no tempo de propagação do pulso ultrassônico e redução da amplitude acústica do mesmo, Zheng e Zhang (2004).

Da mesma forma que a presença do gás, as partículas sólidas também afetam o tempo de propagação do pulso ultrassônico e sua amplitude. Porém os efeitos causados pela dispersão de partículas sólidas são diferentes dos efeitos da fase gasosa. Em escoamentos bifásicos do tipo líquido-sólido, o pulso ultrassônico ao percorrer a fase contínua, apresenta uma velocidade de acordo com a impedância acústica deste meio.

Mas quando este pulso acústico encontra uma interface do tipo líquido-sólido, e começa a propagar neste novo meio (sólido), o pulso se propaga neste meio com uma velocidade maior que foi percorrida no líquido e segundo as novas características de impedância do meio sólido, Zheng e Zhang (2004). Fica evidente que as variações causadas nas amplitudes e velocidade do som devido a presença de fases dispersas (gás e/ou sólidos) em um dado meio contínuo são necessários estudos para melhor compreender a técnica ultrassônica.

Kytömaa (1995) apresenta uma discussão sobre os mecanismos de atenuação acústica em suspensões de partículas sólidas em líquidos, onde o autor identifica três regimes diferentes de propagação de ondas de compressão em função das escalas de comprimento dominante do processo. O autor menciona dois principais parâmetros que são usados para determinar qual é o regime de propagação em um dado escoamento.

Esses parâmetros são o produto entre o Número da Onda " k " com o raio da partícula sólida " a " e o Número de Reynolds " Re ", conforme mostra a Tabela 1. A partir destes dois parâmetros é possível diferenciar os regimes de propagação. O primeiro regime de propagação é o "Regime de Múltiplo Espalhamento".

Este regime de propagação ocorre para o parâmetro $ka \gg 1$, ou seja, para um valor muito maior que a unidade. Sendo um regime de curto comprimento de onda, onde o espalhamento do feixe acústico ocorre uniformemente em todas as direções, apresentando muita dispersão do feixe e pouca penetração acústica.

Tabela 1: Parâmetros para Identificação de Regimes de Propagação.

Parâmetro ka	Regime de Propagação	Número de Reynolds	Observações
$ka \gg 1$	Regime de múltiplo espalhamento	-	Partículas são grandes em relação ao comprimento de onda e o espalhamento do som acontece em todas as direções.
$ka \ll 1$	Regime de propagação viscoso	$Re \ll 1$	Partículas são muito menores que o comprimento de onda
	Regime de propagação inercial	$Re \gg 1$	Partículas são muito maiores do que a espessura da camada limite

Por outro lado, quando o valor do parâmetro $ka \ll 1$, ou seja, um regime de longo comprimento de onda, os regimes de propagação acústicas se subdividem em dois grupos, ou seja regime de propagação viscosa e regime de propagação inercial. Para a subdivisão dos regimes, é necessário considerar a espessura da camada limite, ou seja, a região próxima à superfície das partículas sólidas, onde são formados os perfis de velocidades (camada limite de Stokes). Para poder-se avaliar a espessura desta camada limite, foi necessário utilizar o conceito do número de Reynolds - "Re", o qual permite a avaliação desta espessura em relação ao raio da partícula.

Desta forma, para o regime com longo comprimento de onda ($ka \ll 1$) onde as partículas são muito menores que o comprimento de onda, e $Re \ll 1$, onde a espessura da camada limite é considerada espessa em relação aos raios das partículas, se tratando do regime viscoso, ou seja os efeitos físicos provocados pela viscosidade e massa específica do meio contínuo afetam diretamente no modo de vibração destas partículas sólida, e estas por estarem imersas no escoamento são dominadas pelos efeitos das forças viscosas do meio contínuo.

Para o caso em que o valor do número de Reynolds é $Re \gg 1$, o regime de propagação é denominado como regime de propagação inercial, onde os raios das partículas são muito maiores do que a espessura da camada limite. O escoamento em torno das partículas é

governado pelos efeitos inerciais não viscosos, e a força de arrasto se torna então dominada pelos efeitos inerciais.

Kytömaa (1995), em seu trabalho afirma que as medidas de concentrações de sólidos a partir da atenuação acústica apontam que a suposição de que estas medidas são linearmente relacionadas são razoáveis até concentrações em torno de 10%.

Já para altas concentrações as interações entre partículas se tornam mais significativas para o regime viscoso, bem como no regime inercial. A partir destas considerações teóricas, o autor mostra que a atenuação é totalmente não-linear para ambos os regimes de dissipação, conforme a Figura 4 e exibe mínimos em uma concentração intermediária.

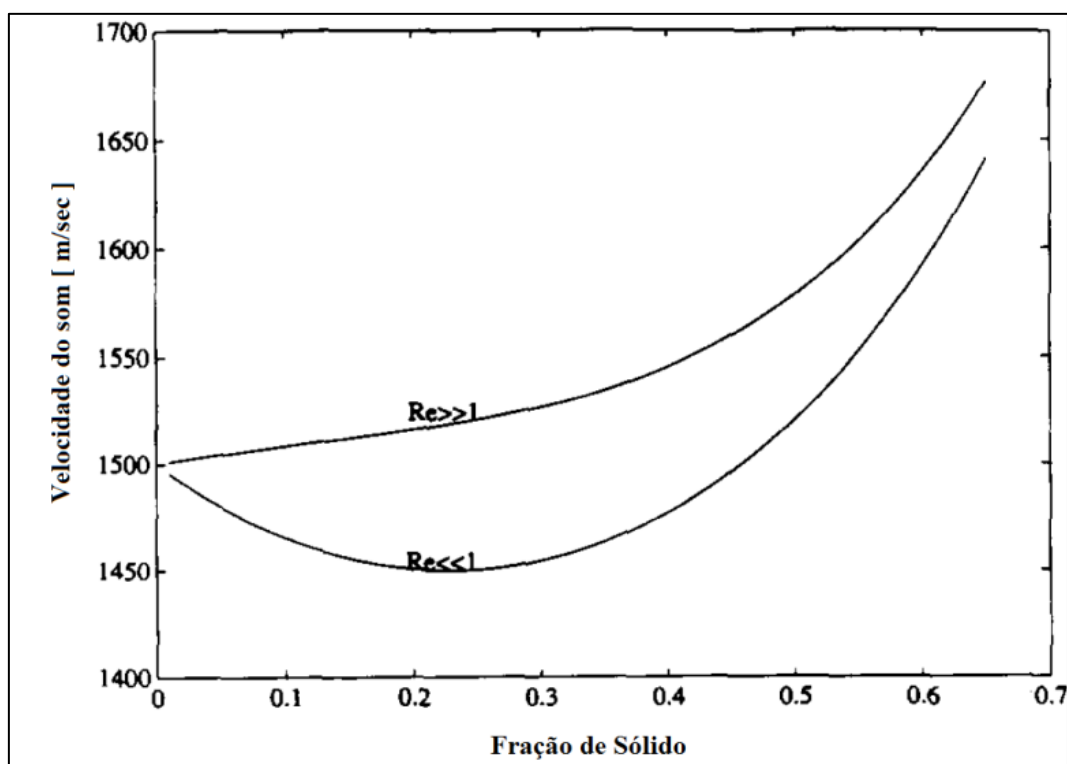


Figura 4: Velocidade em função da concentração de sólidos [Fonte: Kytömaa (1995)]

Em relação à velocidade do som, (Kytömaa, 1995) apresenta expressões para os limites de baixa e alta frequência (os regimes viscoso e inercial) em função da concentração de sólidos, conforme a Figura 5

A transição do regime viscoso para um sistema de regime inercial foi determinado para ocorrer entre $1 < Re < 20$. Dados para partículas de micro-esferas de vidro com $24 \mu\text{m}$ de raio em água a 450 kHz (regime inercial)

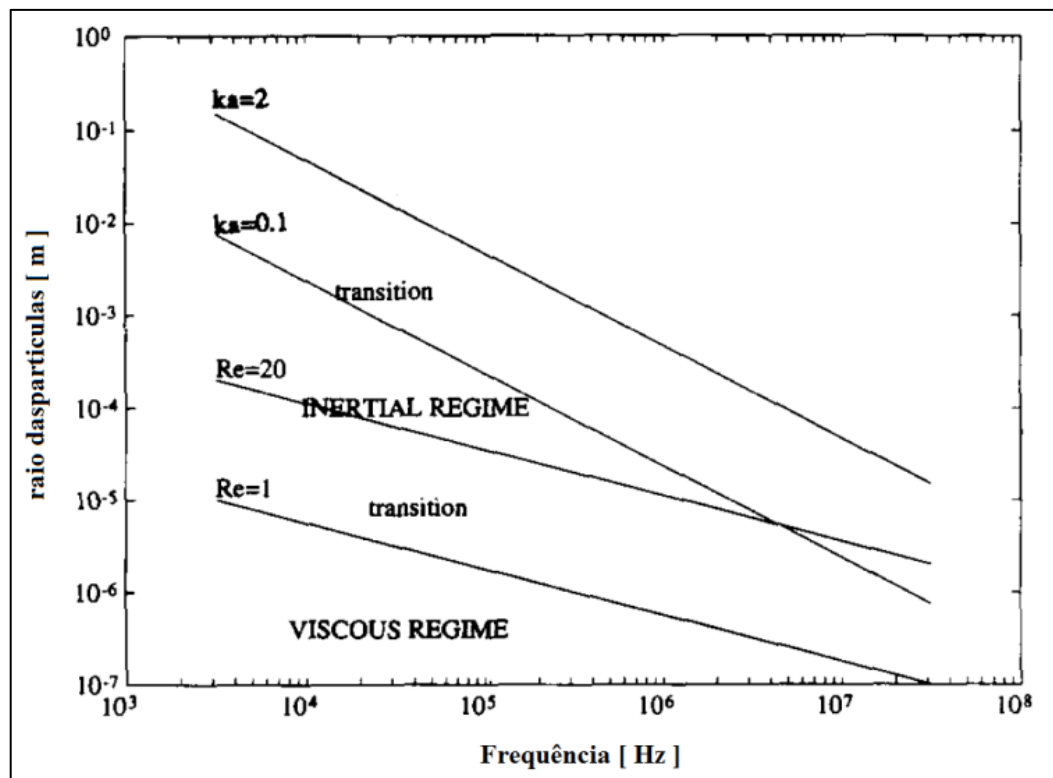


Figura 5: Limites de baixa e alta frequência pelo raio das partículas [Fonte:Kytömaa(1995)]

Urick (1947), levando em consideração as dimensões das fases dispersas (partículas sólidas), em uma derivação de seu modelo para velocidade do som em suspensões com partículas finamente divididas, onde as partículas foram consideradas infinitamente pequenas quando comparado com o comprimento de onda do som (limite do comprimento de onda), e desta forma desconsiderando os efeitos da dispersão (espalhamento) do feixe acústico.

A velocidade do som na suspensão mostrou uma tendência parabólica em função do aumento da concentração de sólidos por volume, com um valor máximo ou mínimo para uma dada concentração em particular. Os dados para essa variação da velocidade do som foram para suspensões de *kaolin* ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) em água limpa, que exibiram um mínimo na velocidade do som para aproximadamente 20% em volume destas partículas de *kaolin*.

Em todas essas experiências realizadas com o ultrassom, os tamanhos das partículas eram muito menores do que o comprimento de onda, confirmando assim a suposição do limite do comprimento de onda. Quando este critério não for atendido, reflexões e refrações de ondas acústicas nas interfaces entre as partículas suspensas e a fase contínua devem ser levadas em conta.

Soong et al. (1995) realizaram medidas de atenuação acústica em um sistema trifásico contendo água, esferas de vidro e bolhas de nitrogênio. As frequências nominais dos pulsos ultrassônicos foram de 2,5 MHz. Os diâmetros das micro-esferas de vidro foram de $80 \pm 5 \mu\text{m}$ de diâmetro e a concentração variou de 1% a 35% (porcentagem em peso) para cada faixa do escoamento de nitrogênio utilizada. As bolhas variaram em tamanho de 1 a 5 mm, e a distribuição específica do tamanho das bolhas era dependente da taxa de escoamento de nitrogênio.

Em se tratando da propagação da onda acústica é necessário comentar e fazer uma análise mais detalhada. Da mesma forma que a atenuação, a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas depende de propriedades do meio no qual as ondas se propagam e do modo de propagação.

Fisicamente, as propagações das ondas acústicas geralmente possuem três diferentes tipos de velocidades:

- Velocidade de fase: Velocidade de uma onda senoidal de frequência única;
- Velocidade de grupo: Velocidade do centro da onda com várias componentes de frequência;
- Velocidade do sinal: Velocidade da frente de onda de um pulso ultrassônico.

Em meios não dispersivos como a água, as velocidades de fase e de grupo são iguais. Já em meios que apresentam fases dispersas (partículas de sólidos, gás, etc.), onde ocorre muita dispersão, cada componente de frequência propaga-se em velocidade própria e, portanto, valores diferentes são obtidos dependendo do intervalo de frequências em que são calculadas.

Segundo Maia (2001), as ondas ultrassônicas sofrem reflexão, refração, difração e transmissão quando o feixe se depara com uma interface com características acústicas diferentes. Levando em conta estes comportamentos do pulso ultrassônico, é possível utilizar duas formas para analisar o tempo de trânsito de um pulso em um dado meio.

Utilizar o método pulso-eco e/ou método de transmissão direta. Na maior parte dos casos a combinação do método pulso-eco com o método de transmissão direta, permite obter informações a respeito da topologia de um dado escoamento, distancias e velocidades de propagação, tempo de trânsito e atenuação do pulso ultrassônico.

Maia (2001), em seu trabalho, apresenta uma forma de como obter a velocidade de propagação do som em um dado meio. O autor considerou dois transdutores, um emissor e um receptor de pulsos ultrassônicos e um meio de propagação composto por água e um material de espessura conhecida. No primeiro método, o pulso-eco, o transdutor funciona como emissor e receptor dos pulsos ultrassônicos.

Na Figura 6, tem-se um exemplo de um pulso elétrico aplicado a um elemento emissor representado pela letra T. Deste emissor parte uma onda acústica que se propaga pelo meio 1, com um comprimento d_1 .

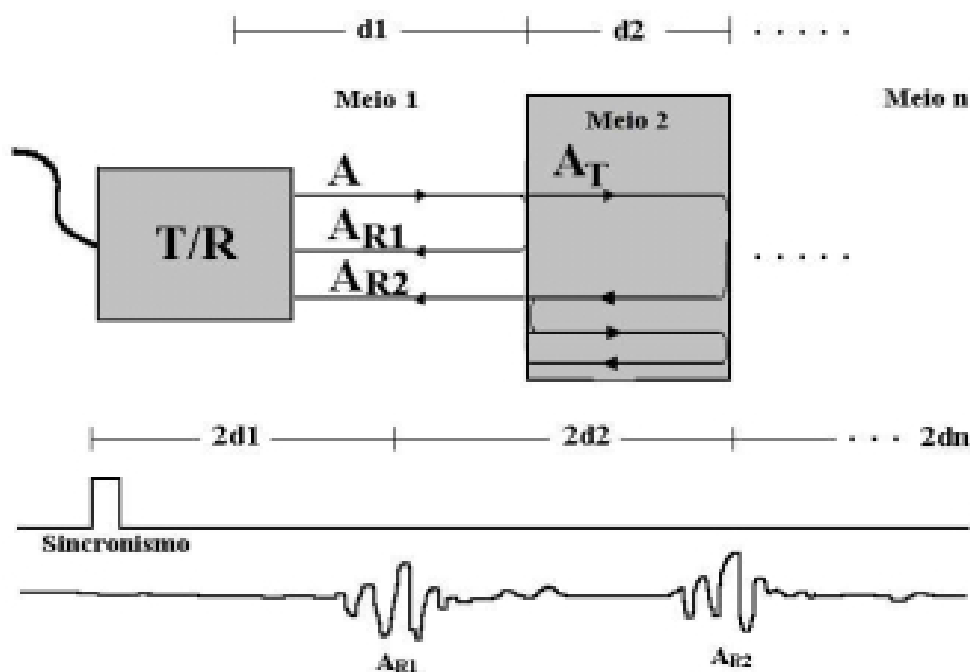


Figura 6: Método Pulso-Eco [Fonte: Maia (2001)].

Assim que esta onda encontra a interface entre o meio 1 e o meio 2 (representado pela superfície do meio 2), parte da onda é refletida, representada pelas letras AR1 e a outra que continua pelo meio 2 é representada pela letra AT. Conseqüentemente esta onda se propaga pelo meio 2 até que encontre uma nova interface e se divida novamente em uma parte refletida e outra transmitida.

A partir das ondas refletidas representadas pelas letras AR1 e AR2, por exemplo, pode-se obter informações a respeito de distâncias entre os meios e velocidades de propagações dos pulsos ultrassônicos. No método pulso-eco, a distância considerada é duas vezes a distância entre o sensor e o objeto em análise.

Esta consideração é devida ao caminho de ida e volta da onda ultra-sônica e também o tempo decorrido considerado entre a aplicação do pulso e a recepção do eco (o pulso que volta). Por fim, neste método pulso-eco é possível obter também informações a respeito da atenuação acústica.

No método de transmissão-recepção é utilizada uma configuração mais simples, onde existe um transdutor/emissor em uma posição e diretamente em a frente um transdutor/receptor que recebe este pulso ultrassônico, conforme a Figura 7.

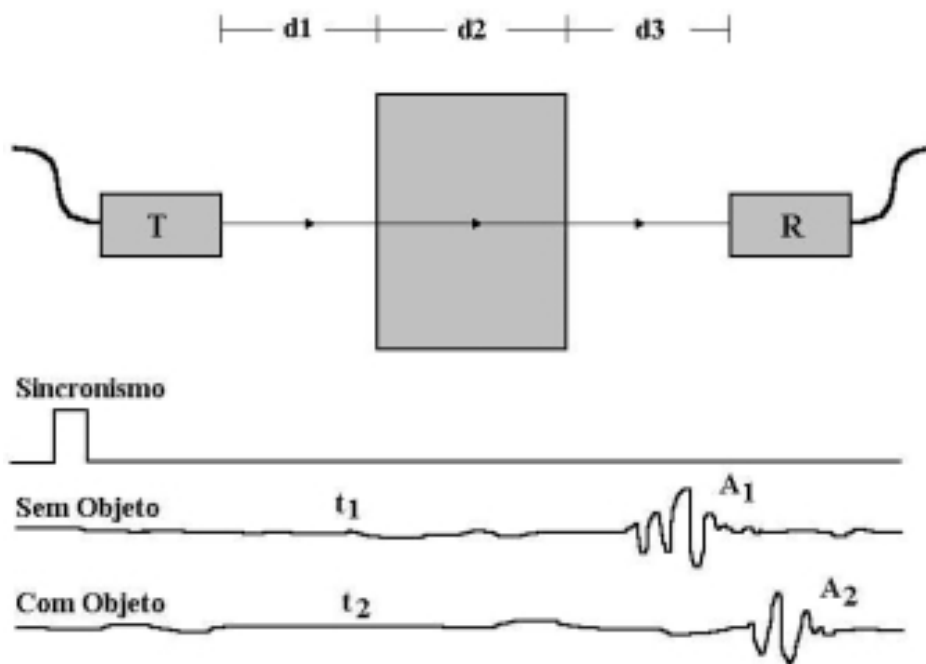


Figura 7: Método transmissão-recepção [Fonte: Maia (2001)].

Nesta configuração um pulso elétrico é aplicado no transdutor/emissor representado pela letra T. Este emissor gera um pulso ultrassônico que se propaga pelos meios considerados. O pulso ultrassônico é recebido pelo transdutor/receptor representado pela letra R na Figura 7.

Desta forma, o pulso ultrassônico pode dar informações a respeito da atenuação acústica e até mesmo sobre o tempo de propagação da onda, dependendo das diferentes características acústicas dos meios que estão presentes no percurso da onda acústica.

Resumidamente, propagação do pulso ultrassônico, emitida pelo emissor de ultrassom propaga-se através do meio de referência (água) e depois também através do material de espessura conhecida (d). Conhecendo-se a distância entre os transdutores (d_t), é possível

determinar a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no material utilizando as equações de 1 a 5:

$$V_R = \frac{d_t}{T_R} \quad 1$$

$$V_{psm} = \frac{d}{t_m} \quad 2$$

$$V_R = \frac{d_t - d}{T_M - t_m} \quad 3$$

Isolando-se d_t em 1, t_m em 2 e substituindo em 3, resulta em uma nova equação, conforme segue:

$$V_R = \frac{(V_R T_R) - d}{T_M - \left(\frac{d}{V_{psm}}\right)} \quad 4$$

Finalmente, rearranjando a equação acima, isolando a velocidade de propagação do som V_{psm} , resulta na seguinte relação:

$$V_{psm} = \frac{V_R d}{d - V_R (T_R - T_M)} \quad 5$$

Pela Equação (5), é possível obter a velocidade de propagação do som no material independentemente da distância entre os transdutores (emissor e receptor) e também não é necessário saber o tempo de propagação total no material de referência e no objeto, basta conhecer a diferença entre eles.

Para se calcular e obter valores do tempo de propagação do pulso ultrassônico, algumas técnicas podem ser utilizadas para o cálculo, como por exemplo:

- *Cruzamento por zero*: O instante de tempo é medido no ponto onde ocorre o primeiro ou outros cruzamentos por zero. Neste caso, a dependência da atenuação e da velocidade de fase com a frequência (dispersão) pode alterar a forma do pulso

ultrassônico durante a propagação e, conseqüentemente, alterar os cruzamentos por zero e a estimativa da velocidade da onda ultra-sônica;

- *Ponto de chegada da onda*: O tempo é medido no primeiro ponto onde existe um desvio aparente do eixo horizontal (eixo de tempo). Problemas desta técnica são relacionados ao ruído geralmente presente nos sinais, o que dificulta a determinação exata do ponto de medição;
- *Nível*: Determina-se um nível de tensão para o qual será medido o instante de tempo. Geralmente utiliza-se o primeiro meio-ciclo da onda e a medida é feita a 10% da amplitude do mesmo primeiro ciclo;
- *Correlação cruzada*: Envolve a comparação de um sinal de referência ou padrão com outro sinal para encontrar a coerência ou similaridade entre ambos. O ponto onde ocorre a maior similaridade entre os sinais é o de maior valor absoluto para a correlação. No caso da comparação entre o sinal de referência (água) e o que se propagou através do material, o valor da correlação representa a diferença entre os tempos em que houve a maior similaridade entre eles, e este valor pode ser utilizado para determinar a velocidade de propagação do som no material através da Equação (5);
- *Velocidade de fase*: Utiliza-se a análise espectral para determinar a fase dos sinais e a velocidade para cada frequência em uma faixa desejada;
- *Envelope*: O envelope do sinal é determinado e é utilizado o ponto de máxima amplitude para calcular a velocidade. Este método é muito consistente e também mais tolerante a ruídos presentes no sinal.

Na Figura 8, graficamente é possível ver alguns pontos utilizados para determinação do tempo de trânsito das ondas ultrassônicas, utilizados em algumas das técnicas descritas acima.

Soong et al. (1995), em seu trabalho fez uso da técnica por cruzamento por zero, onde observaram um decréscimo no tempo de propagação da onda com o aumento da concentração de sólidos. Com este trabalho, os autores definiram como tempo de trânsito o instante de tempo onde ocorre o primeiro ou cruzamentos por zero. Desse intervalo de tempo, pela passagem da onda acústica pelo transdutor receptor, forneceu aos autores o tempo de trânsito.

Stolojanu e Prakash (1997) realizaram medições acústicas em sistemas bifásicos e trifásicos, sendo que os transdutores utilizados pelos autores apresentavam uma frequência nominal de 4 MHz, e as concentrações de partículas sólidas foram de até 90% em peso (Cerca

de 40% vol.) e as frações de gás de até 40% vol. Micro-esferas de vidro com 35 μm de diâmetro foram usados como fase sólida, enquanto a água e ar comprimido constituíam o líquido e gás, respectivamente.

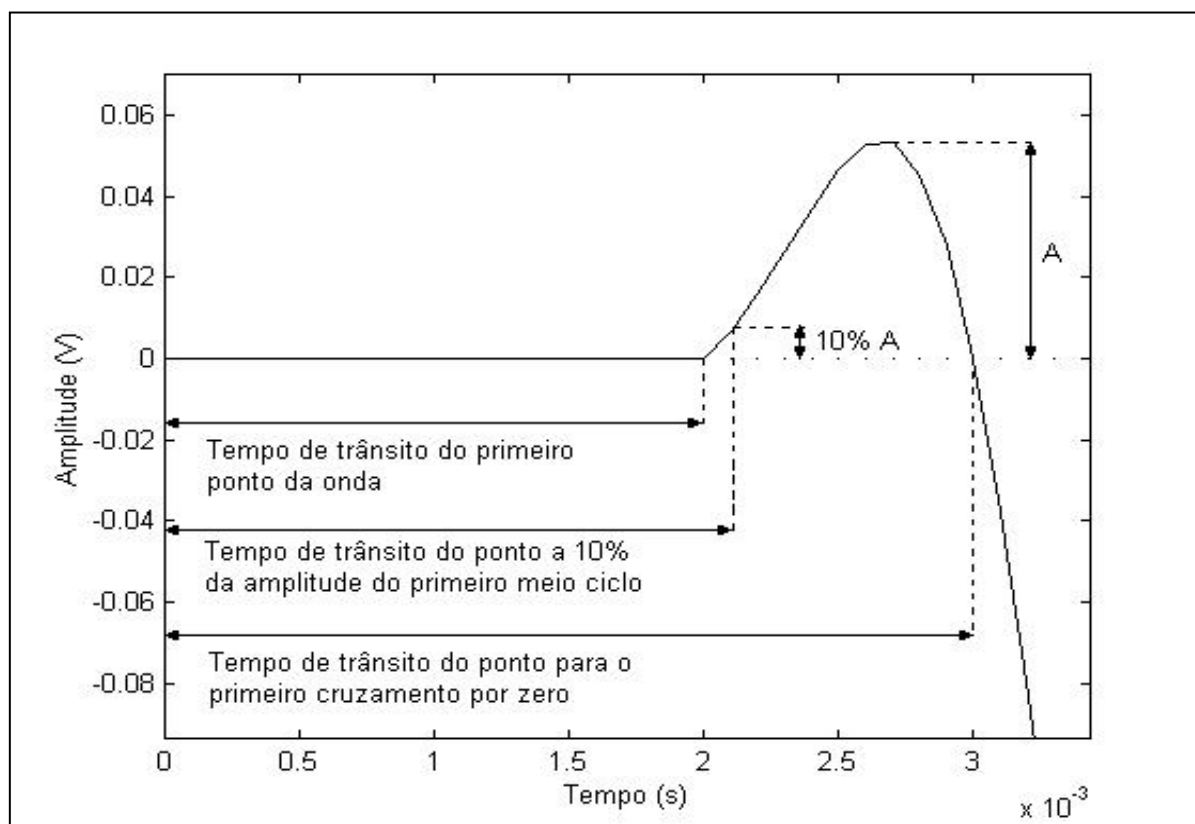


Figura 8: Exemplos para se determinar o tempo de trânsito [Maia (2000)].

Zheng (2003) também apresentam dados de pulsos ultrassônicos para sistemas bifásicos e trifásicos, utilizando como fases líquidas, gasosas e sólidas respectivamente água, ar e micro-esferas de vidro de 500 μm de diâmetro. Parâmetros acústicos foram normalizados com referência ao escoamento monofásico, água. Em escoamentos líquido-sólidos, foram observados que os desvios-padrão do tempo de trânsito aumentam com o aumento da concentração de sólidos. Ao mesmo tempo foi observado que os desvios-padrão da amplitude dos pulsos ultrassônicos diminuíam.

A técnica ultrassônica abordada nesses casos deve ser bem compreendida a fim de minimizar os erros associados a aquisição e a interpretação dos dados acústicos. Estes sinais recebidos pelo sensor de ultrassom estão sujeitos a diversas formas ruídos, e estes podem causar erros na interpretação deste sinal, caso não sejam tratados. Os ruídos são todos os sinais que aparecem na recepção e que não dizem respeito ao fenômeno acústico estudado.

Ruídos podem ser de aparelhos eletrônicos, os quais geram campos magnéticos e produzem interferência nos sinais, exemplos destes são os motores, inversores de frequência e rede elétrica. Também podem causar interferências as vibrações ou até mesmo o próprio equipamento utilizado para adquirir os dados. Os ruídos na maioria das vezes se somam ou corrompem o sinal de interesse, com frequência bem definida ao longo do período de aquisição ou podem ser totalmente aleatórios.

Um tratamento do sinal torna-se necessário para minimizar os efeitos que estas perturbações acrescentam ao sinal. Desta forma, neste trabalho, um dos cuidados foi com relação aos componentes da onda sonora que não se propagam através do escoamento.

Estes componentes chegam ao receptor juntamente com o sinal ultrassônico de interesse. Mas estas ondas sonoras não carregam nenhuma informação sobre o fenômeno de estudo, possuem um tempo de trânsito bem definido e devem ser retiradas do sinal por meio de filtragem para evitar-se erros sistemáticos dos cálculos dos parâmetros acústicos. Por fim, para se efetuar os cálculos de atenuação e energia, deve-se eliminar do sinal, esses componentes que representam erros sistemáticos.

A onda acústica é composta por duas componentes, uma transversal e outra longitudinal, conforme a Figura 9.

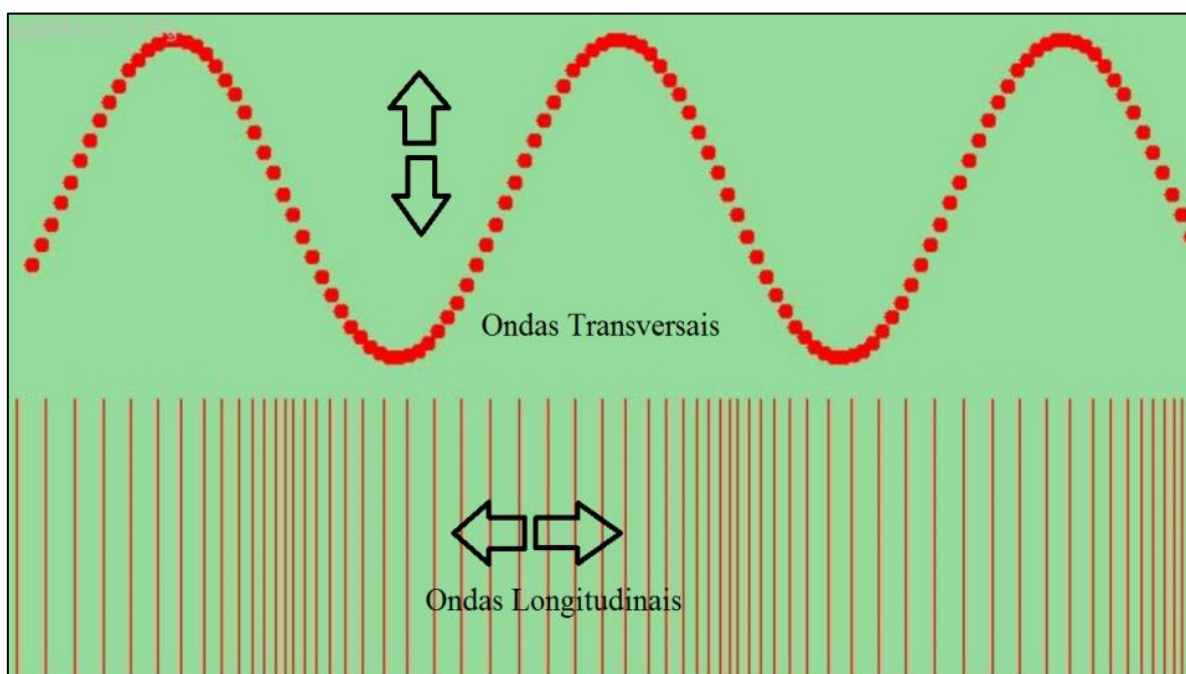


Figura 9: Tipos de ondas.

A componente transversal é aquela em que o movimento das partículas é perpendicular à direção de propagação da onda sonora. A componente longitudinal é aquela em que o movimento das partículas coincide com a direção da propagação.

Essas duas parcelas possuem velocidades de propagação diferentes, não importando o meio, sendo a transversal sempre mais lenta que a longitudinal. De forma gráfica, essa diferença de velocidades é representada por uma defasagem de tempo entre os sinais recebidos pelos receptores. Em meios fluidos, o componente transversal não consegue se propagar.

Para o presente estudo, o sinal de interesse é o componente longitudinal da onda sonora que atravessa o escoamento. Entretanto, o fenômeno de refração, independente da componente que se propaga sempre provoca a geração da componente transversal.

O fenômeno de refração é responsável pela mudança de velocidade e de direção que sofre a onda sonora ao passar de um meio contínuo ao outro, ao longo do trajeto da onda sonora. Se uma onda longitudinal está se propagando e, durante o seu trajeto, ela se depara com uma interface, é gerada uma onda transversal.

Na análise dos sinais recebidos pelos transdutores, além de se considerar a parcela longitudinal que interage com o escoamento, foi necessário identificar e eliminar as componentes de ondas transversais que foram geradas nas interfaces escoamento-acrílico, que chegam defasados nos receptores.

Esses pontos de interfaces estão representados na Figura 10 pelos pontos B, D, F e H que chegam defasados nos receptores. Estas interfaces, basicamente são barreiras entre meios em contato que apresentam características acústicas diferentes.

A componente transversal possui uma parcela da energia da onda que a gerou, ou seja, com pouca energia. Por sua vez, essa componente já sofreu uma atenuação ao longo do seu trajeto acústico.

Portanto essa onda transversal pode ser confundida com o ruído, apesar de que esta onda pode ser facilmente identificada, sabendo-se exatamente onde ela começa e termina pelo tempo de propagação da onda no meio em questão.

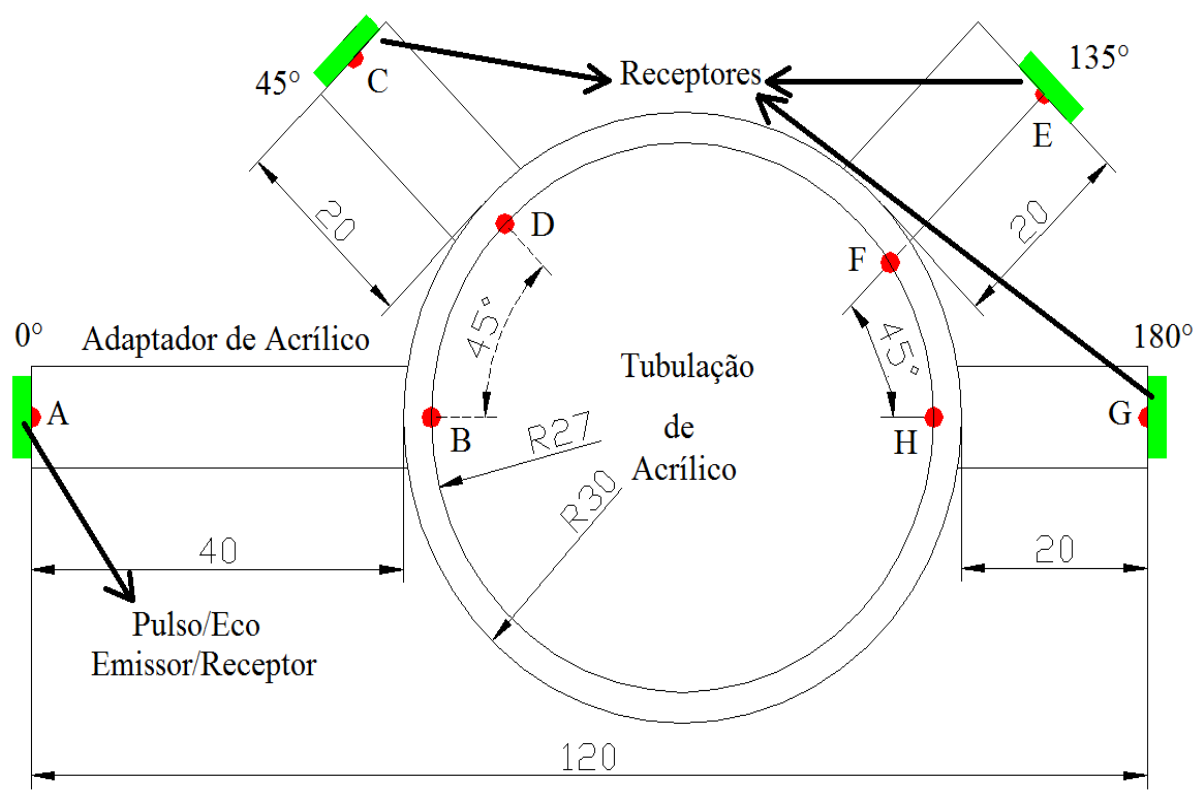


Figura 10: Representação da seção de teste de ultrassom.

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.

Capítulo 3

3 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTO DE MEDIDA

3.1 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

3.1.1 Circuito de Teste

Um aparato experimental foi criado especificamente para estudo da medida de concentrações de sólidos e frações de vazão em escoamentos bifásicos e trifásicos do tipo água-ar, água-areia e água-areia-ar no sentido vertical e na direção ascendente, utilizando a técnica de ultrassom conforme indicado na Figura 11. Esse circuito de testes experimentais foi montado no Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado situado na Universidade Federal de Itajubá.

Dentre os elementos que perfazem os escoamentos encontram-se partículas sólidas. No experimento foram utilizadas, para simulação, micro-esferas de vidro. Essas micro-esferas de vidro apresentam diâmetros entre 149 a 595 μm .

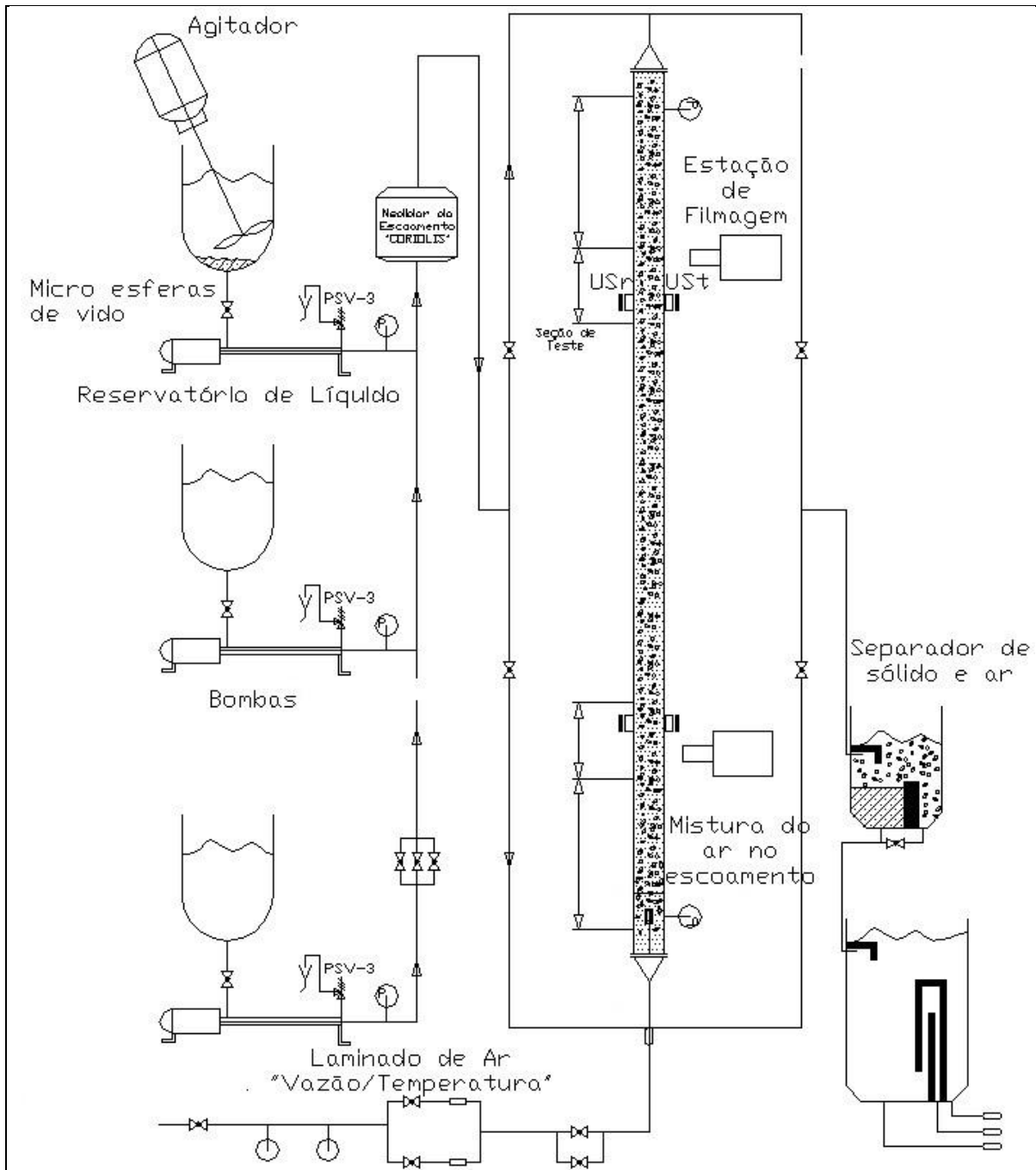


Figura 11: Circuito de teste de escoamento multifásico.

O projeto do circuito de testes de escoamentos multifásicos, foi norteado pelos seguintes requisitos:

- Produzir escoamentos verticais ascendentes - descendentes de líquido e sólido particulado com concentrações de até 3,00 %. A velocidade média mínima do escoamento deve ser cerca de 0,25 m/s, ou seja, maior do que a velocidade terminal de queda das partículas sólidas.

- Produzir escoamentos verticais ascendentes /descendentes de água e ar com frações de vazio na faixa de zero a 15,00%, característica do escoamento borbulhante.
- Produzir escoamentos trifásicos de água com sólido particulado e ar disperso com concentrações das fases dispersas de até 5 %.
- Produzir escoamentos de água e óleo (emulsões de óleo em água) com concentrações de até 10 %.
- Permitir medidas do tempo de trânsito e da atenuação dos pulsos ultrassônicos através destes escoamentos.
- Permitir medidas das concentrações das fases dispersas (ar em água, sólido em água ou óleo, óleo em água) para correlação com os dados acústicos mencionados acima.
- Permitir filmagens e fotografias dos escoamentos.

No início do circuito multifásico existe um reservatório com capacidade de dois mil litros de água. Neste reservatório foi montado um motor elétrico acoplado a uma hélice, que mistura as micro-esferas de vidro na água.

Complementar a este motor com hélice foi instalado um difusor de água no fundo do reservatório. Este difusor foi utilizado para impelir possíveis sedimentos de micro-esferas de vidro que estavam ficando depositadas no fundo do tanque. Estes sedimentos não se misturavam de forma homogênea a suspensão, sendo necessária uma forma de causar uma turbulência no fundo tanque para melhorar a mistura da suspensão.

Esse difusor utilizou a própria suspensão de partículas em água presente no reservatório, e por meio de bombas centrifugas, a suspensão era coletada pelo fundo do reservatório, e direcionada para o difusor para impelir as partículas. Este difusor foi construído com uma tubulação de PVC, que ocupava toda a circunferência do fundo do reservatório. Esta tubulação foi toda perfurada, para permitir que a suspensão bombeada causasse turbulência nos sedimentos que se encontravam no fundo do tanque, promovendo uma mistura mais efetiva.

Depois que toda a suspensão foi preparada o escoamento passou por uma bomba de cavidade progressiva presente no circuito principal do aparato experimental. Essa bomba foi adquirida com objetivo de suportar uma quantidade de partículas sólidas desde 0,00% até 3,00% de concentração em peso. Logo após essa bomba, a suspensão foi direcionada pelo

medidor de vazão do tipo CORIOLIS, que por sua vez permitiu medidas tanto a vazão do escoamento quanto a sua temperatura.

Nessa instalação existe um segundo reservatório de dois mil litros que tem a função de fornecer água limpa sem partículas suspensas. O escoamento de água limpa (monofásico) foi utilizado para estabelecer a condição de referência. A água proveniente deste segundo reservatório também tem como função diluir uma dada suspensão, caso essa esteja muito concentrada de partículas suspensas. Por fim este segundo reservatório também pode promover um adicional de vazão, caso fosse necessário velocidades de escoamentos maiores

Este segundo reservatório de água, em se tratando de escoamentos envolvendo água e óleo, tem como função fornecer a fase contínua para o escoamento enquanto que a fase dispersa (óleo) vem de um reservatório de menor capacidade (500 litros). Este reservatório foi previsto no sistema para trabalhos futuros envolvendo emulsões, porém não são foco deste estudo.

Seguindo o sistema após as tomadas de vazão e temperatura do medidor de vazão, existe uma seção para tomada de valores de pressão. Estes valores de pressão são de extrema importância para o trabalho e também para a integridade da instalação (vazamentos e sobrecarga por altas pressões).

Salientando que o aparato experimental foi projetado tanto para escoamentos do tipo ascendente quanto descendente. Para a escolha do sentido do escoamento, existem válvulas que direcionam o escoamento tanto no sentido ascendente quanto no sentido descendente.

Para o caso do escoamento trifásico do tipo líquido-sólido-gás, além da suspensão de partículas gerada no reservatório, foi necessário inserir uma terceira fase, neste caso o ar. O suprimento de ar foi capaz de fornecer ar comprimido com vazão controlada por um medidor de vazão de ar do tipo “laminadores de ar”. (laminador da marca *Cole-Parmer* modelo: *M&V Serie 0-20SLPM*). Assim como o medidor de vazão do escoamento (CORIOLIS), este medidor de vazão de ar permitiu medidas da temperatura do ar comprimido que foi inserido no escoamento estudado.

A injeção de ar no escoamento foi feita pelo interior de um tubo concêntrico a tubulação de acrílico. Neste tubo concêntrico, por meio de um cilindro poroso, o ar foi injetado no escoamento no interior da tubulação de acrílico de 54 mm de diâmetro. O cilindro poroso

denta deste tubo concêntrico a tubulação foi responsável por melhor distribuir as bolhas de ar no interior da tubulação, com uma distribuição mais homogênea ao longo de todo seu comprimento.

Nesta seção onde existe a injeção de ar comprimido, há um ponto de tomada de pressão, onde este valor de pressão combinado com outras variáveis primárias obtidas do aparato experimental, permitiram realizar correlações entre a concentração da fase gasosa seção de teste com dados de pressão, vazão entre outras variáveis, pela correlação apresentada Dias et al. (1998).

Além dos pontos de tomada de pressão e injeção de ar comprimido no escoamento, neste ponto da instalação apresenta uma seção de amostragem, o qual permitiu coletas de amostras do escoamento para verificação da concentração aproximada da suspensão que passa pela seção de teste. Por fim, mas não menos importante, este ponto de amostragem permitiu a limpeza e a manutenção desta seção da instalação.

A seção de teste ultrassônica é na verdade um segmento de 100 mm de comprimento na própria tubulação de acrílico. Esta tubulação apresenta 6 m de comprimento. Este comprimento mínimo garante o desenvolvimento completo da hidrodinâmica do escoamento.

De maneira simétrica esta tubulação possui duas estações para fixação dos sensores de ultrassom, uma na parte inferior e outra na superior. Considerando o sentido do escoamento, estas estações foram localizadas em pontos onde o escoamento foi considerado desenvolvido, tendo estas estações a função tanto de fixação dos transdutores quanto para a fixação de uma câmera de filmagem, caso fosse a necessidade do estudo.

No sentido ascendente do escoamento, ainda na seção onde contém os transdutores ultrassônicos, existe outro sensor de pressão, que em conjunto com o medidor de pressão na montante da tubulação e as variáveis primárias do banco de ensaio, fornecem a real concentração de ar que passa na seção de teste.

Na jusante da tubulação de acrílico, o escoamento multifásico água-areia-ar foi direcionado para um tanque separador. Este separador nada mais é que um tanque de capacidade de 500 litros sem cobertura, que permite a liberação do ar para atmosfera. Outro detalhe deste separador é que o mesmo possui uma tubulação no nível superior da borda do reservatório, funcionando como um ladrão.

Este ladrão permitiu a separação primária da suspensão, ou seja, as partículas sólidas se sedimentaram no fundo deste reservatório, enquanto que a fase contínua água ao atingir o nível superior deste tubo "ladrão" retornaram para um terceiro reservatório de maior capacidade. Por meio de uma bomba centrífuga, a água já separada das partículas sólidas era bombeada para o reservatório de suspensão dando início novamente aos ciclos de testes.

Inversores de frequência tornaram possível ajustar as vazões de uma faixa de zero até 55 kg/min. As condições operacionais do equipamento de testes, tais como pressão, vazão e temperatura foram adquiridas por um módulo de aquisição de dados da *National Instruments CompactDAQ*. Os dados ultrassônicos foram adquiridos separadamente usando um sistema de aquisição de dados da *National Instruments - PXIe*, equipado com o software *LabVIEW 8.6*.

Os valores digitais dos parâmetros de operação (variáveis primárias) foram adquiridas por uma placa *AT-MIO NI PC*, tratados no *LabView* e registrados em planilhas do *Microsoft Excel*. Nessas planilhas foram implementadas relações matemáticas de acordo com o trabalho de Dias et al. (1998).

3.1.2 Instrumentação Ultrassônica

Neste trabalho a instrumentação ultrassônica mostrada na Figura 12 foi projetada de forma a coletar simultaneamente dados de atenuação acústica dos pulsos ultrassônicos em escoamentos multifásicos. Estes dados acústicos foram adquiridos nos modos de transmissão direta, reflexão lateral e pulso-eco.

Apesar de o 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 à aplicação da técnica em tempo real na indústria do petróleo.

A configuração apresentada na Figura 12, foi adotada para este trabalho. Esta configuração tem como objetivo cobrir cada quadrante da circunferência do tubo. Assim considerando que o escoamento multifásico possui uma simetria radial do ponto de vista estatístico, somente metade da circunferência foi instrumentada.

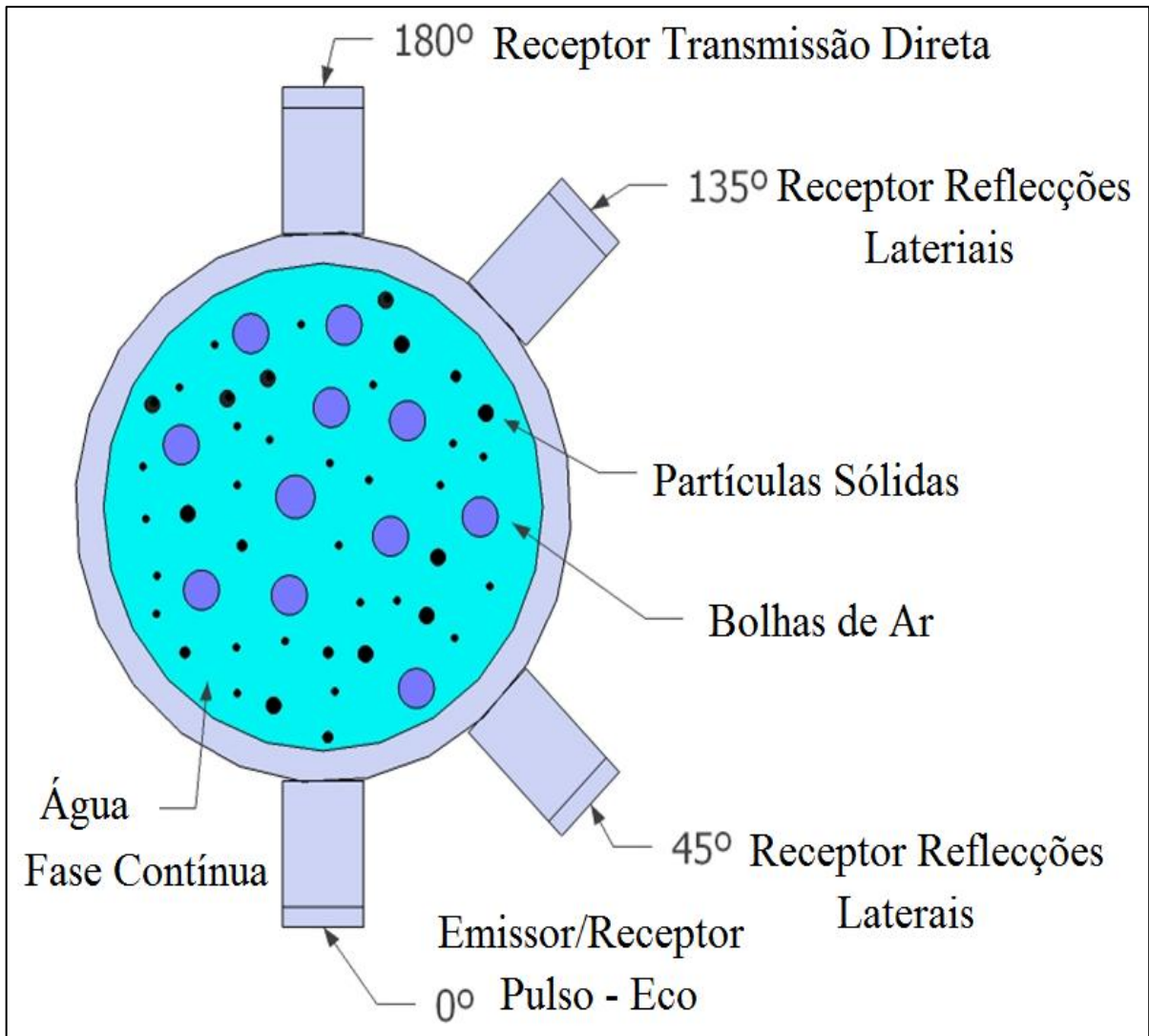


Figura 12: Desenho esquemático da estação de ultrassom.

Um gerador de pulsos ultrassônico (100 Hz - 5 kHz) emitia um sinal ao transdutor emissor. Este sinal ultrassônico era recebido pelos quatro transdutores receptores posicionados na estação de ultrassom. Esta estação, conforme mencionado anteriormente foi posicionada em um ponto da tubulação, onde o escoamento foi considerado desenvolvido, ou seja, para uma altura livre de seis metros corresponde a um comprimento de desenvolvimento para cada seção de teste, $Z/D \approx 100$. ($Z/D=6000/54 \approx 111$).

Na literatura especializada, adota-se $Z/D > 70$ a partir do misturador para escoamento em bolhas. Para o presente projeto as fases dispersas tem baixa concentração, então a validade é admitida com o mesmo critério. Este ponto onde se encontra esta estação se encontra a 6 metros acima da entrada do escoamento, ou seja, o ponto onde se dá à inserção de ar comprimido na suspensão de sólidos.

A referência adotada para se posicionar cada transdutor foi o sensor emissor. A partir desse (0°) 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, e assim receber pelo menos parte da energia espalhada pelo feixe acústico.

Radialmente oposto ao emissor ($\theta=0^\circ$), o último sensor ($\theta=180^\circ$) foi alocado para receber todo o sinal transmitido através do escoamento e assim obter o tempo de transito e energia transmitida através do escoamento.

A aquisição simultânea de todos os sensores permitiu uma visão mais clara dos mecanismos acústicos de dissipação pelas várias estruturas presentes no escoamento. Assim a análise cruzada dos sinais de todos os transdutores mostrou característica instantânea do escoamento.

Para o acoplamento de cada sensor ultrassônico com a tubulação de acrílico, foram utilizados adaptadores de acrílico, do mesmo do mesmo material utilizado na tubulação, sendo que estes adaptadores foram usinados de tal forma a obter um acoplamento perfeito entre os sensores ultrassônicos e a parede externa da tubulação de acrílico.

Para o emissor foi utilizado um sensor da Panametrics, modelo DHC706-RM, de duplo elemento e com diâmetro de 0.50 polegadas (~ 13 mm) conforme Figura 13b. Os demais sensores utilizados são do mesmo fabricante, porém, de elemento simples modelo V106-RM, apresentado na Figura 13a).

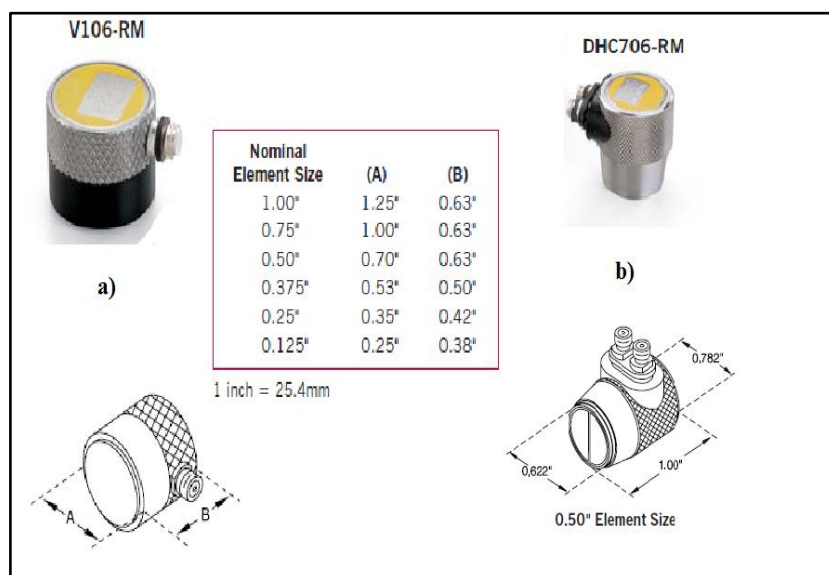


Figura 13: Sensores de ultrassom. [Fonte: Ultrasonic Transducers Technical Notes]

Para se evitar qualquer interstício preenchido com ar, tanto o contato entre o transdutor de ultrassom com o adaptador de acrílico quanto do adaptador com a tubulação foram preenchidos com vaselina. Este procedimento foi feito como garantia de um melhor acoplamento acústico entre as interfaces (transdutor-adaptador e adaptador-tubulação).

Este adaptador além de fornecer o perfeito acoplamento entre as interfaces, também ajuda a prevenir erros provenientes do campo acústico. Este termo denominado como campo acústico de um transdutor é dividido em duas zonas, o campo próximo e o campo distante, (Ultrasonic Transducers Technical Notes, 2006), conforme representado na Figura 14.

O campo próximo é a região diretamente a frente do transdutor onde a amplitude do eco passa por uma serie de máximos e mínimos, e termina em um último máximo, a uma distância N da face do transdutor. A localização deste último máximo é conhecida como a distância de campo próximo (N ou Y_0^+) e é o foco natural do transdutor.

O campo distante é a região que ultrapassa esta distância N , onde a pressão do campo de som gradualmente cai para zero. Por causa das variações dentro do campo próximo pode ser difícil avaliar com precisão dados utilizando técnicas baseadas na amplitude.

A distância do campo próximo é uma função da à frequência do transdutor, diâmetro do elemento e da velocidade do som material de teste, como mostrado pela equação (6):

$$N = \frac{D_{sensor}^2 f}{4c} = \frac{D_{sensor}^2}{4\lambda}$$

6

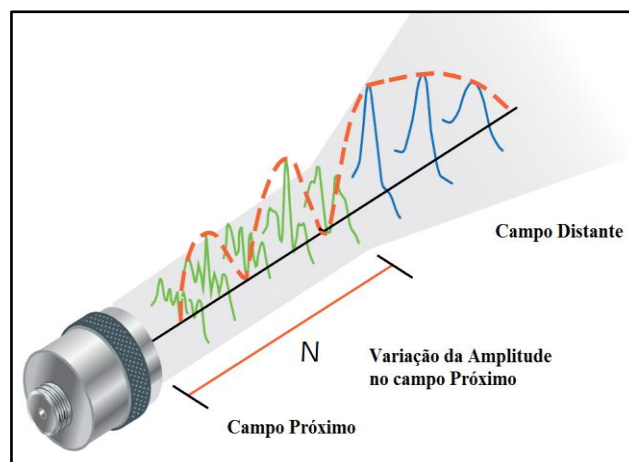


Figura 14: Campo próximo característico [Fonte: Ultrasonic transducers technical notes]

Para se evitar erro na faixa do chamado campo próximo vide (Figura 14), o adaptador de acrílico do transdutor emissor tinha um comprimento de $N \sim 40$ mm, assegurando que o campo próximo característico desse transdutor não adentrasse no escoamento multifásico. Já os outros adaptadores dos outros sensores (45° , 135° e 180°), apresentaram a dimensão de 10 mm.

Em função destes adaptadores, o comprimento do caminho percorrido pelo sinal ultrassônico em transmissão direta era de 40 mm do adaptador (0°), com mais 3 mm da espessura da parede da tubulação, 54 mm de diâmetro do tubo pelo escoamento, e outros 3 mm de espessura de parede e mais 10 mm do adaptador do lado dos receptores. Sendo que a espessura da camada de vaselina foi desconsiderada.

A transmissão direta do feixe acústico pode ser claramente definida. Porém, para os demais caminhos isso não pode ser afirmado. Os sinais que atingem os demais sensores procedem de direções diferentes, e dependem da interação entre a onda acústica e as estruturas sólidas e gasosas presentes no caminho acústico naquele exato momento.

3.2 PROCEDIMENTO DE MEDIDA

Nesta etapa será descrito quais os procedimentos adotados para a realização dos testes, desde a determinação da concentração das micro-esferas de vidro que foram utilizadas, as condições de operações do aparato experimental, os parâmetros acústicos, etc. Estes procedimentos foram de extrema importância para delinear os ensaios, sendo estes um roteiro seguido para a realização de todo o ensaio.

O objetivo destes procedimentos não só permitiu uma seqüência de operação como identificar os dois tipos de escoamentos que foram estudados, ou seja, o escoamento bifásico do tipo sólido-líquido e o escoamento do tipo sólido-líquido-gás.

O experimento foi realizado em batelada, ou seja, as condições de operações eram ajustadas para um dado volume inicial do reservatório de suspensão e uma determinada quantidade de micro-esferas de vidro, de acordo com o valor da concentração da suspensão desejada, tanto para o escoamento bifásico quanto para o trifásico.

Para a determinação da concentração das micro-esferas de vidro, o volume do reservatório de suspensão foi mantido constante para todas as faixas de concentração. Além do volume constante do reservatório em aproximadamente 1500 litros, a vazão também foi mantida constante, para não influenciar nos resultados das medidas. Estando o reservatório preenchido com o volume estipulado de água, e determinada a quantidade de micro-esferas de vidro para uma dada concentração, o passo seguinte era direcionar essa suspensão para a seção de testes.

Porém, estes procedimentos mencionados, são necessários e suficientes para promover a realização do escoamento bifásico, porém neste ponto, é necessário, mencionar que para as análises do escoamento trifásico, foram necessários alguns procedimentos a mais para se conseguir o escoamento líquido-sólido-gás. Desta forma, a suspensão de micro-esferas de vidro em água segue os mesmos procedimentos para os dois escoamentos, diferenciando apenas um do outro com a inserção da fase ar no escoamento no escoamento trifásico.

Este volume de suspensão presente no reservatório foi considerado uma batelada, sendo que estas bateladas permitiram obter com certa segurança (com poucas variações da concentração da suspensão) três amostras acústicas. Após a terceira amostra, a quantidade de suspensão presente no reservatório foi considerada insuficiente e também, o restante da suspensão no reservatório já apresentava variações visuais de concentração, sendo necessário preparar novamente novas suspensões para outras medidas.

Devido a este número limitado de medidas acústicas, para cada condição de concentração, foram adquiridas seis amostras, ou seja, duas bateladas para cada concentração. Todas as amostras de dados foram feitas utilizando-se o aparato montado no laboratório de refrigeração e ar condicionado (LRF-UNIFEI) no circuito de teste de escoamento multifásico (Figura 11).

É necessário aqui fazer uma distinção entre os dois tipos de escoamento, sendo o escoamento do tipo sólido-líquido denominado como a primeira parte e o escoamento do tipo sólido-líquido-gás denominado como segunda parte. Para ambos os escoamentos a concentração da fase sólida foi variada de 0% até 3% em peso. Tanto para a primeira parte quanto para a segunda foram realizadas 13 condições de concentração que variaram de intervalos de 0,25% cada uma.

3.2.1 Escoamento Bifásico e Aquisição de Dados

Na primeira parte do experimento, o escoamento em estudo foi o escoamento bifásico do tipo sólido-líquido. Uma seqüência de etapas foi seguida para a realização da suspensão para representar o escoamento bifásico. Conforme citado anteriormente o experimento foi realizado em batelada. As condições de operações foram ajustadas para um volume inicial do tanque de água e para uma determinada concentração das frações de sólidos.

O volume do reservatório de suspensão foi mantido em todas as rodadas aproximadamente com o volume de 1500 litros de água. Não só procurou manter esse volume do reservatório constante em todo o experimento, como também a vazão de água que foi mantida constante próxima de $7,6667 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ($\approx 2760 \text{ kg/h}$ ou $46,00 \text{ kg/min}$). Esta quantidade de água foi obtida pelo medidor de vazão do tipo “CORIOLIS” com incerteza de $\pm 0,15 \%$.

Partindo do ponto que o reservatório estava preenchido com o volume necessário para a suspensão o próximo passo foi adicionar as partículas sólidas que representavam a fase dispersa da suspensão. Estas partículas sólidas adotadas foram micro-esferas de vidro. Estas micro-esferas de vidro adotadas apresentaram as seguintes características:

- Insolúveis em água;
- Material estável quimicamente;
- Não inflamável;
- Material atóxico, não apresentando risco com relação à inalação ou contato.

A Tabela 2, apresenta a composição química das micro-esferas de vidro. Além das características e composição química das micro-esferas de vidro, estas foram peneiradas e separadas em cinco diferentes faixas de tamanho.

Tabela 2: Composição química das micro-esferas de vidro

Composição típica	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO/Fe ₂ O ₃	K ₂ O
(%)	72,5	13,7	9,8	3,3	0,4	0,2	0,1

Esta distribuição do tamanho das micro-esferas de vidro utilizadas para representar as partículas sólidas no escoamento é mostrada na Tabela 3. Depois de selecionadas as partículas sólidas, cuidadosamente, foram necessárias determinar qual a concentração a ser preparada.

As concentrações de partículas sólidas, além do escoamento monofásico com água pura, variaram de 0,25% de concentração até 3,00% com em intervalos de 0,25%.

Desta forma as concentrações dos escoamentos desejadas foram preparadas previamente no reservatório de suspensão, seguindo o seguinte procedimento.

Tabela 3: Distribuição do Tamanho das micro-esferas.

FAIXA DE TAMANHO [μM]	[%]
590 - 595	0,60
425 - 590	54,30
212 - 425	38,20
150 - 212	6,00
< 150	0,90

Partindo do ponto que o reservatório já está com seu volume preestabelecido completo, o próximo passo foi determinar as quantidades de micro-esferas de vidro para cada rodada ou batelada do experimento. Desde a primeira concentração (0,25% em peso) até a concentração (3,00% em peso), estas micro-esferas de vidro foram pesadas em uma balança analítica de precisão com incerteza de ($\pm 0,001$ kg).

A incerteza nos valores de concentração, considerando a incerteza do medidor de vazão de água e da balança analítica foi estimada em cerca de $\pm 0,2$ %. O Apêndice II mostra como se realizou os procedimentos para o cálculo da propagação das incertezas pertinentes. Porém, na execução dos experimentos, foram observadas tendências de deposição de partículas sólidas em singularidades do equipamento de teste.

Esta sedimentação ocasionou pequenas variações de concentração na seção de teste em relação ao reservatório. Portanto a cada rodada do experimento, os parâmetros eram novamente conferidos de modo a se certificar que a condição permanecia a mesma, ou aproximadamente a mesma. Alguns destes parâmetros variaram rapidamente dependendo do período do dia. Por exemplo, a temperatura do escoamento no início ou no final do dia sofria rápidas alterações e até mesmo as sedimentações das micro-esferas de vidro.

Devido a estas variações e ocorrências de sedimentação, certa monitoração e cautela eram mantidas na obtenção dos dados acústicos. Casos como esse eram seguidos de monitoração por válvulas de amostragem e análises visuais. Essas válvulas permitiram coletas de amostras do escoamento próximo da seção de teste. Estas amostras (suspensão) foram pesadas, e depois de retirada toda água, foi feita a comparação da concentração da amostra com a concentração do tanque. Caso estas concentrações na válvula de amostragem apresentassem variações muito altas em relação à concentração do reservatório, a rodada era finalizada.

Finalizada a rodada experimental, o reservatório de suspensão era limpo (retirado todas as micro-esferas de vidro) escoando uma quantidade de água limpa pela tubulação, para limpeza e retirada de qualquer sedimento presente no aparato experimental. Depois que o sistema era considerado limpo, ou seja, com aproximadamente nenhuma partícula de micro-esfera de vidro presente, ajustou-se novamente todos os parâmetros e deu-se início a nova rodada de testes.

Até este ponto, se referiu ao procedimento de como foi preparado a suspensão e como esta foi escoada pela tubulação para a realização do experimento. Depois de descrever o processo de preparo da suspensão e o trajeto que a mesma percorre faz-se necessário descrever outros procedimentos, tais como os parâmetros acústicos foram fixados.

O gerador de pulso foi excitado a 2 kHz, e todas as amostras acústicas adquiridas possuiu 10.000 pulsos em cada amostra. A taxa de amostragem usada para o sinal ultrassônico foi de 20 MHz para evitar qualquer efeito de "Aliasing". Este fenômeno de Aliasing (falseamento), de acordo com a teoria da amostragem, um sinal contínuo no tempo deve ser amostrado utilizando-se uma frequência de amostragem maior que o dobro da maior frequência contida no espectro do sinal contínuo. Caso esta condição não for satisfeita, haverá sobreposições de espectro ou defeitos de Aliasing, as quais irão distorcer o espectro.

De acordo com o Teorema de Nyquist, a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada taxa ou frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que possa ser reproduzido integralmente sem erro do tipo "Aliasing", Stearns (2003).

A metade da frequência de amostragem é chamada frequência de "Nyquist" e corresponde ao limite máximo de frequência do sinal que pode ser reproduzido. Este erro do tipo "Aliasing" tem efeito nocivo aos resultados, tendo que ser evitado.

Como o sinal analógico é contínuo no tempo e em nível, ele possui uma infinidade de valores. Como o meio de comunicação tem banda limitada, é necessário transmitir apenas certa quantidade de amostras deste sinal, como enunciado anteriormente no Teorema de Nyquist.

Quanto maior a frequência de amostragem, melhor será para reproduzir o sinal. Desta forma a taxa de amostragem usada para o sinal ultrassônico foi de 20 MHz, sendo esse valor aproximadamente nove vezes maior que as frequências dos transdutores de 2,25 MHz, desta forma evitando possíveis erros, segundo o Teorema de Nyquist, evitam-se quaisquer efeitos de *Aliasing*, Stearns (2003).

A Tabela 4, mostra um resumo, das concentrações utilizadas para todas as v condições adotadas para o ensaio. Os dados ultrassônicos foram obtidos para todas as condições de concentração do escoamento bifásico, variando de 0 até 3% em intervalos de 0,25%.

Tabela 4: Faixas de concentração das micro-esferas de vidro

Condição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Concentrações [%]	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00

Na tentativa de se identificar diferentes formas de escoamento, conforme a Tabela 4, foram realizados 13 diferentes rodadas experimentais, sendo cada um delas com concentrações diferentes. À medida que se aumentava a concentração das micro-esferas de vidro notou-se que diferentes comportamentos ocorriam.

No início dos de cada rodada, para as concentrações inferiores a 1,00%, as micro-esferas de vidro distribuíam-se de forma homogênea ao longo de toda a tubulação de acrílico, onde estas suspensões proviam poucos aglomerados de partículas e poucas deposições das micro-esferas de areia nas singularidades da instalação.

Porém à medida que a concentração de micro-esferas foi aumentada esses fenômenos aconteceram com maior intensidade. Assim, certos cuidados, conforme citado anteriormente, foram tomados, tais como coletas de amostras, monitoramento visual das variações das

concentrações na tubulação de acrílico, limpeza das tubulações e reservatórios entre outros necessários no momento, para manter-se uma baixa dispersão dos resultados do experimento.

Kytömaa (1995), em seu trabalho propõe uma previsão da concentração de sólidos a partir de medições de atenuação acústica. Afirmando que em qualquer região da tubulação de acrílico existe uma distribuição homogênea das partículas. Cita ainda que estes sejam linearmente relacionadas para uma concentração de até 10%. A partir deste princípio foi possível fazer-se inferências a respeito das formas de atenuação acústica e seus regimes de propagação de ondas. Por exemplo, dependendo de como essas partículas interceptavam o feixe ultrassônico, os pulsos recebidos pelos transdutores variavam demonstrando uma interação diferente do pulso propagado pelo meio sem partículas.

De uma forma mais detalhada, os regimes serão explicados a seguir, começando primeiramente com dados primários básicos para a realização dos cálculos e nas definições dos parâmetros desejados. Pode-se observar que para a determinação dos regimes, são consideradas algumas propriedades da água, do sensor de ultrassom e das partículas sólidas.

Como mencionado anteriormente, os regimes de atenuação acústica levam em consideração o produto entre o número de onda pelo raio da partícula sólida e o número de Reynolds. Desta forma, faz-se necessário uma descrição de como chegar nestas relações.

Começando pelo regime de múltiplo espalhamento ou (regime curto comprimento de onda) para um valor $ka \gg 1$, e este é dado por:

$$ka = k \cdot a \tag{7}$$

Onde o valor do raio da micro-esfera de vidro na equação (7), foi em micrômetros, e o número da onda é dado pela equação (8)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi \frac{f}{c} \tag{8}$$

Na equação (8), o termo λ é denominado comprimento da onda acústica, f é a frequência do pulso ultrassônico do sensor e c é a velocidade do som na fase contínua, para a água a 20° C. Quando o valor de ka é muito maior que a unidade, tem-se que as partículas são grandes quando comparadas com o comprimento de onda e o espalhamento do som é uniforme em todas as direções. Para a suspensão do tipo sólido-líquido, com muitas partículas de micro-

esferas de vidro dispostas aleatoriamente, o som irá se espalhar aleatoriamente em várias direções e terá pouca penetração.

Por outro lado, o regime de longo comprimento de onda ocorre quando as partículas são muito menores que o comprimento de onda ($ka \ll 1$). Para essa situação deve-se considerar outro parâmetro de classificação, ou seja, a espessura da camada limite, δ . Este novo parâmetro tem por objetivo descrever o comportamento de partículas sólidas em contato com o meio fluido.

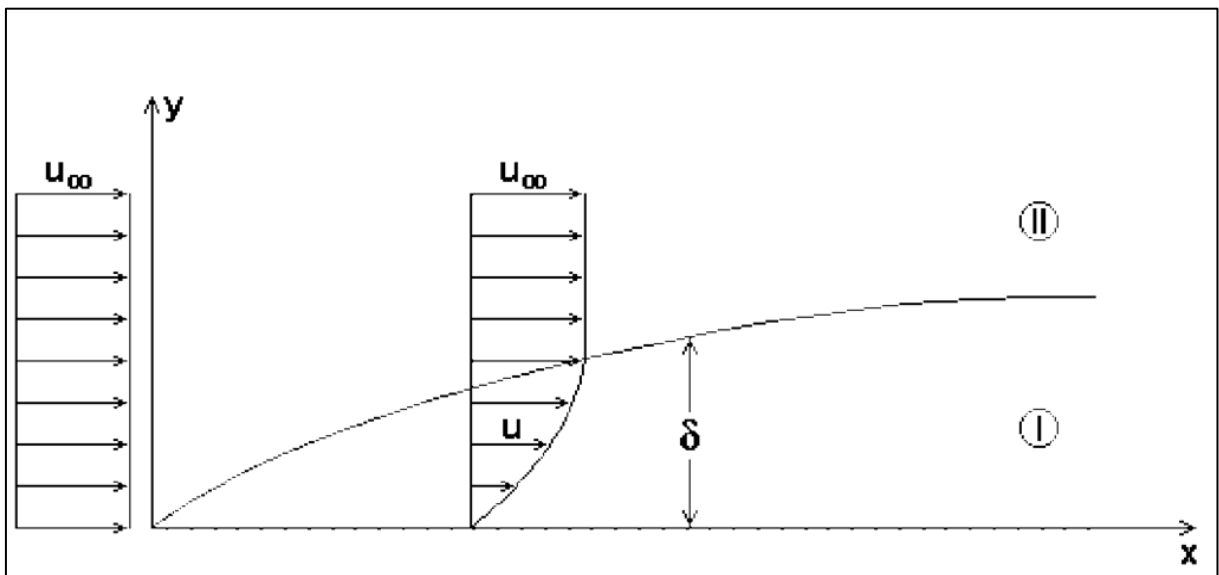


Figura 15: Espessura da camada limite (δ).

Todo fluido real tem uma viscosidade, e observações experimentais mostram que quando um fluido escoar, por ou sob uma superfície, as partículas do fluido em contato com a superfície aderem a esta. A velocidade relativa (u) entre fluido e partícula é zero ($u=0$), na superfície da partícula representada por ($y=0$), conforme Figura 15. Nesta figura u_∞ representa a velocidade não perturbada, ou seja, não afetada pela superfície das partículas.

Para exemplificar a espessura da camada limite, tem-se que as partículas do fluido aderidas à superfície, representada por $y=0$, exercem sobre as demais partículas do fluido um efeito de frenagem que diminui, à medida que y aumenta até se atingir a região II, onde a velocidade do escoamento é quase uniforme.

A região em que a velocidade varia com y , ou seja, onde ocorrem gradientes de velocidade, é chamada de camada limite, região I, na Figura 15. Na região II, externa à camada limite, $\delta < y < \infty$, u praticamente não varia com y . A camada limite que envolve as

partículas de micro-esferas de vidro, é freqüentemente chamada à espessura da camada de Stokes.

Desta forma, faz necessário correlacionar esta espessura de camada limite (δ) com elementos do escoamento. A forma escolhida para isso foi utilizar o número de Reynolds do escoamento, proposta por Kytömaa (1995).

$$Re = \frac{a}{\delta} \quad 9$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho\omega}} \quad 10$$

Quando $Re \ll 1$, a camada limite tem uma espessura grossa em relação ao raio da partícula e o tempo de relaxamento viscoso é menor do que o período de excitação. Quando a partícula sólida apresenta $ka \ll 1$ e $Re \ll 1$, ela se encontra no regime viscoso em que o arrasto é bem representado pela lei de Stokes. Este regime viscoso é aquele em que o efeito da viscosidade se faz presente. Isto ocorre quando o número de choques intermoleculares é muito maior que o número de choques molécula-tubulação.

Quando $Re \gg 1$, os raios das partículas sólidas são muito menores do que a espessura da camada limite e o escoamento em torno das partículas sólidas são governados pelos efeitos inerciais não viscosos. A combinação destes parâmetros com a velocidade e densidade das partículas refere-se à força inercial numa partícula fluida.

Levando em consideração partículas sólidas em meios fluidos, forças instáveis devido a aceleração destas partículas em relação ao fluido, pode conter efeitos relacionados com a força de Basset. A força de Basset descreve basicamente a força devido ao atraso da camada limite desenvolvida sob a partícula com a mudança de velocidade relativa (aceleração) entre meio fluido e a partícula. Neste caso, a força de arrasto se torna então dominada pela inércia, através do efeito da adição de massa.

Os efeitos de adição de massa são conservativos e não contribui para perdas. O termo dominante de perdas na suspensão é a componente em fase da força de Basset. Efeitos adicionais como instabilidade da condução térmica através de uma camada limite térmica em torno da partícula e comportamentos ressonantes, podem causar pequenas perdas adicionais, Tanahashi et al. (2010). Depois de preparado todos os procedimentos e dado seqüência ao

escoamento bifásico de micro-esferas de vidro pela tubulação, iniciou os procedimento de tomadas de dados. Uma série de parâmetros foi ajustada para permitir o início da aquisição de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de Aquisição

fa [MHz]	Pulsos por Amostra	Quantidade de Pontos	Vp [V]	fp [kHz]	Tempo de Aquisição [s]	Sensores Amostrados
20	10.000	3.000	400	2,00	5	0°, 45°, 135° e 180°

O tempo de amostragem usado foi de forma a reduzir a dispersão dos dados sem dificultar os experimentos e o armazenamento dos dados. Para todas as 13 condições de concentração, um total de seis amostras acústicas foi obtido. Resumidamente foram 13 condições com seis amostras para cada condição. Cada amostra acústica possuía 10.000 pulsos ultrassônicos. Cada pulso ultrassônico possui 3.000 pontos com um tempo de aquisição de aproximadamente 5 segundos. Por fim o gerador de pulsos (pulsador) foi regulado a emitir pulsos com 400 volts e a frequência de pulsação foi de 2 kHz. Na Tabela 6, apresenta em resumo todos os dados acústicos utilizados para o experimento. Desde o raio das micro-esferas de vidro, temperatura da água do escoamento, como velocidade do som na água, frequências dos pulsos etc.

Tabela 6: Dados básicos para o experimento bifásico

a [μm]	74,5	297,5
f [MHz]	2,25	2,25
c [m/s]	1480	1480
λ [m]	6,58E-04	6,58E-04
k [m-1]	9,55E+03	9,55E+03
ka [-]	0,71	2,84
ρ [kg/m3]	998	998
δ [μm]	3,69E-07	3,69E-07
Re [-]	202,06	806,88
ω [rad/s]	1,41E+07	1,41E+07
μ N.s/m2]	9,59E-04	9,59E-04

Preparado o escoamento bifásico sólido-líquido (micro-esferas de vidro em água) e determinado os parâmetros acústico, foi feita uma comparação entre as distribuições dos tamanhos das partículas e estes dois parâmetros (ka) e (Re). Foi apresentado na Tabela 7, um resumo de todos os parâmetros, considerando a distribuição de tamanhos das partículas e suas respectivas quantidades em cada faixa selecionada.

Tabela 7: Dados adquiridos na seção de teste (bifásico).

Distribuição de Tamanhos [μm]	Concentração [%]	ka [-]	δ [μm]	Re [-]
590 - 595	0,60	2,82 - 2,84	0,37	799 - 806
425 - 590	54,30	2,03 - 2,82	0,37	576 - 799
212 - 425	38,20	1,01 - 2,03	0,37	278 - 576
150 - 212	6,00	0,72 - 1,01	0,37	203 - 287
< 150	0,90	< 0,72	0,37	< 203

Como o valor do parâmetro ka não foi tão maior que a unidade para os três primeiros intervalos, o processo de espalhamento múltiplo não foi muito intenso. No entanto, para os outros dois intervalos (4 e 5), a atenuação acústica estava mais relacionada aos efeitos inerciais, e não causaram muitas dispersas.

3.2.2 Procedimento de Operação de Circuito Trifásico e Tomada de Dados

O escoamento trifásico além da fase contínua água considera também as fases dispersas representadas por micro-esferas de vidro e a fase gás, que neste contexto foi representado pelo ar. Para se conseguir o escoamento trifásico, foi necessário passar por duas etapas. A primeira etapa foi preparar a suspensão de partículas sólidas e segunda foi fixar a concentração de bolhas de ar necessária para o escoamento trifásico.

A preparação da suspensão só depende do volume do reservatório de mistura e a quantidade de micro-esferas de vidro, esta etapa foi prepara da mesma forma que no escoamento bifásico. Os procedimentos para gerar a suspensão e conduzir pela tubulação foram praticamente os mesmos, desde o preenchimento do reservatório de suspensão, pesagem das micro-esferas de vidro, medição de vazão e temperatura.

Com a suspensão pronta, a próxima etapa foi preparar a entrada do ar no sistema. Esta etapa teve por finalidade ajustar os parâmetros de vazão, temperatura e pressão a fim de permitir um correto valor das concentrações de bolhas de ar na seção de teste.

Antes de conduzir a suspensão de micro-esferas de vidro pela seção de teste, foi escoada primeiramente uma vazão de água monofásica limpa (isenta de partículas sólidas) pela tubulação de acrílico em toda a seção de teste.

O valor da vazão de água teve o mesmo valor de vazão determinada para a suspensão de micro-esferas de vidro. Essa vazão de água limpa teve a finalidade, não somente ajustar as condições de operações do aparato experimental, como também permitir os ajustes de pressão e velocidade que permitiram ajustar a quantidade de bolhas de ar na seção de teste.

Para inserção de ar e determinação da quantidade de bolhas de ar, a operação do circuito foi feita de forma a preestabelecer a fração de vazão desejada para a rodada experimental. As frações de vazão, ou seja, as concentrações de bolhas de ar na seção de teste foram calculadas de acordo com o trabalho de Dias (1998). Que utiliza a correlação de deslizamento de Zuber-Findlay do modelo *drift flux*. Esta correlação faz uso das velocidades das fases para se determinar a fração de vazão.

Para se formular o modelo de deslizamento, parte-se da representação local das variáveis do escoamento (de um modelo que considera a distribuição das fases na seção do escoamento). A determinação da condição foi feita utilizando-se planilhas, que continham todos os equacionamentos, baseados nas correlações de Dias (1998) e Dias et al. (2000) com as entradas de alguns parâmetros operacionais.

Estes parâmetros, chamados também de variáveis primárias, são:

- Vazão de água [kg/s];
- Temperatura da água [°C], medida por um termômetro do próprio Coriolis;
- Temperatura do ar [°C];
- Pressão do ar [kgf/cm²], medida na seção de teste;
- Vazão de ar no laminador [kg/s]
- Pressão atmosférica [hPa];
- Volume de água no reservatório nº 1 [litros];
- Massa das micro-esferas de vidro [kg]

- Diâmetro da tubulação de acrílico

A partir destas variáveis primárias, foram obtidos os valores absolutos das grandezas para se determinar a fração de vazio na seção de teste pelas seguintes relações

$$Q_{atual-ar} = \frac{Q_{std}}{60 \cdot 1000} \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad 11$$

$$Q_{atual-ar-seção-teste} = Q_{atual} \left(\frac{T_{Teste}}{T_{LFE}} \right) \left(\frac{P_{LFE}}{P_{Teste}} \right) \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad 12$$

$$\rho_{ar-teste} = \frac{P_{Teste} \cdot 1000000}{287 \cdot T_{Teste}} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad 13$$

$$\rho_{água-teste} = T_{LFE} - 0,0034589(T_{LFE})^2 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad 14$$

$$Q_{água-seção-teste} = \frac{\left(\frac{Q_{água-coriolis}}{\rho_{água}} \right)}{3600} \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad 15$$

Destes valores uma seqüência de relações foram aplicadas a essas planilhas até chegar ao valor final de fração de vazio, conforme segue:

$$A_{tubulação} = \frac{\pi D^2_{tubulação}}{4} (m^2) \quad 16$$

$$J_{ar} = \left(\frac{Q_{ar-seção-teste}}{A_{tubulação}} \right) \cdot 100 \left(\frac{cm}{s} \right) \quad 17$$

$$J_{água} = \left(\frac{Q_{água-seção-teste}}{A_{tubulação}} \right) \cdot 100 \left(\frac{cm}{s} \right) \quad 18$$

$$J_{total} = J_{ar} + J_{água} \left(\frac{cm}{s} \right) \quad 19$$

Para o cálculo do valor de (α) fração de vazio, as velocidades das fases, água e gás, foram calculadas utilizando as velocidades das fases (J_{ar} e $J_{\acute{a}gua}$), as quais envolvem a vazão volumétrica e a área da tubulação de acrílico, conforme é mostrado a seguir.

$$\alpha_{real} = \frac{J_{ar}}{C_o J_{total} + v_{gj}} (\%) \quad 20$$

Esta última relação apresentada na Equação (27), é denominada fração de vazio, utiliza duas constantes importantes, C_o coeficiente de distribuição e v_{gj} velocidade de deslizamento entre as fases. Estas duas constantes foram obtidas no trabalho de (Dias et al., 2000), onde os autores, utilizando a sonda de ponta dupla, melhoraram estes coeficientes da correlação acima para as condições estudadas, e aplicadas neste trabalho.

Estas formulações foram a ferramenta necessária para o cálculo de frações de vazio na seção de teste. Todas estas formulações foram implementadas em planilhas do Excel. Assim os controles de vazão e temperatura foram feitos a fim de fornecerem, segundo a Equação (27), o real valor de fração de vazio na seção de teste.

Com todos os parâmetros de ajuste de fração de vazio fixados, a fração de vazio considerada foi de aproximadamente $\alpha_{real}=8,00\%$ na seção de teste, e então cessado o escoamento de água limpa. Finalizado o escoamento de água limpa, a vazão do escoamento de suspensão de micro-esferas de vidro foi direcionada para a tubulação, considerando os mesmos valores de pressão e vazão. Assim os parâmetros das correlações implementadas não mudaram, e não alteraram o valor da fração de vazio.

Com a fração de vazio fixada, e a concentração da suspensão já preparada, os procedimentos até este ponto foram considerados suficientes para realizar as medidas do escoamento trifásico. A cada etapa experimental todos os parâmetros (concentração, fração de vazio, temperatura, pressão, etc.) eram novamente conferidos para se certificar que as condições permaneciam as mesmas.

Alguns destes parâmetros apresentaram pequenas variações em algumas rodadas experimentais, porém quando eram observadas variações, estes parâmetros eram novamente ajustados as condições iniciais e recalculava-se a fração de vazio, certificando que a fração de vazio permanece constante em aproximadamente 8% na seção de teste.

Capítulo 4

4 RESULTADOS

4.1 TRATAMENTO DOS PULSOS ULTRASSÔNICOS

O pulso ultrassônico ou sinal é uma função que transmite informação sobre um fenômeno físico. Uma questão de fundamental importância no estudo de sinais é o uso de procedimentos apropriados para processar ou manipular sinais. Esta questão normalmente envolve uma combinação de algumas operações básicas: mudança de escala de amplitude, adição, multiplicação, diferenciação, integração, mudança de escala de tempo, reflexão e deslocamento.

Entretanto, dados adquiridos geralmente possuem ruídos, quer seja devido aos processos de aquisição dos dados ou aos fenômenos naturais ocorridos durante o processo de aquisição destes dados. Para que os dados sejam corretamente analisados faz-se necessário a utilização de técnicas para remoção destes ruídos.

Para filtragem dos sinais ultrassônicos fez-se uso do conceito de janelas de atividade utilizada por Tanahashi et al.(2010), onde o pulso ultrassônico é analisado no domínio do tempo, reconhecendo-se cronologicamente qual região do pulso ultrassônico carrega informações a respeito do escoamento e desprezando as demais regiões. O reconhecimento dessas regiões ou janelas de atividades é feita por meio da velocidade de propagação do som

nos meios analisados (água e acrílico) e também pela identificação de qual o intervalo de tempo (tempo de trânsito) referente a região de interesse no pulso a se analisar.

Com o conceito de janelas de atividade foi necessário, de início, conhecer quais as dimensões associadas aos caminhos acústicos pelo qual o pulso ultrassônico percorreu desde o emissor até o receptor. Considerando as dimensões dos adaptadores de acrílicos acoplados a tubulação de acrílico, a espessura da parede da tubulação e o diâmetro do escoamento.

A partir destas dimensões e de posse das velocidades de propagação da onda longitudinal e transversal, tanto no acrílico quanto no escoamento estudado (neste caso na água), foi possível, na representação dos pulsos ultrassônicos no domínio do tempo apontar qual parte do sinal ultrassônico carrega informação do escoamento e quais não carregam informação alguma.

Sabendo quais são as regiões onde o sinal apresenta informação do escoamento, a aplicação da Transformada de Fourier nesta região, ou mesmo o cálculo da energia carregada pelo pulso apresenta melhores resultados, com uma quantidade bem menor de erros sistemáticos causados pela presença de ruídos e regiões com pulsos sem informação de interesse.

Utilizando o método de janelas de atividade para localizar a região que carrega informação do escoamento, e a identificação e retiradas de frequências não relevantes ao estudo, os resultados foram bastante satisfatórios.

Tendo em vista o procedimento adotado por Tanahashi et al.(2010), e comparando com o procedimento adotado no presente trabalho, que além das janelas de atividade considera apenas as frequências pertinentes a este estudo, foi possível confirmar que a utilização desta forma de tratar o sinal , permite uma melhor obtenção dos dados acústicos e eliminação de erros sistemáticos relacionados aos ruídos do processo.

Para demonstrar o procedimento adotado para o tratamento do sinal obtido, após a identificação da janela de atividade, será utilizado como exemplo, o sinal obtido em um sensor (receptor) de ultrassom, acoplado à tubulação de acrílico.

O pulso ultrassônico apresentado na Figura 16, é um sinal recebido pelo sensor posicionado a 0°. Este pulso foi obtido a partir de um escoamento de uma suspensão bifásica com concentração de partículas de micro-esferas de vidro de 0,25% em peso.

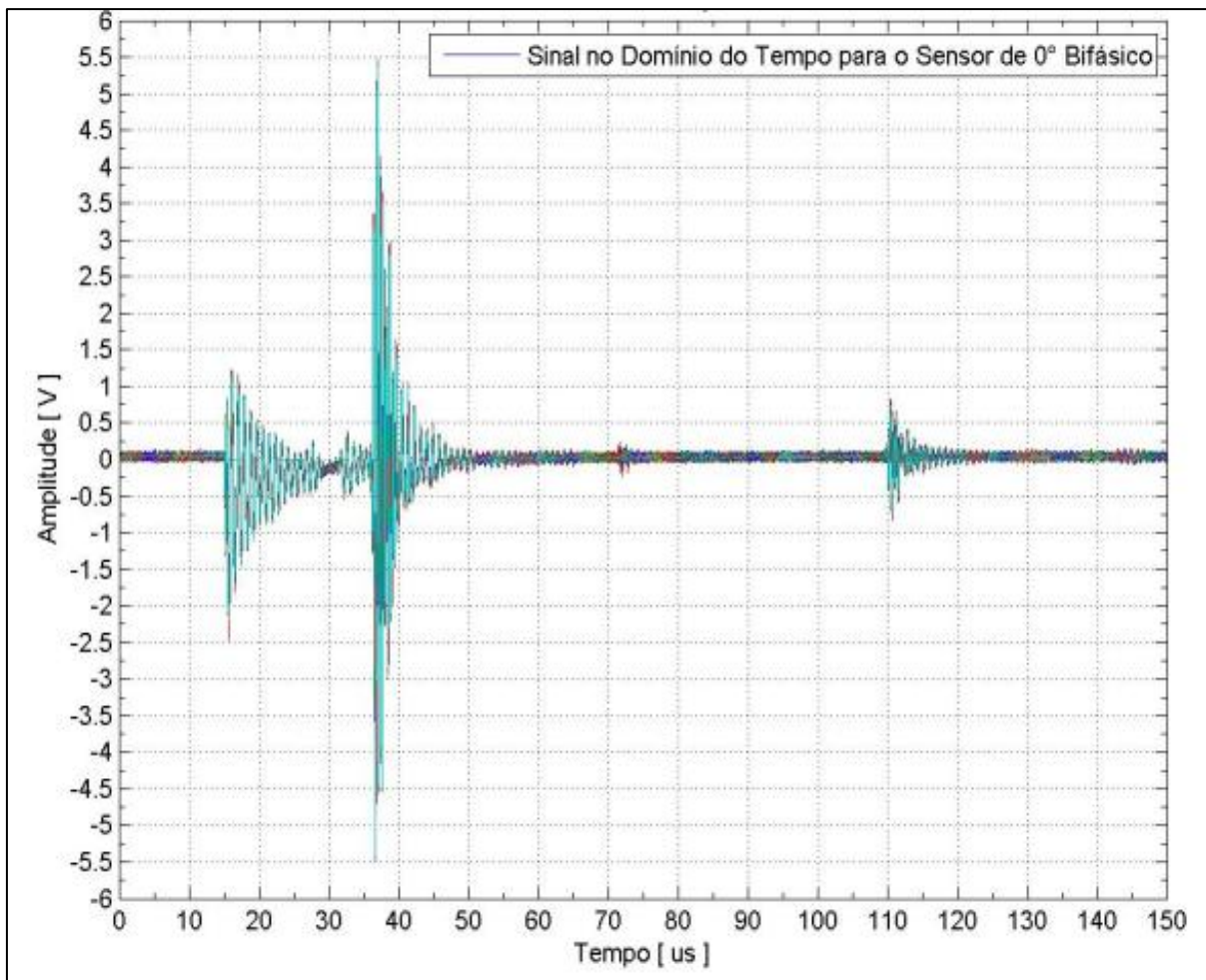


Figura 16: Sinal no domínio do tempo

Para evitar o aparecimento das componentes transversais que poderiam ser confundidas com os ruídos, o tempo de trânsito foi um dos parâmetros utilizados para se fazer o tratamento do sinal no domínio do tempo. Utilizando dados referentes a tempo de trânsito e comparando com as representações destes sinais (pulsos ultrassônicos) em gráficos, foi possível identificar o instante em que uma dada onda chegava a um dado transdutor.

Se a componente de onda não fosse de interesse, o trecho correspondente do sinal era descartado. Caso contrário, este trecho era 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 eram descartados.

Outra ferramenta utilizada para o tratamento do sinal foi analisar as frequências do pulso ultrassônico. Conforme já citado anteriormente, o sinal do pulso ultrassônico pode estar corrompido com ruídos. Ruídos provenientes de inúmeras fontes (aparelhos eletrônicos, por

exemplo), e na maioria das vezes corrompem o sinal de interesse, com frequências bem definida ou totalmente aleatórias.

A forma de fazer este tratamento foi retirar as frequências indesejadas. O método utilizado para isso foi analisar os pulsos ultrassônicos no domínio da frequência, onde os dados podem ser analisados observando os espectros de frequências utilizando a Transformada de Fourier.

Matematicamente qualquer forma de onda, independente da sua origem, é um somatório de ondas senoidais de diferentes frequências, amplitudes e fases. Com a Transformada de Fourier é possível observar que a forma de onda se repete periodicamente, então as frequências das componentes senoidais são restritas a valores múltiplos da frequência de repetição da forma de onda.

A Transformada de Fourier permite uma visão do pulso ultrassônico a ser analisada no domínio da frequência, facilitando sobremaneira as análises e o processamento dos pulsos ultrassônicos, normalmente, aplicando-se técnicas de tratamento deste sinal. Na prática, a utilização de algoritmos para execução rápida das transformadas de Fourier (FFT - transformada rápida de Fourier) permite, de maneira simplificada, a utilização das técnicas de filtragens para eliminação de ruídos do sinal em análise.

Outra informação a respeito da Transformada de Fourier é a simetria em torno do ponto $n=N/2$, onde N é a frequência de amostragem. Devido ao fato que a parte real da transformada de um sinal real é uma função par e a resposta da parte imaginária é uma função ímpar. Um espectro representado no domínio da frequência apresenta sua parte real (par) na primeira metade do espectro e a parte imaginária (ímpar) na segunda metade do espectro. Na Figura 17, é possível observar a representação de um espectro característico de um transdutor ultrassônico no domínio da frequência.

O resultado obtido para $n>N/2$ corresponde simplesmente às frequências negativas. Por fim quanto maior o valor de N (frequência de amostragem) melhor será a representação do espectro. É possível observar na Figura 17 que para uma frequência de amostragem de $N=10\text{MHz}$, para a primeira região (parte par do gráfico) o espectro característico do transdutor tem seu espectro melhor representado pela faixa entre 0 à 4 MHz, ressaltando que o intervalo tem como valor central o valor de 2,25 MHz, que representa a frequência do transdutor utilizado.

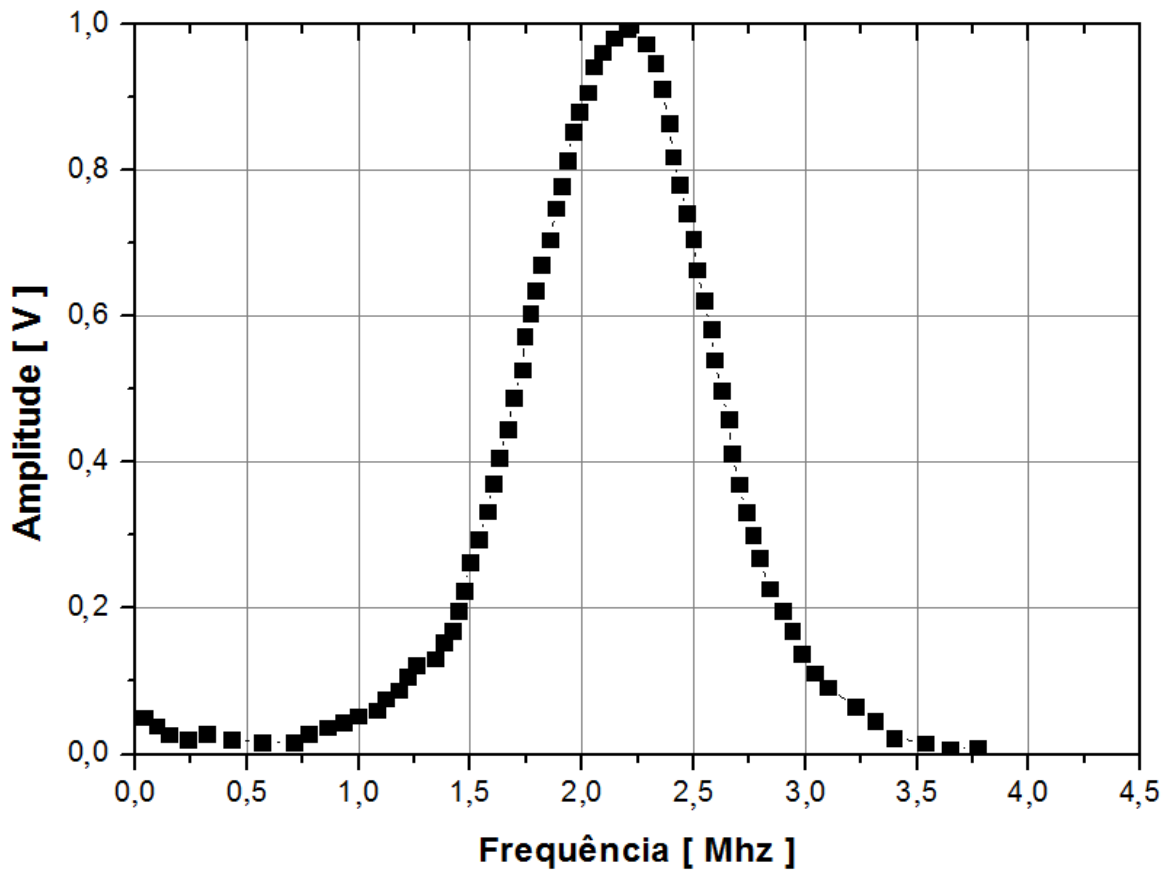


Figura 17: Espectro característico do transdutor da panametrics modelo DHC706-RM 2,25 MHz

Como confirmação e verificação do comportamento do espectro, um pulso ultrassônico foi adquirido sem qualquer interferência ou barreira em seu caminho acústico para verificar o comportamento exibido pelo catálogo do fabricante.

Este sinal foi adquirido da mesma forma que os pulsos ultrassônicos estudados, com uma frequência de amostragem de 20 MHz, com 3.000 pontos e 10.000 pulsos por amostra.

A Figura 18 representa um pulso adquirido, utilizando um sensor receptor diretamente acoplado ao um sensor emissor. Comparativamente ao espectro do sinal apresentado no catálogo do fabricante, Figura 17, o espectro apresentado na Figura 18, apresenta sua região de atividade também entre a faixa de 0 à 4 MHz, porém com um pico mais acentuado em 1,75 MHz.

Para a frequência de 2,25 MHz e seus arredores, é possível observar que o sinal é provavelmente afetado por ruídos e outras formas de interferência (acoplamento não preciso dos sensores, interferência eletromagnéticas, etc.) ao qual o sensor possa ter sido submetido.

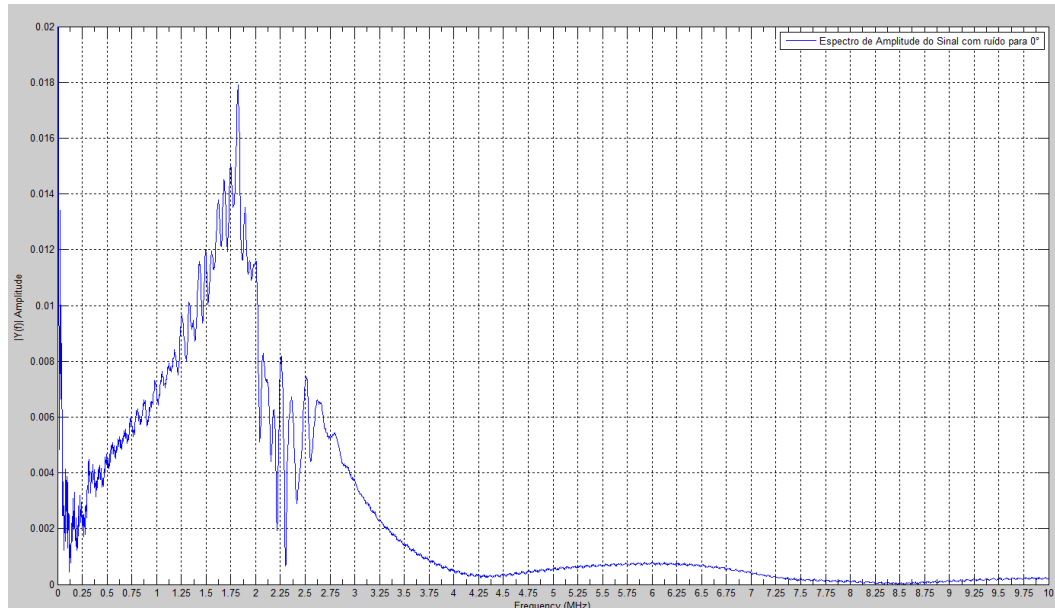


Figura 18: Espectro característico do sensor ultrassônico

Além do que para esta região ao redor da frequência de 2,25 MHz (entre 1,5 à 2,5MHz), fica evidente que foi a região mais afetada e sensível aos ruídos externos, e, portanto a região que efetivamente será influenciada pela variação externa de qualquer espécie ao qual for submetido o sensor.

Fazendo uma comparação entre a Figura 18 e a Figura 19, é possível observar que o espectro do pulso ultrassônico do sinal obtido pelo sensor posicionado a 0°, apresenta a sua região de atividade nas mesmas faixas de frequências, ou seja, de 0,0 à 4,0 MHz, com uma região visivelmente afetada entre 1,5 à 2,5 MHz.

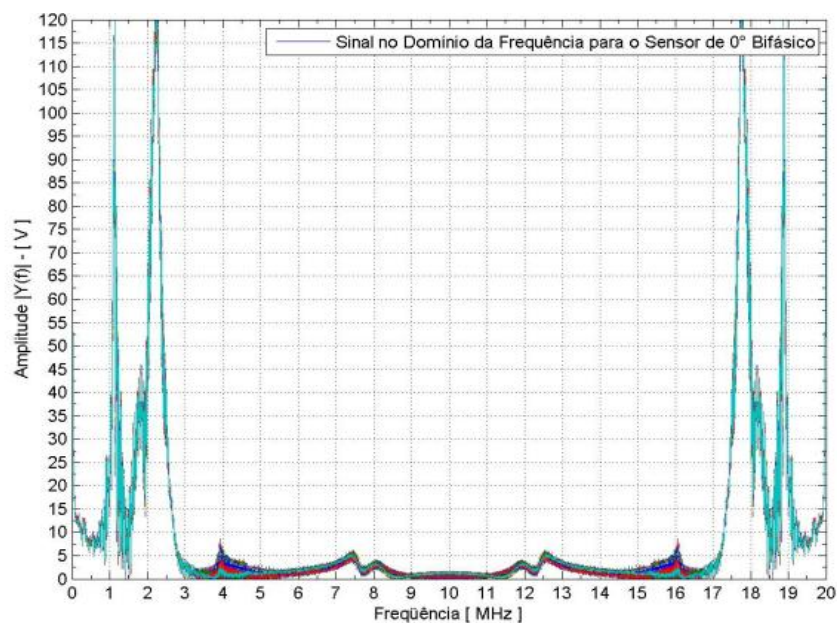


Figura 19: Sinal no domínio da frequência.

O espectro representado na Figura 19, é a representação do pulso ultrassônico no domínio da frequência, ou seja, a representação de seu espectro. Esta representação mostra claramente a região que compreende a frequência nominal do sensor (2,25 MHz), além de apresentar visualmente a influência das partículas sólidas nos picos de frequência neste mesmo intervalo, ou seja, de zero a 5MHz. Estas distorções causadas no espectro do pulso são devidas a presença e a variação das micro-esferas de vidro no escoamento.

Ressaltando também que a região compreendida entre 0 à $N/2=10$ MHz corresponde a parte real do pulso ultrassônico original, e portanto, a parte que abrange a região de efetividade do sensor. Sendo nesta primeira metade do espectro o que representa as informações a respeito do escoamento estudado. Já a segunda metade representa a parte imaginária (simétrica) da parte real e, portanto desconsiderada das análises.

Qualquer mudança no espectro causada pela variação de concentração da suspensão estudada é evidenciada nesta faixa onde se encontra a frequência dos transdutores, e conseqüentemente na parte central do espectro, onde as aproximações são mais pobres (altas frequências), não se pode fazer inferência alguma.

Nota-se que o espectro é composto por frequências em uma estreita faixa, que compreende as ondas longitudinais e transversais. Este espectro é a representação do pulso ultrassônico no domínio da frequência.

Utilizando a Transformada de Fourier, foi possível representar os espectros dos pulsos ultrassônicos no domínio da frequência e analisar quais frequências deveriam ser consideradas e quais seriam descartadas. Desta forma, a faixa de frequência considerada foi de zero à 4,0 MHz, o restante foi considerado ruído.

As frequências que não corresponderam aos fenômenos físicos estudados foram retiradas, conforme a Figura 20, permanecendo apenas a parte real do espectro e sua componente imaginária.

As frequências que não trazem informações a respeito do escoamento e dos fenômenos físicos em questão foram considerados aqui como ruídos. Sendo consideradas como ruídos, foram zeradas e eliminadas do espectro original, conforme pode se observar na marcação da Figura 20. Ou seja, os únicos espectros que restaram foram os espectros das frequências do

pulso ultrassônico (parte real e imaginária) que fornecem informações a respeito do escoamento multifásico.

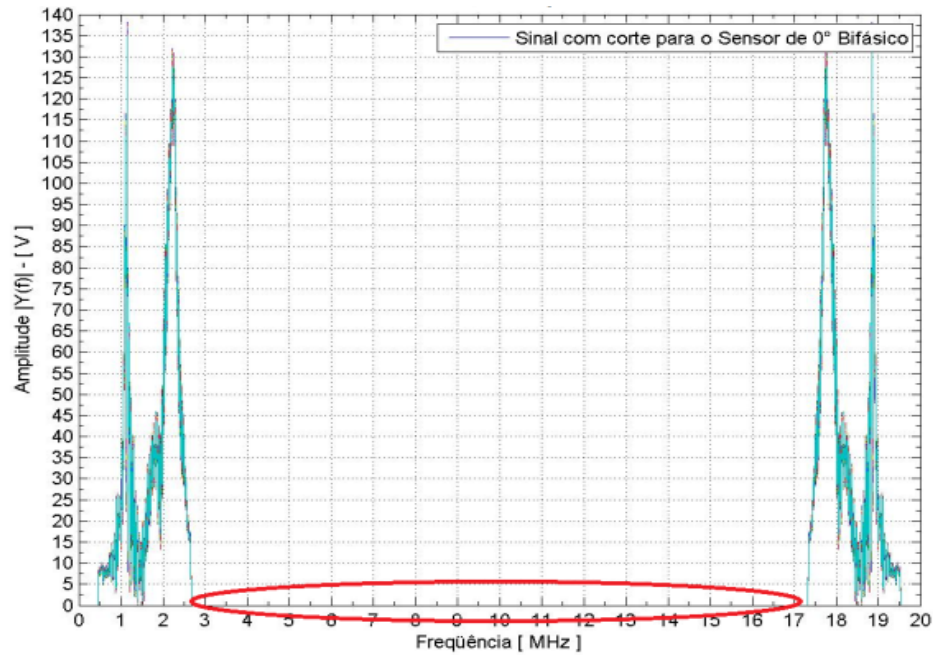


Figura 20: Corte dos ruídos no domínio da frequência

Retirada todas as frequências indesejadas, este sinal tratado, representado no domínio da frequência foi novamente levado para o domínio do tempo. Este processo para levar o sinal do domínio da frequência para o domínio do tempo foi através da Transformada de Fourier Inversa., utilizando o *software Matlab*.

Neste software, a partir de linhas de programação foi possível, abrir as matrizes que continham os dados dos pulsos ultrassônicos.

As matrizes de dados foram manipuladas a fim de representar os pulsos e permitir as transformações necessárias. Como também foi a ferramenta necessária que permitiu todos os cálculos e representações destes pulsos ultrassônicos.

Depois de descartada as frequências indesejadas e aplicada a Transformada Inversa de Fourier, o pulso ultrassônico, a priori, isento de frequências consideradas ruídos, apresenta um comportamento conforme a Figura 21, onde é possível observar pelas marcações um comportamento com menos variações (redução dos ruídos) e na representação a melhor identificação das ondas transversais e longitudinais.

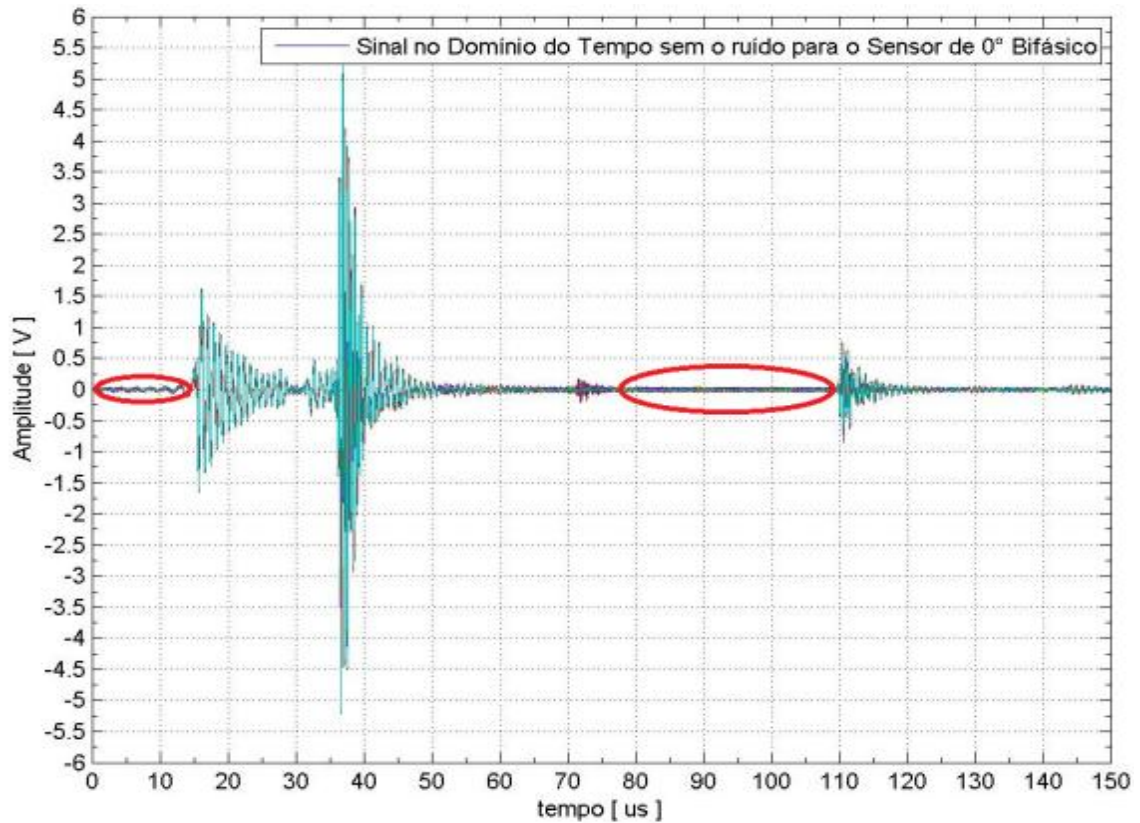


Figura 21: Sinal no tempo sem ruído.

O tratamento utilizado reduz os erros nos cálculos dos dados acústicos e torna os resultados mais confiáveis. De forma a confrontar esse procedimento, observou que para todas as regiões cujo sinal permaneceu invariável, mesmo variando-se a concentração da suspensão de sólidos, representaram intervalos que não receberam sinal algum referente ao escoamento estudado.

4.2 ATENUAÇÃO ACÚSTICA EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

O som ao se propagar em um dado meio sofre uma diminuição na sua intensidade. Esta diminuição é causada por alguns fatores, por exemplo, a dispersão das ondas, refração, reflexão, etc. Uma forma de visualizar esta atenuação é considerar, por exemplo, um pulso ultrassônico em um meio contínuo, e interpor uma superfície ou partículas no avanço deste sinal.

Este pulso se divide em partes, por exemplo, uma quantidade é refletida, outras são absorvidas e outras atravessam o obstáculo (transmitida). Esta parte do pulso ultrassônico que atravessa os obstáculos apresenta uma energia menor que a energia do pulso original, sendo este efeito denominado de atenuação acústica.

Levando em consideração a atenuação acústica do pulso ultrassônico e a forma pela qual o pulso é atenuado, na Figura 12, o sensor na posição 180° recebe o sinal acústico pelo método de transmissão direta. Desta forma obtêm-se um pulso característico ao longo de toda a faixa de concentração de sólido analisada.

O sinal é atenuado ao passar pelo escoamento multifásico, ou seja, perde gradualmente sua intensidade ao se propagar por este escoamento. A atenuação se deve basicamente as diferentes características acústicas do meio (impedâncias acústicas), reflexão do feixe acústico do ultrassom, divergência do feixe acústico. Este sinal atenuado, finalmente pode ser comparado com o sinal no escoamento monofásico.

Os demais sensores (0°, 45° e 135°) 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 multifásico, e essas reflexões serem aleatórias, não é possível caracterizar um sinal tão facilmente quanto para o sensor a 180°. Em resumo, deve-se analisar o conjunto dos sinais de modo a se obter informações confiáveis acerca do escoamento.

4.2.1 Análise do sinal em Transmissão Direta (Sensor a 180°)

Transmissão direta é um termo utilizado para representar um pulso ultrassônico que sai de um emissor ultrassônico, atravessa um dado meio em linha reta até chegar ao receptor ultrassônico. Desta forma, um sensor posicionado a 180° recebe um sinal acústico. Este sinal recebido é transmissão direta. Deste sinal recebido em transmissão direta obtêm-se um pulso característico ao longo de toda a faixa de concentração de micro-esferas de vidro analisada.

Na Figura 22 é mostrado um exemplo de sinal recebido pelo transdutor em transmissão direta (180°). 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 a ser emitido.

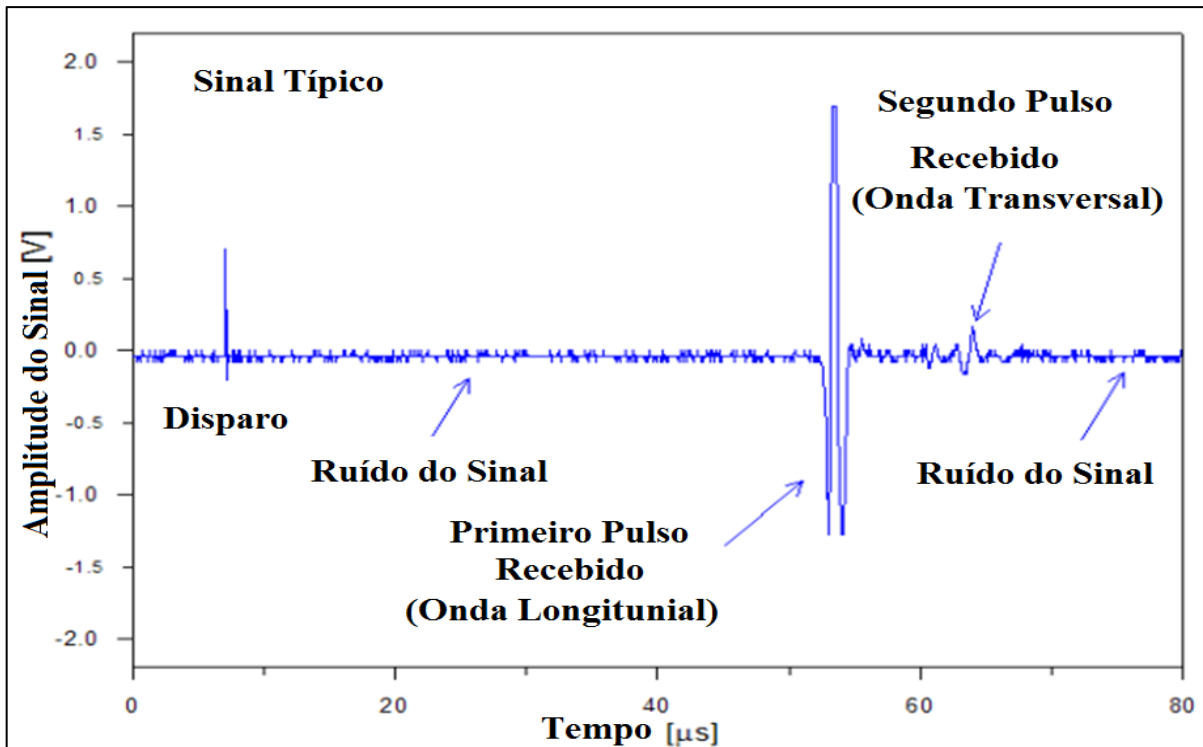


Figura 22: Sinal em transmissão direta (180°). [Fonte: Tanahashi et al. (2010)].

O segundo sinal observado na Figura 22, representa o primeiro pulso que chega ao receptor a 180°. Esse pulso é a onda longitudinal que atravessa o escoamento e tubulação de acrílico. Por fim, o terceiro sinal (segundo pulso recebido) é a outra componente da onda sonora, onda transversal, gerada na interface escoamento-acrílico. Ela se propaga a uma velocidade mais baixa e atinge o receptor alguns instantes após a onda longitudinal atingir o receptor.

Os sinais ultrassônicos são compostos por 10.000 pulsos por amostra conforme descrito anteriormente. Para cada amostra, foi calculada uma média destes 10.000 resultando num pulso médio por amostra. Como cada concentração foi representada por seis amostras acústicas, foi calculada novamente uma média destas amostras acústicas.

Mas devido a superposições de treze diferentes concentrações médias em uma mesma figura além do que a extensão de 150 μm não exibir com clareza e distinção os efeitos da atenuação acústica com a variação da concentração. Foi necessário selecionar alguns pulsos médios que melhor representassem a atenuação acústica. Somado a escolha destes pulsos, foi selecionado também parte do pulso com uma boa visualização dos efeitos atenuantes das micro-esferas de vidro.

Desta maneira, considerou-se para interpretação e análise apenas quatro amostras médias, ou seja, a referência (água monofásica) e as concentrações de 0,25; 0,50 e 1,00 respectivamente. Considerando também que a janela de observação é muito grande para análise, conforme mencionado procurou-se a melhor faixa do pulso para melhor observar a atenuação garantindo uma melhor distinção entre as curvas.

De posse do tempo de trânsito e reconhecendo qual parte do pulso será analisado, soube-se que o primeiro sinal que chega ao receptor a 180° é em aproximadamente 75μs para todas as concentrações de micro-esferas de vidro. Esta é a onda longitudinal que atravessa o escoamento bifásico e a tubulação de acrílico, que representa a melhor faixa para delimitar o pulso para as quatro condições médias já estabelecidas por facilidade, como pode ser visto na Figura 23.

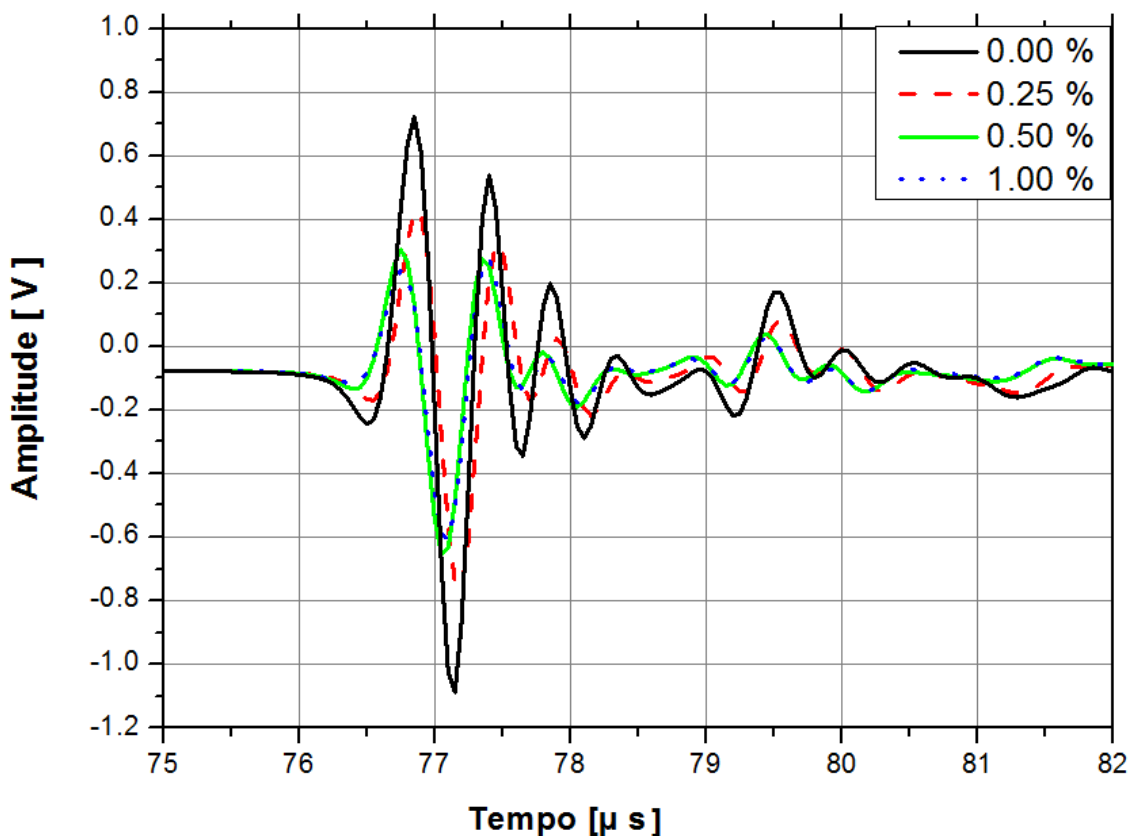


Figura 23: Onda longitudinal para algumas concentrações (bifásico 180°).

Quantitativamente, para se medir a atenuação do sinal, foi preciso adotar um parâmetro acústico que fosse capaz de representar os efeitos da interação da onda acústica com o escoamento multifásico e a tubulação. A análise em transmissão direta, utilizando os pulsos

médios, foi possível devido que algumas das características principais do pulso não são modificadas à medida que se aumenta a concentração de sólido.

A delimitação da região de aquisição foi feita com o intuito de analisar apenas os intervalos que apresentavam variações com a concentração de micro-esferas de vidro na suspensão. Eliminando assim erros sistemáticos dos resultados e a capacidade computacional requerida para armazenamento e tratamento dos dados é menor. O tempo entre o disparo e o começo da chegada do sinal no receptor é praticamente o mesmo, sendo verdade também para a duração dos pulsos que correspondem ao intervalo de tempo entre o começo da sua chegada e o momento em que o sinal termina.

As amplitudes do sinal da onda longitudinal estão bem visualizadas na Figura 23, e permite observar com melhor clareza o efeito da atenuação com a adição de micro-esferas de vidro no escoamento. O aumento da concentração da suspensão no escoamento bifásico diminuiu gradativamente a amplitude do pulso recebido, ou seja, a energia acústica medida pelo transdutor de 180°.

Mesmo com quantidades muito pequenas de micro-esferas de vidro, já é possível observar uma redução da energia que chega ao sensor de 180°. O aumento da concentração de micro-esferas de vidro atenua gradualmente as amplitudes do pulso ultrassônico, porém as durações dos pulsos permaneceram com pouca ou nenhuma mudança.

Para correlacionar os dados de atenuação acústica com a concentração de sólidos nos escoamentos bifásicos e trifásicos neste trabalho, levou-se em consideração a idéia de correlacionar a concentração das fases dispersas com a atenuação acústica de acordo com os trabalhos de Dias et. al. (1998) e Dias (2000). Nestes dois trabalhos, além de mostrar como comparar a atenuação acústica com fases dispersas, forneceu também um método para correlacionar a fração de vazio para o escoamento trifásico deste trabalho. Os autores utilizaram sensores de condutividade elétrica de dupla agulha para a medição local de fração de vazio, velocidade das bolhas, diâmetro de cada bolha de ar e área de densidades interfaciais em escoamentos do tipo água-ar (bolhas dispersa), verticais e ascendentes em tubulação de acrílico com 52 mm de diâmetro interno. 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.

Considerando o método de correlacionar atenuação acústica com a fase dispersa (micro-esfera de vidro) e utilizando o método de correlação de fração de vazio, o presente trabalho proposto, foi possível correlacionar tanto a fase dispersa sólida quanto a fase gasosa com a atenuação acústica.

Para o escoamento trifásico, a fração de vazio foi fixada em $\alpha = 8,00 \%$, e a concentração de micro-esferas de vidro presente na suspensão variou novamente de 0,00 até 3,00 % em etapas de 0,25% em peso. Os dados referente a suspensão e os parâmetros acústicos foram os mesmos do escoamento bifásico presentes na Tabela 6 e na Tabela 7.

O mesmo procedimento aplicado para análise do escoamento bifásico foi considerado aqui. Ou seja, considerou apenas algumas concentrações e representou-se apenas uma parte do pulso ultrassônico.

Na Figura 24, o pulso médio foi novamente atenuado com o acréscimo das micro-esferas de vidro. O aumento das partículas sólidas e agora as bolhas de ar presentes no escoamento fez com que a amplitude do sinal recebido diminuísse, porém de uma forma bem mais acentuada.

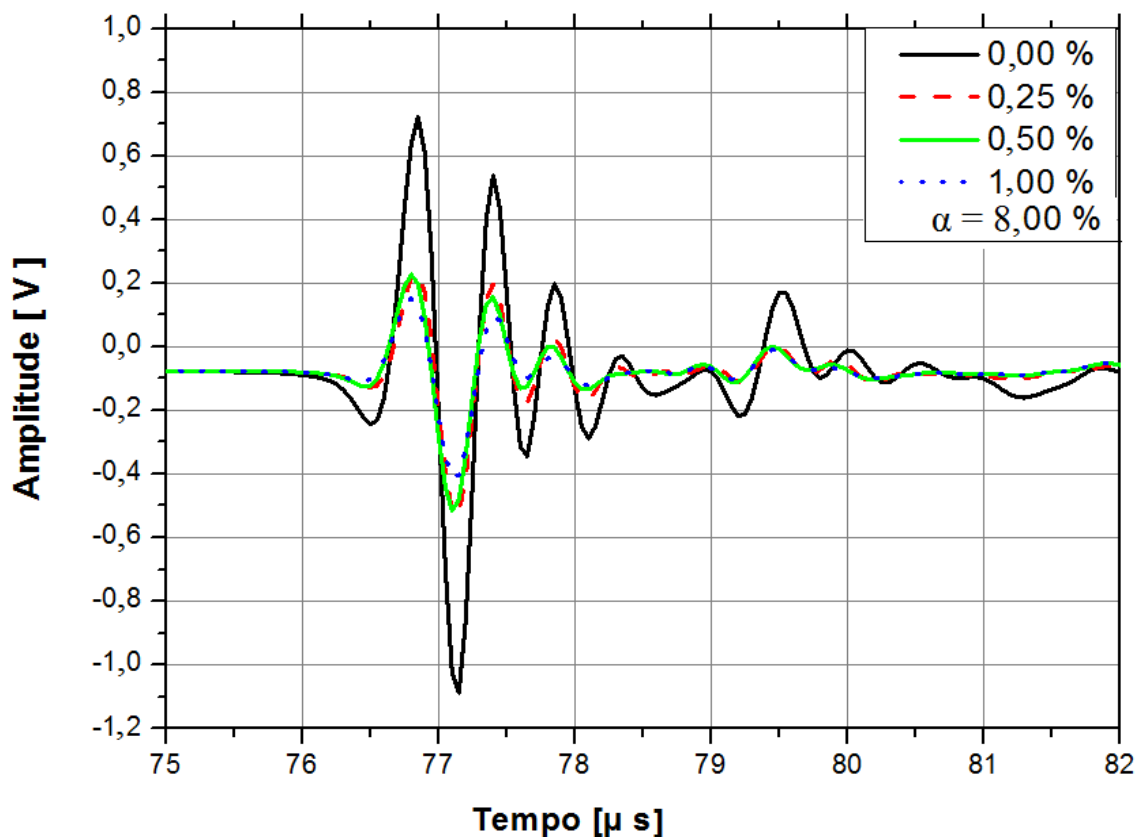


Figura 24: Onda longitudinal para algumas concentrações (Trifásico 180°).

Quantidades muito pequenas de micro-esferas de vidro e uma baixa fração de vazio reafirmam o que foi observado anteriormente no escoamento bifásico, ou seja, uma redução da energia que chega ao sensor. A onda longitudinal em aproximadamente $76\mu\text{s}$ carrega informação a respeito do escoamento. A Tabela 8, apresenta uma comparação entre as atenuações do escoamento bifásico e trifásico.

Tabela 8: Comparação entre as amplitudes do escoamento bifásico e trifásico (Sensor 180°).

Concentração [%]	Escoamento Bifásico		Escoamento Trifásico	
	Amplitude 1° mínimo	Amplitude 1° Máximo [V]	Amplitude 1° mínimo	Amplitude 1° Máximo [V]
0,00%	-0,22	0,70	-0,22	0,70
0,25%	-0,18	0,40	-0,12	0,22
0,50%	-0,12	0,30	-0,10	0,20
1,00%	-0,10	0,25	-0,09	0,17

Nota-se que no pulso referente ao escoamento monofásico (referência -0%), tanto para o escoamento bifásico quanto o trifásico, os valores dos mínimos e dos máximos são os mesmos, uma vez que a referência para ambos os escoamentos estavam a mesmas condições, ou seja, temperaturas iguais, referências isentas de partículas sólidas e bolhas de ar. É possível observar também na Tabela 8, que as amplitudes tanto dos mínimos quanto dos máximos na onda longitudinal foram atenuados gradativamente nos dois escoamentos com o acréscimo de micro-esferas de vidro na suspensão.

Quantitativamente, para se obter medidas de atenuação acústica do pulso ultrassônico foi necessário escolher o parâmetro acústico que fosse capaz de representar os efeitos das variações das fases dispersas com o pulso ultrassônico. Desta a forma, procurou-se neste trabalho além de apresentar a atenuação dos pulsos no domínio do tempo, fazer uma comparação com a energia carregada por cada pulso ultrassônico.

A energia carregada por um pulso ultrassônico é obtida facilmente através da integração do quadrado da amplitude do pulso ao longo do seu período de duração, sendo esta a energia

mecânica refletida e transmitida em um dado meio. A integral pode ser resolvida de forma numérica, pela Equação (21), e com auxílio computacional.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} I^2 dt \quad 21$$

O parâmetro acústico energia foi normalizado pelo valor correspondente do sinal ultrassônico atravessando o meio monofásico, somente água. Para correlacionar a concentração de fases dispersas com atenuação acústica utilizando o conceito de energia acústica (energia carregada pelo pulso ultrassônico), neste trabalho optou-se por utilizar a razão de energia.

A razão de energia consiste em comparar a energia dos pulsos sobre a influência das fases dispersas em relação a energia do pulso do meio monofásico. A Equação (28), mostra como foi feita a normalização da energia, ou seja, a razão de energia.

$$\frac{E_{2\phi}}{E_{1\phi}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I_{2\phi}^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} I_{1\phi}^2 dt} \quad 22$$

Os sinais de referência para os cálculos da razão de energia para os receptores a 0° e 180° foram obtidos para a água monofásica preenchendo toda a tubulação. Para os sensores a 45° e 135° não foi possível usar a mesma condição para referência devido a não chegada de energia nestes receptores no escoamento monofásico.

A referência usada para estes sensores foi o sinal da água monofásica obtido no sensor a 180°. A temperatura foi mantida praticamente constante, de modo a minimizar qualquer influência da temperatura na atenuação do sinal. Além das influências observadas pelas fases dispersas no escoamento, agora com a razão de energia para o escoamento bifásico, é possível observar novamente uma correlação entre atenuação da energia acústica e a concentração de micro-esferas de vidro na suspensão.

Na Figura 25 é possível observar a razão de energia média em função da concentração de micro-esferas de vidro para todos os sensores de ultrassom (0°, 45°, 135° e 180°). A

energia medida pelos sensores de 0° e 180° decresce exponencialmente com o aumento da concentração de sólidos.

Para os sensores a 45° e 135° , respectivamente, não foi possível utilizar o escoamento monofásico como referência, pois para essa condição esses receptores não recebem nenhuma energia acústica. Lembrando que no escoamento monofásico os sensores a 0° e 180° recebem o máximo da energia acústica.

Logo, para qualquer valor da concentração têm-se valores da razão de energia menores do que um. Para manter o mesmo comportamento matemático para os sensores a 45° e 135° , ou seja, a razão de energia menores que a unidade, ($0 \leq \frac{E_{2\theta}}{E_{1\theta}} \leq 1$), a referência utilizada foi à energia média recebida pelo sensor a 180° .

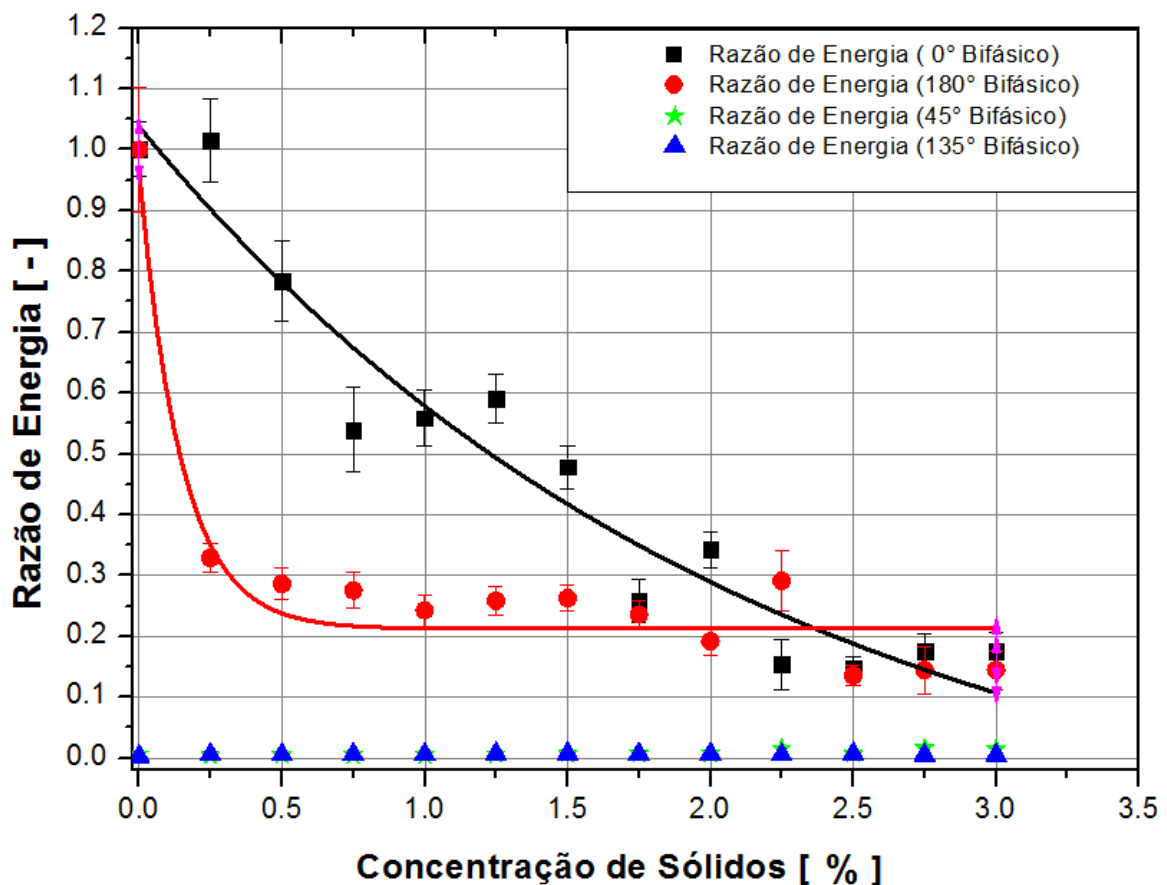


Figura 25: Razão de energia em função da concentração de sólidos (Bifásico).

A Figura 25 exibe uma clara correlação entre as variações de concentração e a razão de energia dos sensores. O pulso ultrassônico recebido pelo sensor a 180° diminui gradualmente, evidenciando o bloqueio progressivo do feixe acústico.

O pulso do sensor a 0° não decresce até o mesmo nível por causa da parcela de energia refletida pelo escoamento. Os sensores a 45° e 135° recebem praticamente a mesma quantidade da energia acústica ou quase nenhuma, evidenciando o espalhamento essencialmente uniforme do feixe acústico ao longo de todo o perímetro da tubulação.

No escoamento trifásico da mesma forma que no escoamento bifásico, o conceito de razão de energia foi aplicado, para observar novamente a existência de correlação entre atenuação da energia acústica com a variação da concentração de micro-esferas de vidro na suspensão.

Os mesmos procedimentos e considerações aplicados aos sensores ultrassônicos, foram seguidos novamente, para a comparação. Ou seja, as referências para os cálculos da razão de energia para os receptores a 0° e 180° foram obtidas para a água monofásica preenchendo toda a tubulação e para os sensores a 45° e 135° foi utilizada como referência o sinal da água monofásica do sensor de 180° . Na Figura 26, é exibida a razão de energia de todos os sensores novamente, referentes a transmissão através do escoamento trifásico. As reflexões/atenuações foram provocadas pelas micro-esferas de vidro e bolhas de ar presentes no caminho ultrassônico.

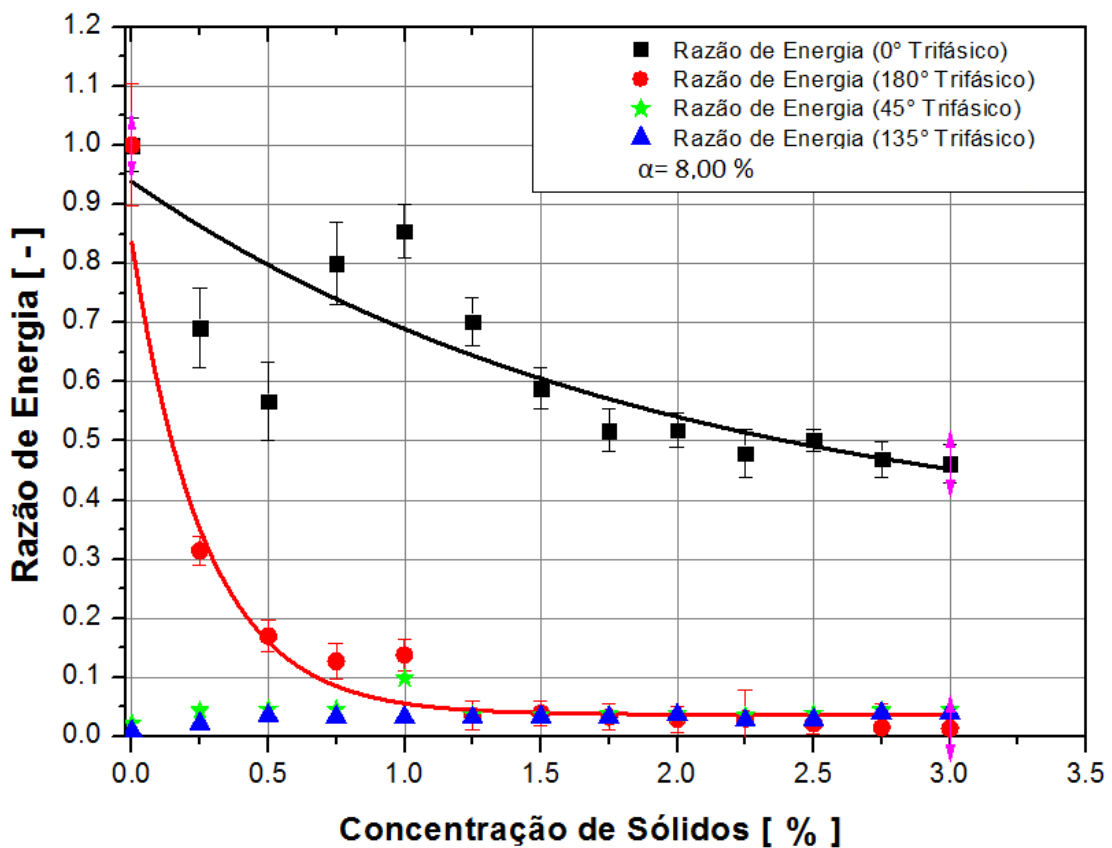


Figura 26: Razão de Energia em função da concentração de sólidos (Trifásico).

O feixe acústico ao encontrar em seu percurso interfaces do tipo líquido-sólido e líquido-gás é submetido a uma combinação de efeitos acústicos (espalhamento, absorção e reflexão) que resulta em mudanças tanto na atenuação do pulso quanto na sua velocidade.

O feixe ultrassônico ao encontrar agora a interface água ar além das micro-esferas de vidro, tem um efeito adicional no seu comportamento. Parte desse feixe acústico é transmitido e parte é refletido. A parte refletida retorna pelo mesmo meio contínuo (água) com a mesma velocidade de propagação emitida.

A parte da onda que é transmitida, ou seja, que atravessa a fase ar, esta exposta a um meio com diferentes impedâncias acústicas, e conseqüentemente adquire características acústicas diferentes, ou seja, mudança de velocidade e de atenuação. Apesar da bolha de ar não permitir que o pulso ultrassônico propague efetivamente pelo seu interior, as superfícies destas bolhas causam grandes distorções no feixe acústico. Afetando a velocidade e reduzindo a amplitude do pulso ultrassônico.

Considerando que no escoamento trifásico, além da gradual variação da concentração da suspensão a presença das bolhas de ar se soma aos efeitos das micro-esferas de vidro, dificultando mais a passagem do pulso ultrassônico, causando a grande redução da energia observado na Figura 26.

No sensor a 0° , é possível observar que para as concentrações inferiores a 1,00%, os efeitos causados pela presença de ar, apesar da fração de vazio constante, são mais visíveis do que os efeitos das micro-esferas de vidro. Este efeito é devido a reflexão causada pela superfície da bolha de gás que atua como um espelho refletindo a onda sonora. Resultando em perda significativa de energia que foi transmitida pelo escoamento e aumentando a um pouco a energia recebida pelo sensor a 0° . Porém a partir desta concentração de 1,00%, os efeitos da adição de partículas se destacam e a razão de energia decresce com o incremento da concentração.

Para o sensor de 180° , tanto no escoamento bifásico quanto no escoamento trifásico, teve o mesmo comportamento de queda, porém no caso do bifásico a razão de energia chega próximo de um valor entre 0,1 e 0,2 enquanto que no trifásico, este reduz para aproximadamente zero.

Os sensores de 45° e 135° obtiveram pequenas parcelas de aumento no escoamento trifásico. Devido a presença das bolhas de ar, parte da onda que era refletida era também espalhada pela superfície das bolhas de ar. Essas partes da onda que foram espalhadas foram recebidas nos sensores laterais, resultando em um acréscimo de energia acústica nestes sensores.

Mas como a fração de vazio foi mantida praticamente constante, esse acréscimo de energia foi constante para todas as concentrações, uma vez que as reflexões e espalhamentos causados pelas bolhas de ar são bem mais significantes do que os causados pelas micro-esferas de vidro. E os desvios devido as partículas sólidas não foram muito evidenciados, apresentando um espalhamento essencialmente uniforme do feixe acústico ao longo de todo o perímetro da tubulação.

A principal conclusão é que todos os transdutores mantêm uma clara correlação com a concentração de micro-esferas de vidro no escoamento bifásico e trifásico. Os sensores a 180° e 0° podem ser utilizados com mais facilidade para se medir a concentração, pois o sinal adquirido no escoamento monofásico, além de poder ser utilizado como referência para os sensores, as janelas de atividade que apresentam os pulsos recebidos são mais precisas. Sendo também mais sensíveis à concentração do que os sensores a 45° e 135°.

4.2.2 Tempo de Trânsito

O tempo de propagação da onda ou a velocidade de propagação são dependentes das propriedades do meio e do modo de propagação das ondas acústicas. Considerando que a duração do pulso ultrassônico recebido pelo sensor a 180° permaneceu praticamente constante com a concentração de sólido, o tempo de trânsito dos pulsos ultrassônicos foi calculado para o sensor a 180°.

Também foi observado que o tempo de trânsito inicial (intervalo de tempo entre o disparo e o momento em que a onda longitudinal começa a chegar ao receptor) permaneceu constante em toda a faixa das concentrações testada, vide Figura 23 e Figura 24.

O tempo de trânsito inicial representado por $\Delta t_{inicial}$ é o intervalo de tempo de trânsito que chega ao receptor a cada incremento infinitesimal de tempo. Pode ser interpretado como o resultado global da topologia do escoamento sobre a onda acústica que se propaga.

A Figura 27 mostra o $\Delta t_{inicial}$ em função da concentração de micro-esferas de vidro para o sensor a 180° . Pode ser visto que o $\Delta t_{inicial}$ apresenta um comportamento parabólico bem discreto ao longo de toda a faixa de concentração testada.

As barras de incertezas foram calculadas a partir do desvio padrão dos 10.000 pulsos de cada uma das seis amostras, ou seja, seis amostras acústicas com 10.000 pulsos cada amostra. A dispersão do sinal médio, combinadas com possíveis variações da concentração entre uma amostra acústica e pequenas variações da temperatura do escoamento, refletiu em um alto valor para as barras de incerteza. Mas mesmo assim, foi possível obter informações do tempo de trânsito com a variação da concentração.

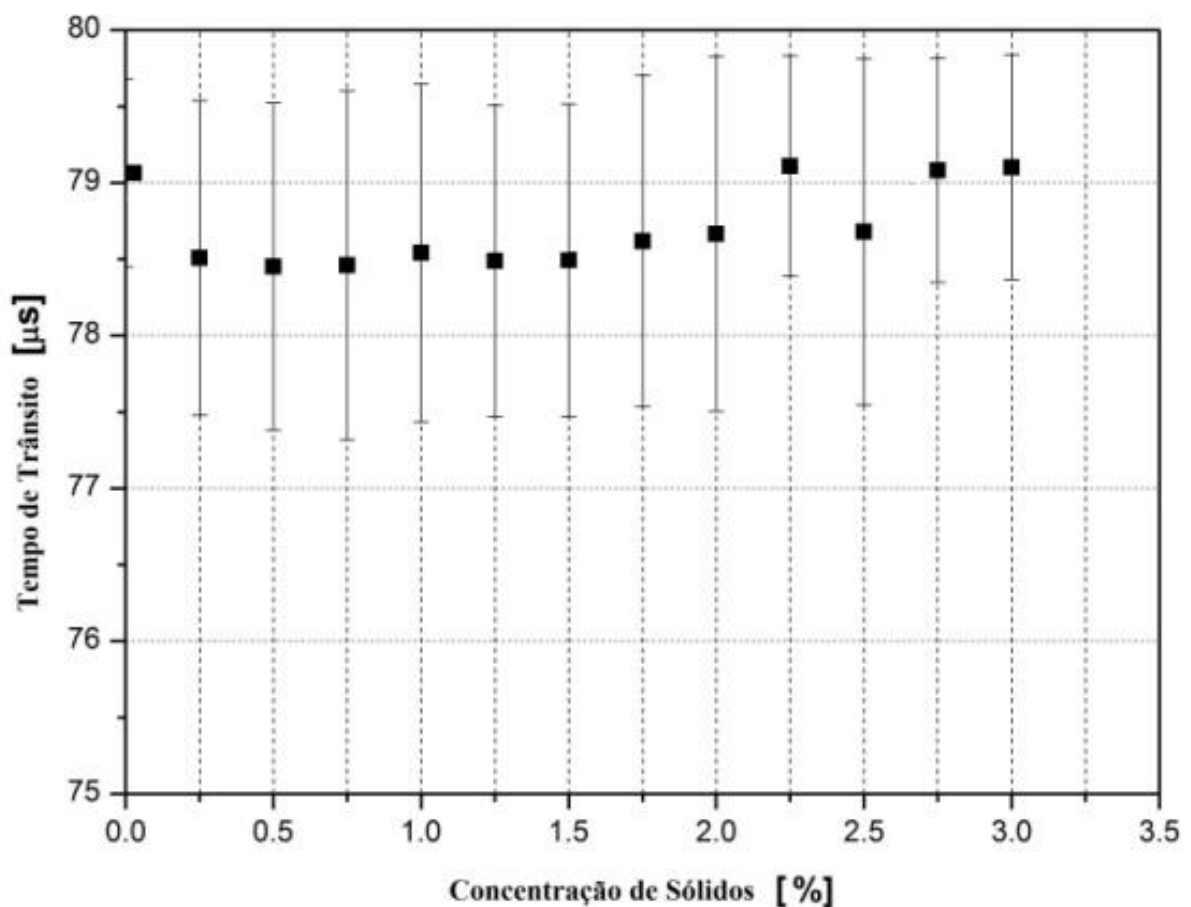


Figura 27: Tempo de trânsito para o sensor de 180°

Outra dificuldade encontrada, que também pode ocasionar em variações nos resultados foi na escolha do ponto de início e fim do pulso ultrassônico. Existem várias formas de ruídos presentes em pulso ultrassônico. Identificar o que são ruídos e o que realmente é o sinal ultrassônico que carrega informação do escoamento é difícil.

Devido à dificuldade em se estabelecer um ponto final para a duração do pulso ultrassônico, ou seja, identificar onde o pulso se extingue gradualmente e acaba se torna um

tanto confuso devido aos ruídos que o transdutor/receptor recebe. Portanto, o final do pulso teve que ser determinado visualmente, analisando diversos sinais escolhidos aleatoriamente para uma dada amostra. O tempo correspondente era então inserido na rotina computacional.

A Figura 28 mostra $\Delta t_{inicial}$ em função da concentração de micro-esferas de vidro da suspensão para o sensor a 180° no escoamento trifásico. O valor de $\Delta t_{inicial}$, para o escoamento monofásico (0,00 %) permaneceu praticamente com nenhuma variação em relação ao escoamento bifásico. Uma vez que os pulsos adquiridos para o escoamento monofásico (água) tanto pra o bifásico quanto para o trifásico, foram obtidos considerados os mesmos parâmetros (vazão, temperatura, pressão, etc.).

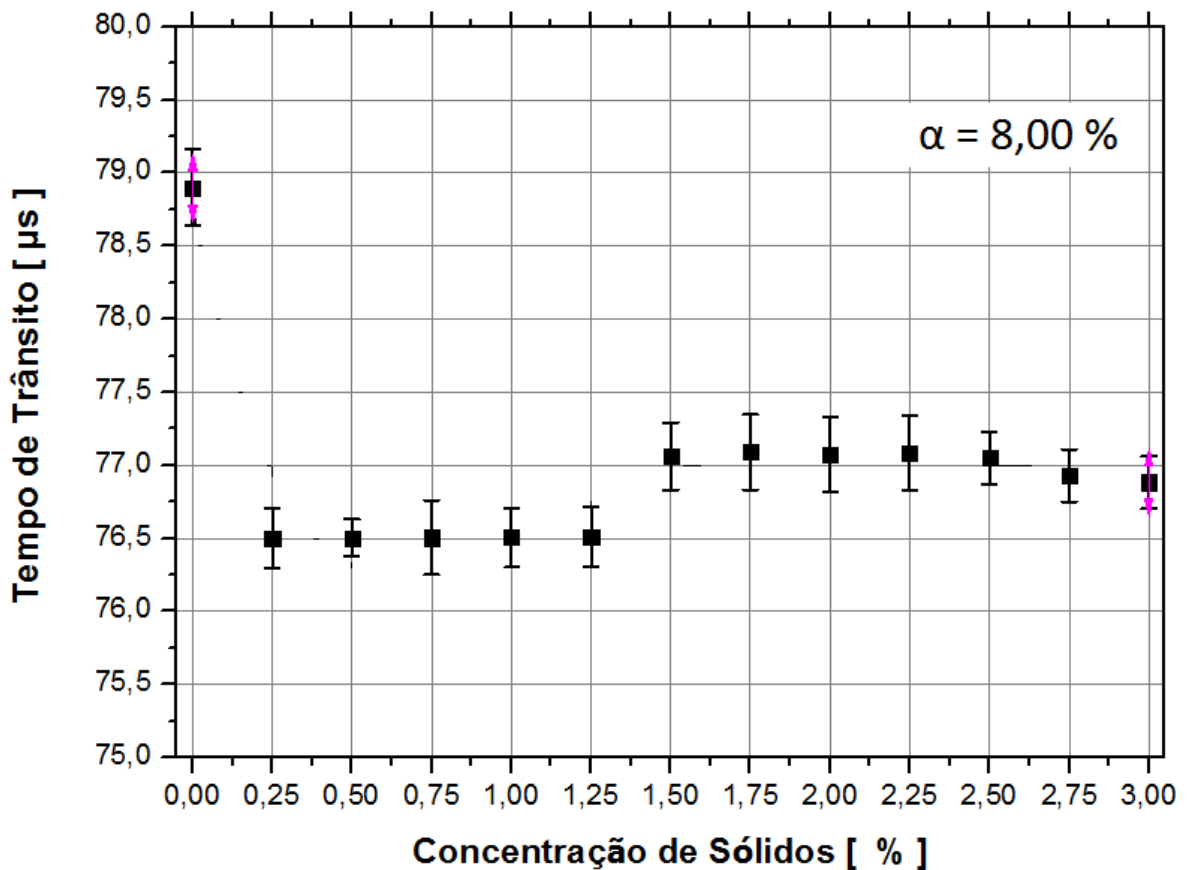


Figura 28: Tempo de trânsito inicial (180° Trifásico)

Com a primeira concentração da suspensão e a presença das bolhas de ar, o tempo de trânsito cai rapidamente para um valor de aproximadamente $76,5 \mu\text{s}$. Permanecendo constante até em aproximadamente 1,25% da concentração. Como mencionado anteriormente, o fenômeno de reflexão causada pela diferença de impedância acústica entre a água e o ar, onde a superfícies das bolhas atuam como espelho, refletindo e espalhando o feixe acústico, resulta

tanto em perda significativa da energia carregada pelo pulso como também implica na alteração do caminho acústico alterando conseqüentemente o tempo de transito da onda.

Considerando as partículas sólidas (micro-esferas de vidro), quando o pulso ultrassônico percorre a fase contínua (água), apresenta uma velocidade de acordo com a impedância acústica do meio. Mas quando o pulso atinge a interface líquido-sólido, e começa a propagar no novo meio (sólido), este começa a propagar com uma velocidade maior que foi percorrida no líquido e segundo as novas características de impedância do meio sólido.

Este efeito de acelerar o pulso ao passar pelas partículas sólidas causa um tempo de trânsito resultante menor, devido o aumento da velocidade causada pelas partículas presentes no escoamento. Porém, quando no escoamento estão presentes tanto as partículas sólidas quanto as bolhas de ar, os efeitos relacionados a bolhas de ar são mais significativos e sobre saem aos efeitos das partículas sólidas. Suas variações no tempo de trânsito são muito mais significativas que as partículas sólidas.

Baseando-se no comportamento do feixe acústico ao encontrar uma interface líquido-gás, o efeito de diminuição do tempo de trânsito é bem mais significativo do que a líquido-sólido. Isto, considerando que o percurso que é aumentado pelo fato da onda ter que contornar a bolha seja mais significativo que o aumento de velocidade conferido pelas partículas sólidas.

Mas como a fração de vazio foi mantida praticamente constante, a partir da concentração de 1,50 % os efeitos do aumento da concentração aumentam novamente o tempo de trânsito para aproximadamente 77,0 μ s. Diferentemente do esperado, de que o tempo de trânsito devesse aumentar com o aumento das partículas sólidas. Sendo possível observar um ligeiro comportamento de queda do tempo de trânsito somente para as quatro ultimas concentrações.

O escoamento trifásico, apesar da queda acentuada no valor do tempo de trânsito com pela presença do ar, apresenta as mesmas tendências do tempo de trânsito do escoamento bifásico. Ou seja, queda em relação ao pulso no escoamento monofásico, e depois um ligeiro aumento com o acréscimo das partículas sólidas.

O comportamento apresentado por $\Delta t_{inicial}$ apresentado pelo escoamento bifásico (líquido-sólido) na Figura 27, é coerente com a hipótese de que está associado à porção da

energia acústica que chega ao receptor com um mínimo ou nenhuma perturbação das partículas, representando principalmente a transmissão através da fase contínua. A fase gasosa no escoamento trifásico reduziu o tempo de transito inicial como pode ser observado.

Apesar da diminuição do tempo de trânsito, o comportamento depois da queda teve pouca variação ou quase nenhuma variação ao longo das concentrações subseqüentes. Na Tabela 9 estão exibidas as principais condições deste trabalho, com comparações com alguns trabalhos encontrados na literatura.

Tabela 9: Dados Acústicos em Sistemas Multifásicos de alguns Autores na Literatura

Autor (es)	Presente Trabalho	Kytömaa (1995)	Shukla e Prakash (2006)	Soong <i>et al.</i> (1995)	Stolojanu e Prakash	Urick (1947)
Sistema Líquido-Sólido	m.e.v/água	m.e.v/água	m.e.v/água	m.e.v /água	m.e.v /água	kaolin/ água
Faixa de Concentração [m/m.%]	0,0 - 3,0	0,0 - 60,0	0,0 - 40,0	0,0 - 35,0	0,0 - 100,0	0,0 - 63,4
a (µm)	75,0 - 300,0	12,0	0,17 - 0,55	40,0	17,5	0,2 - 2,5
ka	0,72 - 2,84	0,023	0,23 - 0,75	0,42	0,30	0,0009 - 0,011
δ [µm]	0,37	0,83	0,31	0,35	0,26	0,55
Re	203 - 806	14,6	55,0 - 178,0	114,0	63,3	0,36 - 4,52
Regime de Dissipação	Inercial	Inercial	Inercial	Inercial	Inercial	Viscoso
Tendências atenuação pela concentração [%]	Decaimento Exponencial	Aumento	-	Decaimento Exponencial	Decaimento Exponencial	-
Tendências tempo trânsito inicial pela concentração [%]	Bifásico	Decaimento Exponencial	Decaimento Exponencial	Decaimento Linear	Decaimento Linear	Parabólico, com mínimo em 39.4%
	Parabólico com min. Em 1,5%					
	Trifásico					
	Aproximadamente linear, a partir de 0,25%					

Todos os autores citados na Tabela 9, utilizaram frações de partículas de sólidos maiores que o presente trabalho (0,00 - 3,00% em peso), mesmo assim, algumas semelhanças foram observadas. Para a maioria dos trabalhos, exceto o trabalho de Urick (1947), todos utilizam micro-esferas de vidro em água encontram-se no regime de dissipação acústica inercial.

O parâmetro (ka) no presente trabalho compreendeu uma faixa entre 0,72 até 2,84 enquanto que o trabalho de Shukla e Prakash (2006), apresentou com uma faixa de 0,23 até 0,75, exibindo uma faixa de interseção entre $0,72 < ka < 0,75$, ou seja, uma estreita faixa de ka semelhante. Outra semelhança encontrada foi quanto ao valor da espessura da camada limite (δ), onde para o presente trabalho obteve-se um valor de $0,37 \mu\text{m}$ e para o trabalho de Shukla e Prakash (2006) um valor de aproximadamente $0,31 \mu\text{m}$.

A espessura da camada limite (δ), também foi bastante semelhante ao trabalho de Soong et al. (1995), para o qual apresentou um valor de $0,35 \mu\text{m}$. Apesar de não apresentar um valor de (ka) semelhante, ambos os trabalhos se encontram no mesmo regime de dissipação acústica, ou seja, regime inercial.

Mesmo para concentrações tão baixas como a 0,25%, a razão de energia já foi inferior a 0,5 e decresceu muito devagar para valores com uma estreita faixa de concentração testada, e este comportamento foi semelhante ao observado por Soong et al. (1995), onde as partículas com raio de aproximadamente $40 \mu\text{m}$ em água também apresentaram um regime inercial. Os sensores posicionados a 45° e 135° não mediram nenhuma energia significativa durante toda concentração de micro-esferas de vidro testadas. Esse comportamento confirma a expectativa de múltiplos espalhamentos não deve ser muito intenso para os tamanhos de partículas neste experimento.

Outra semelhança com o trabalho de Soong et al. (1995) foi quanto ao comportamento da atenuação acústica (razão de energia), para ambos os trabalhos houve um decaimento exponencial com o acréscimo da concentração de partículas sólidas na suspensão para os dois escoamentos (bifásico e trifásico).

Stoljano e Prakash (2006) em seu trabalho, não apresentaram espessura da camada limite e o valor do parâmetro (ka) semelhantes com o presente trabalho. Porém em comparação com demais trabalhos citados, o mesmo se encontra no regime de dissipação acústico inercial. Apresentando um decaimento exponencial em sua atenuação acústica (razão de energia) com o aumento da concentração de partículas sólidas.

Kytömaa (1995), em seu trabalho mostra que a velocidade do som e/ou tempo de trânsito e a atenuação de cada uma das fases contem informações complementares e medidas que podem fazer o uso destes parâmetros e desta técnica mais robustas. Desta forma outra característica apresentada na Tabela 9 se refere ao tempo de transito inicial do pulso

ultrassônico e seu comportamento com o acréscimo de partículas sólidas na suspensão multifásica.

O tempo de trânsito inicial apresentado por todos os autores apresentam um decaimento ou de forma exponencial ou linear. O que não foi verificado no presente trabalho, onde o tempo de transito tem um comportamento parabólico ou quase sem variações para todas as faixas de concentrações testadas no escoamento bifásico. Para o trifásico, apesar da queda acentuada devida a presença das bolhas de ar, apresentou pouca variação com o acréscimo das partículas sólidas. Só mostrou comportamento de queda para as maiores concentrações do teste.

O único trabalho encontrado semelhante ao presente trabalho foi o de Urick (1947), que apesar de estar em um regime diferente, ou seja, regime viscoso mostrou uma tendência no tempo de trânsito semelhante com o do presente trabalho. Um comportamento parabólico com o acréscimo das partículas sólidas na suspensão, diferentemente dos demais autores, que apresentaram um comportamento de queda com o acréscimo de partículas.

No estudo realizado por Urick (1947), apenas para as maiores concentrações de partículas sólidas na suspensão (maiores que 10% em volume), foi observada uma diminuição no tempo de transito inicial, ressaltando que o valor do parâmetro ka em seu trabalho era muito menor que a unidade. No entanto, para o presente trabalho foi encontrado para a maioria das partículas um valor do parâmetro ka da ordem de 2,84. Enquanto que para os outros autores o valor deste parâmetro era inferior a um. As tendências apresentadas nas medidas experimentais foram comparadas com as tendências destes outros autores conforme mostrado na Tabela 9. Mas deve observado que estes autores não relatam medidas de incertezas em seus trabalhos.

4.3 ATENUAÇÃO EM BANDA LARGA BUA

Outra forma para se avaliar a atenuação acústica é utilizar a expressão da taxa de atenuação, também conhecida como atenuação em banda larga (“Broadband Ultrasound Attenuation” - BUA). A atenuação em banda larga é aplicada ao diagnóstico ultrassônico em áreas médicas, mais especificamente, no diagnóstico de osteoporose, Maia (2011).

Para se determinar a BUA é feita uma comparação entre o espectro de um sinal de referência (por exemplo, a água monofásica) com o espectro do sinal adquirido de um escoamento multifásico estudado. Matematicamente, a comparação é feita através da subtração dos espectros de ambos os sinais. E no espectro resultante, existe uma faixa de frequência onde a relação com a atenuação é aproximadamente linear.

É possível que fases (líquidos, sólidos, gases) com diferentes características que estejam misturadas em um escoamento, apresentem um mesmo valor da BUA. Porém as análises da atenuação acústica em uma dada frequência dessas fases do escoamento certamente apresentarão valores diferentes.

Tanahashi et.al (2010) e Maia (2001), atribuem a atenuação acústica sofrida pelo pulso ultrassônico ao se propagar em um meio físico à vários fatores, tais como:

- a. Divergência do feixe do pulso ultrassônico em relação ao seu eixo central;
- b. Espalhamento do feixe acústico devido a não homogeneidade do meio;
- c. Conversão das ondas ultrassônicas em outros modos de vibração, resultando na divisão da energia em duas ou mais ondas, ou seja, as ondas ultrassônicas propagando-se com velocidades e sentidos diferentes;
- d. Absorção da energia acústica pelo meio, sendo que parte da energia é convertida em calor, principalmente devido às forças de atrito que agem em oposição ao movimento das partículas.

Atenuação em banda larga (BUA) é um modo de medir a atenuação acústica do sinal em uma determinada faixa de frequência. Para cada meio ou sistema analisado existe uma faixa ótima para se determinar este método. A determinação da BUA é feita comparando-se o espectro de um sinal de referência (no caso a água como meio contínuo) com o espectro do sinal adquirido no meio desejado (o escoamento multifásico). A comparação é feita através da subtração dos espectros de ambos os sinais, conforme já mencionado.

Esta comparação é dada pela Equação (29).

$$\alpha(f) = 20 * \log_{10}(|V_{ref}(f)|) - 20 * \log_{10}(|V(f)|) \quad 23$$

O espectro que resulta desta subtração existe uma região onde a relação entre a atenuação acústica e a frequência é aproximadamente linear. Por meio de uma regressão

linear Equação (30), é possível calcular um coeficiente angular da reta "A". Sendo este coeficiente a representação numérica BUA.

O valor do coeficiente angular da reta "A" ou simplesmente BUA é dado em (dB/Hz).

$$y(\alpha(f)) = A * \alpha(f) + B \quad 24$$

O cálculo da Atenuação em Banda Larga utiliza-se o modo de transmissão direta, ou seja, sinais referentes ao sensor e 180°. Desta forma, a distância entre o emissor e o receptor também passa ser considerado um fator de interferência no sinal ultrassônico.

Para corrigir este efeito, divide-se o coeficiente da reta "A" obtido na Equação (30) pela distância entre os transdutores, ou seja, 54 mm referente a tubulação de acrílico. Este novo parâmetro obtido pela divisão pela distância dos transdutores é denominado como Atenuação em Banda Larga normalizada ou apenas nBUA dada em [dB/Hz. m].

A utilização da técnica de atenuação em banda larga foi aplicada no presente trabalho tanto para o escoamento bifásico (sólido-líquido) quanto para o escoamento trifásico (sólido-líquido-gás). O meio de referência foi o escoamento monofásico, somente água.

Os outros pulsos de comparação foram os pulsos ultrassônicos das concentrações testadas tanto no bifásico quanto no trifásico.

A Figura 29 mostra os pulsos médios de algumas concentrações para o escoamento bifásico. Nota-se que o comportamento dos sinais ultrassônicos é proporcional a variação da concentração de micro-esferas de vidro.

Já a Figura 30, representa os pulsos médios das variações de concentração da suspensão de micro-esferas de vidro mais a fase gasosa ar, ou seja, do escoamento trifásico. O comportamento dos sinais ultrassônicos é proporcional a variação da concentração de micro-esferas de vidro e a presença da fração de vazio.

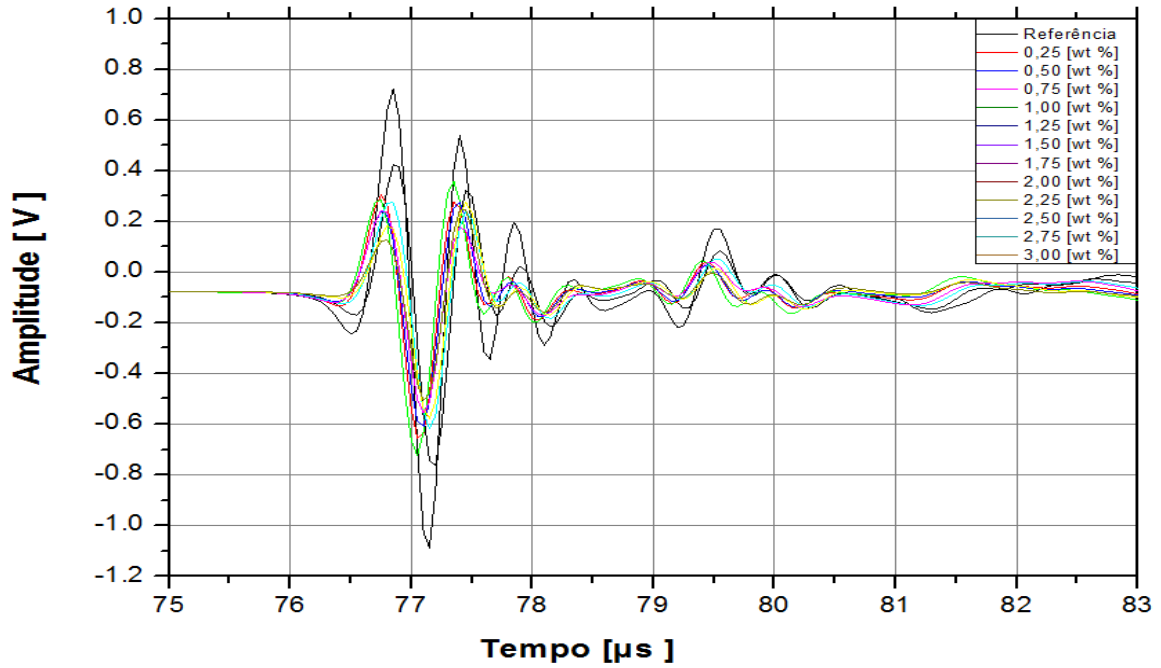


Figura 29: Atenuação de alguns pulsos em função da concentração (Bifásico 180°).

Para as fases dispersas mais altas, a diferença da atenuação entre as mesmas passa a ser menos expressiva. As atenuações acústicas observadas na Figura 29 e na Figura 30, são referentes ao pulso ultrassônico no domínio do tempo. Estas atenuações acústicas também são facilmente observadas no domínio da frequência.

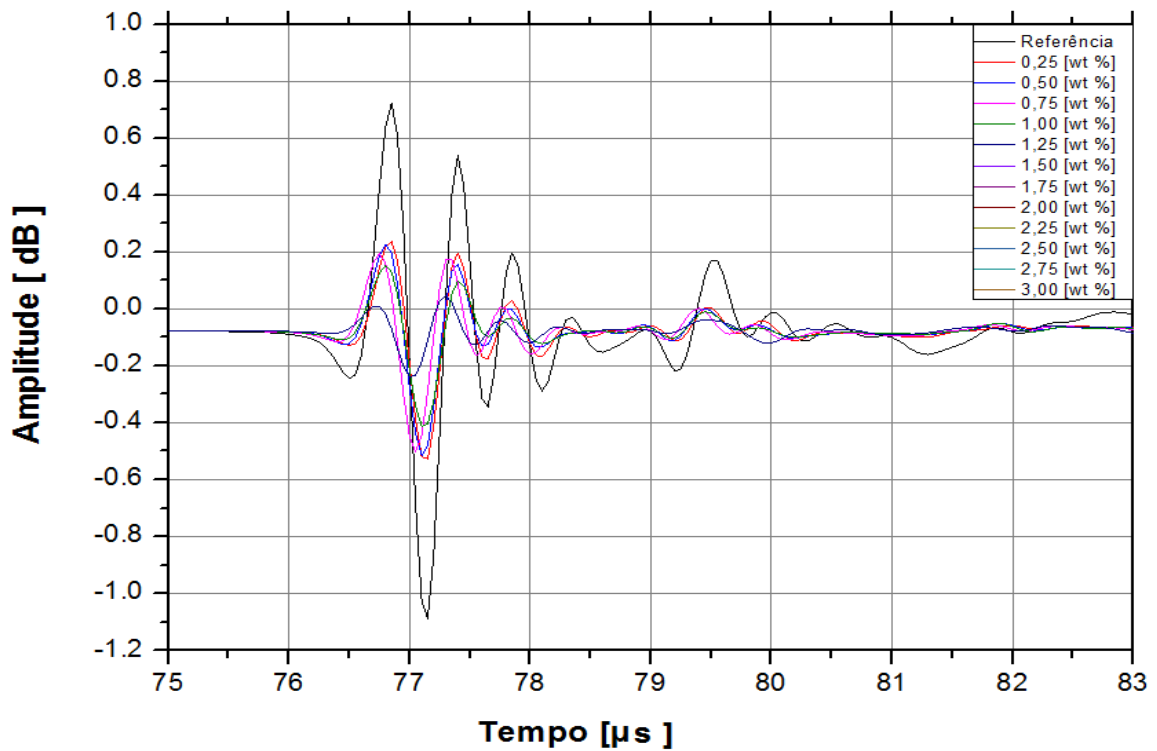


Figura 30: Atenuação de alguns pulsos em função da concentração (Trifásico 180°).

Utilizando a Transformada de Fourier como ferramenta, é possível analisar o espectro do sinal e ver seu comportamento conforme a Figura 31, onde este espectro é referente ao pulso ultrassônico do escoamento bifásico apresentado na Figura 29.

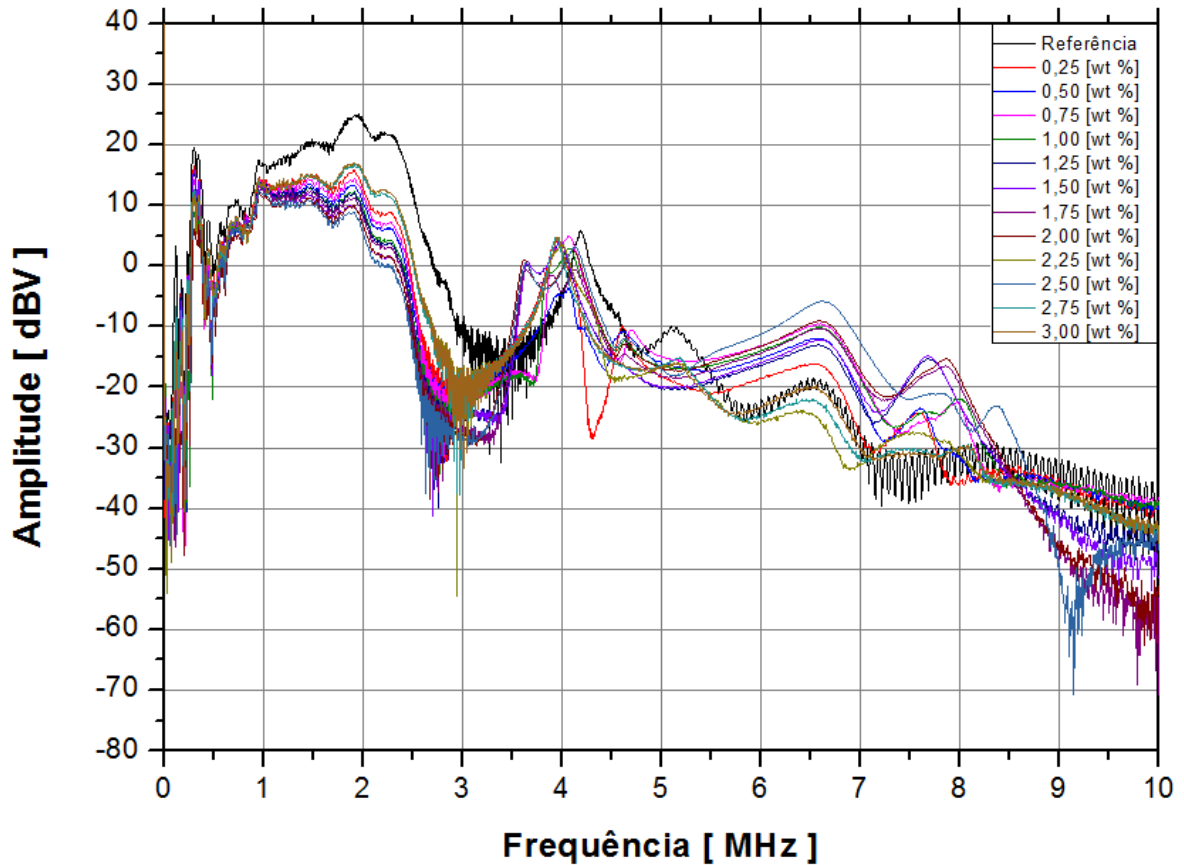


Figura 31: Espectro de frequência das médias de todas as concentrações (Bifásico 180°).

É possível observar que tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, o sinal referente à referência (escoamento monofásico água), se apresenta em valores bem mais altos, e com o acréscimo das micro-esferas de vidro na suspensão os demais sinais vão sendo atenuados gradativamente. À medida que a concentração da fase dispersa aumenta, a atenuação nos pulsos passa a ser menor. Para o escoamento trifásico é observado o mesmo comportamento tanto no domínio do tempo apresentado na Figura 30, quanto para o espectro do sinal mostrado na Figura 32.

Comparativamente a atenuação apresentada pelo escoamento trifásico é bem mais acentuada que a atenuação apresentada no escoamento bifásico. Isto se deve ao fato da maior dispersão e reflexões causadas pelas bolhas de ar presente no escoamento trifásico.

Outra observação é que a presença de bolhas de ar no escoamento trifásico causou mais variações no comportamento dos espectros no escoamento trifásico do que no bifásico.

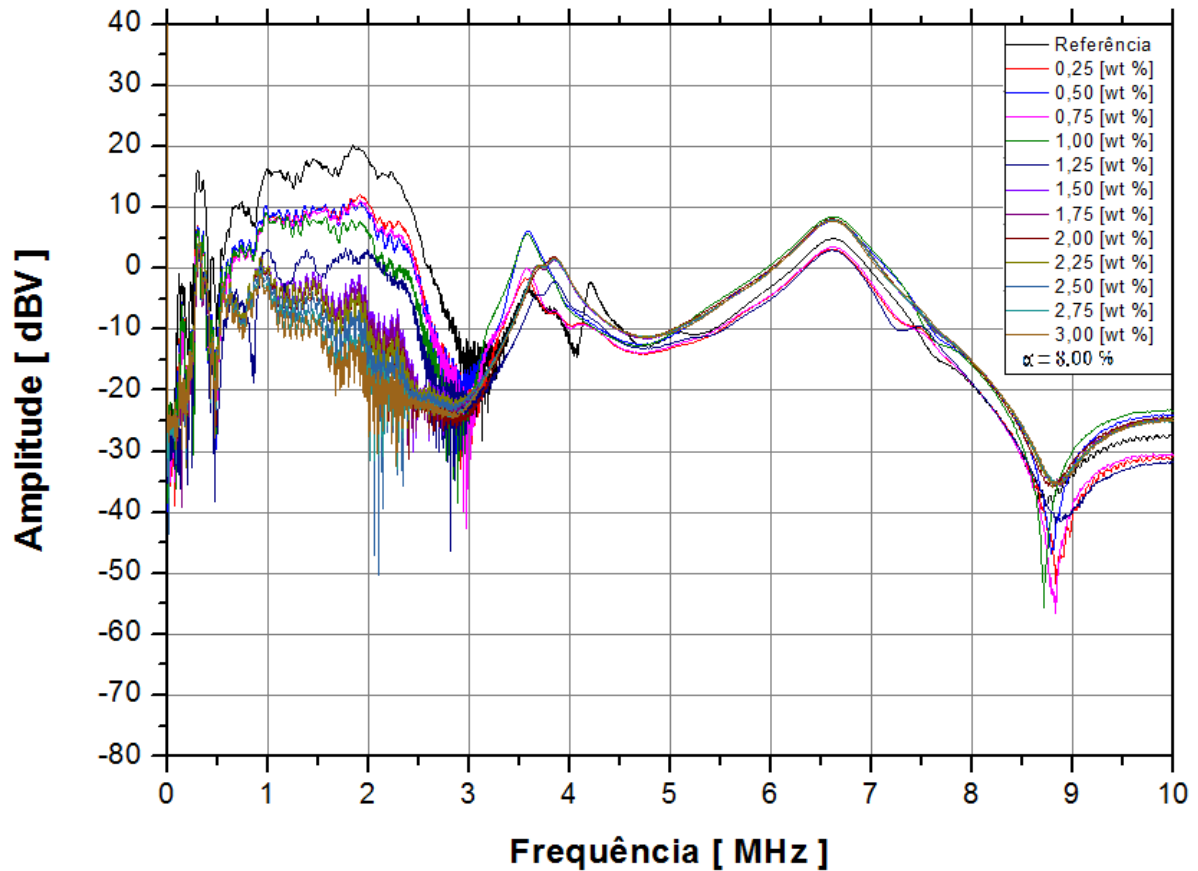


Figura 32: Espectro de frequência das médias de todas as concentrações (Trifásico 180°).

Estas variações foram observadas na Figura 31 e na Figura 32, entre as frequências de 1 a 2,5 MHz. No escoamento bifásico, os espectros tem menos variações nesta faixa, diferentemente dos espectros no escoamento trifásico, que exibem bem mais variações e oscilações no espectro para esta faixa de frequência de 1 a 2,5 MHz.

Para melhor exemplificar variações nos espectros, foi feito o mesmo procedimento anterior, retirando algumas concentrações e observando apenas entre as frequências de 2 até 2,4 MHz, faixas essas que representam bem os efeitos associados ao sensor e compreendem sua faixa de atuação, conforme Figura 33.

A região detalhada exhibe uma das faixas de frequência onde os espectros dos sinais apresentam uma melhor linearidade.

Esta região também abrange a frequência dos sensores (2,25MHz) utilizados para obtenção dos pulsos. A Figura 33, representa a região com melhor linearidade para o escoamento bifásico.

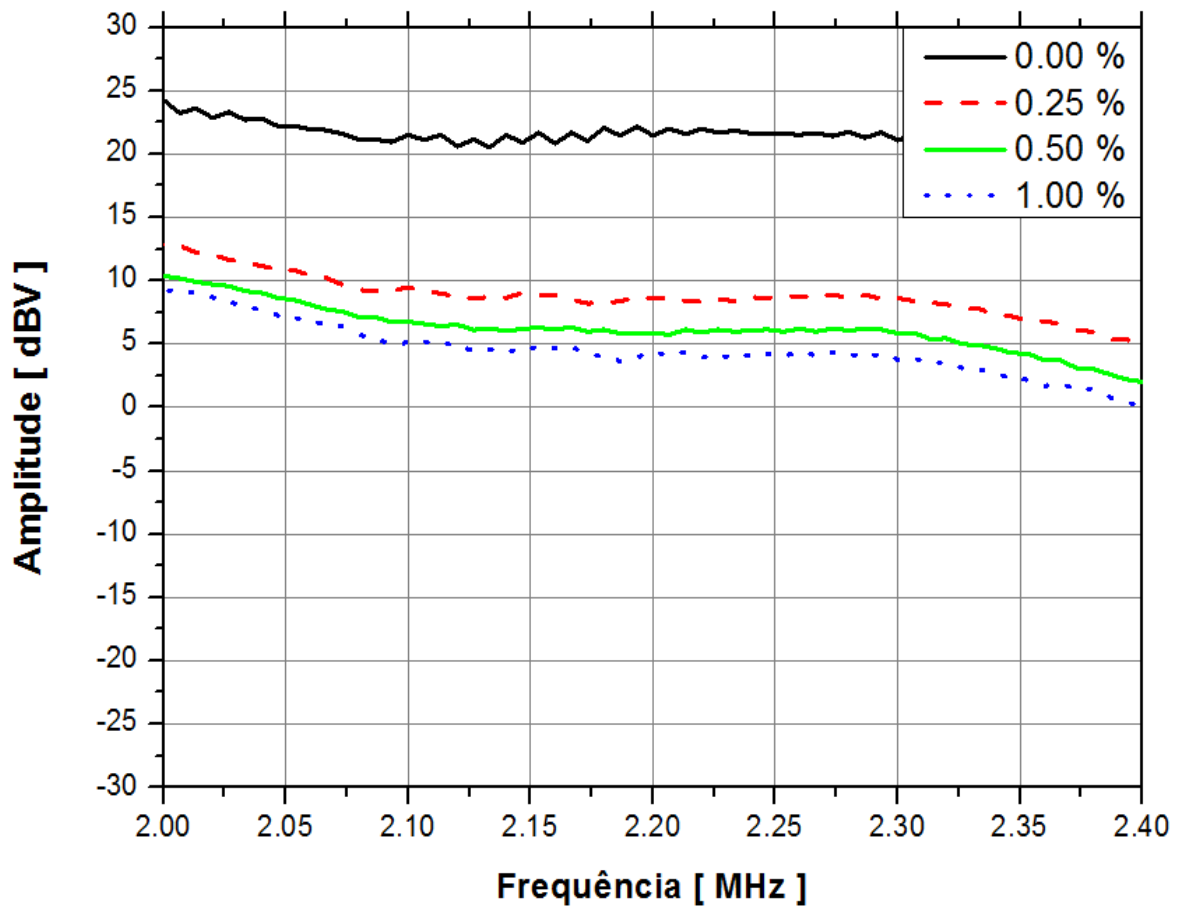


Figura 33: Detalhamento do espectro para quatro concentrações diferentes (Bifásico 180°)

Esta mesma região, também foi detalhada na Figura 34. Neste detalhamento ficam evidentes as variações causadas no espectro pelas bolhas de ar.

O espectro do sinal nesta região no trifásico (Figura 34) apresenta mais variações/oscilações do que na região respectiva do escoamento bifásico (Figura 33).

Estas variações presentes nas Figura 33 e Figura 34, além de mostrar as perturbações (reflexões, refrações, etc.) causadas pela presença de ar no espectro do sinal, também corroboram com o comportamento de atenuação acústica apresentados pelas razões de energia em função das concentrações e a fração de vazio. Inicialmente, o espalhamento da energia é mais uniforme conforme as fases dispersas aumentam.

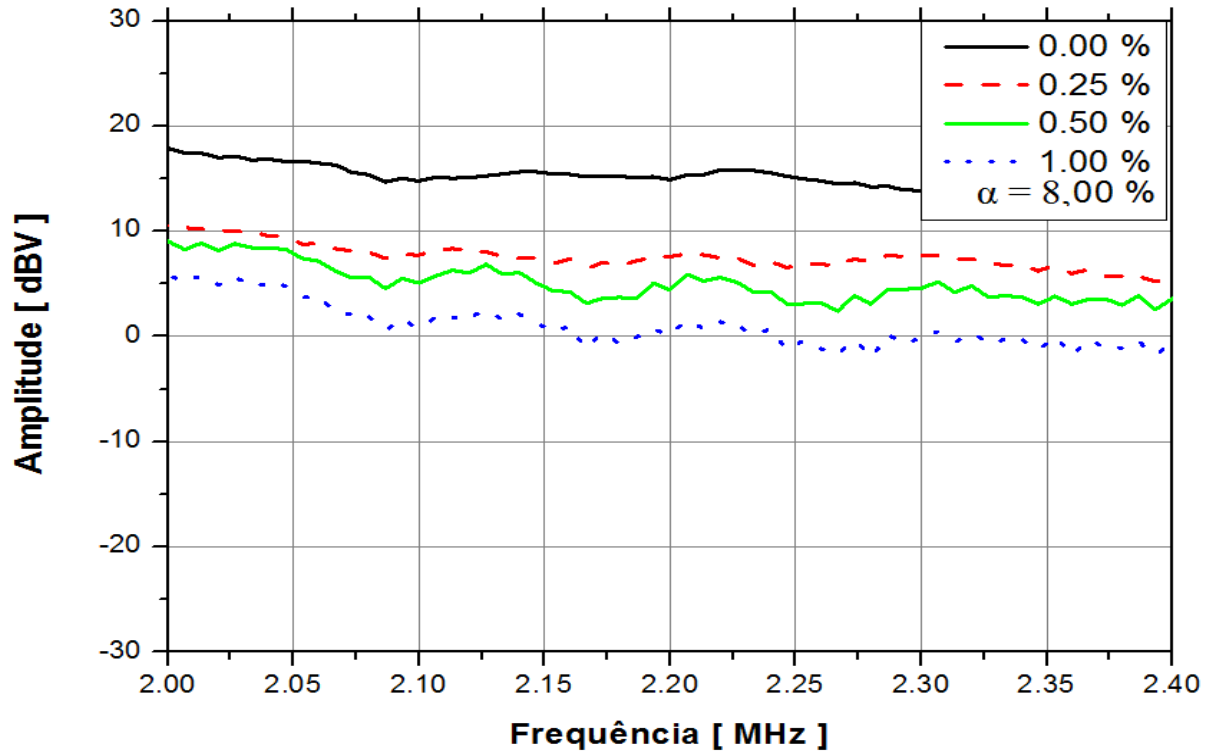


Figura 34: Detalhamento do espectro para quatro concentrações diferentes (Trifásico 180°)

A faixa de frequência escolhida para o cálculo da BUA foi de 1,00 a 2,5 MHz. Esta região como verificado apresentam uma região aproximadamente linear como vista no detalhamento, e também abrange a frequência dos sensores ultrassônicos utilizados.

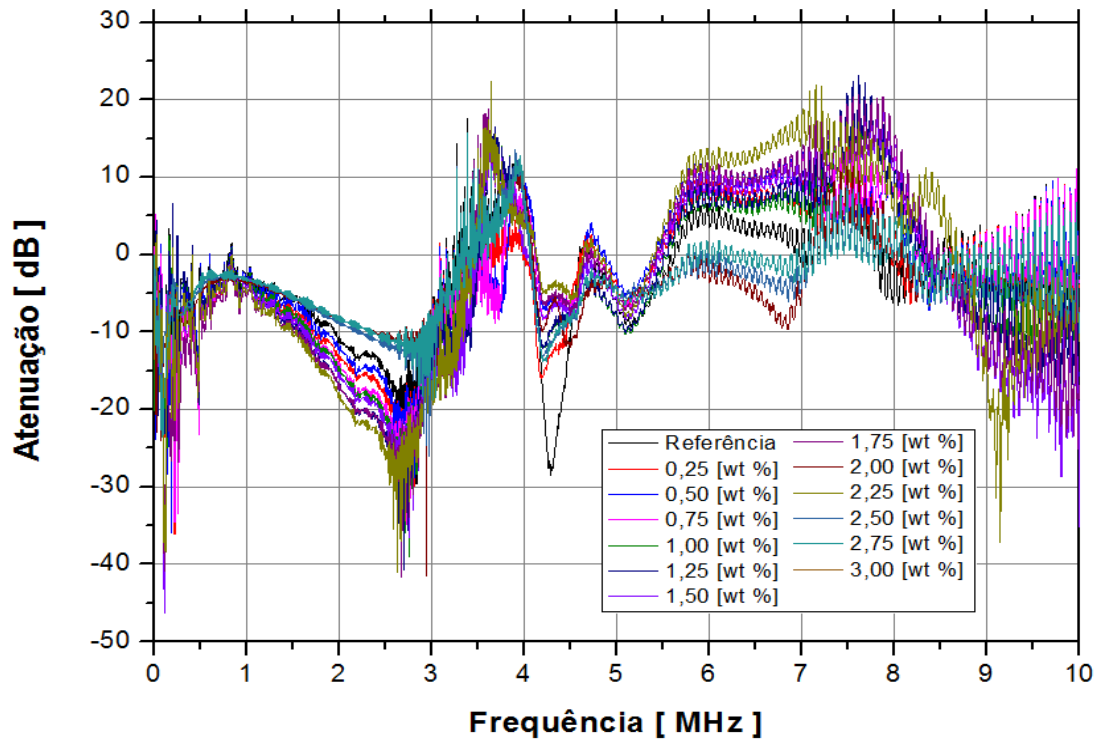


Figura 35: Atenuação em banda larga (Bifásico 180°)

Na Figura 35, é apresentada a BUA, para o escoamento bifásico. Mais uma vez, o comportamento da atenuação é muito similar àquela dos gráficos já apresentados nesta seção.

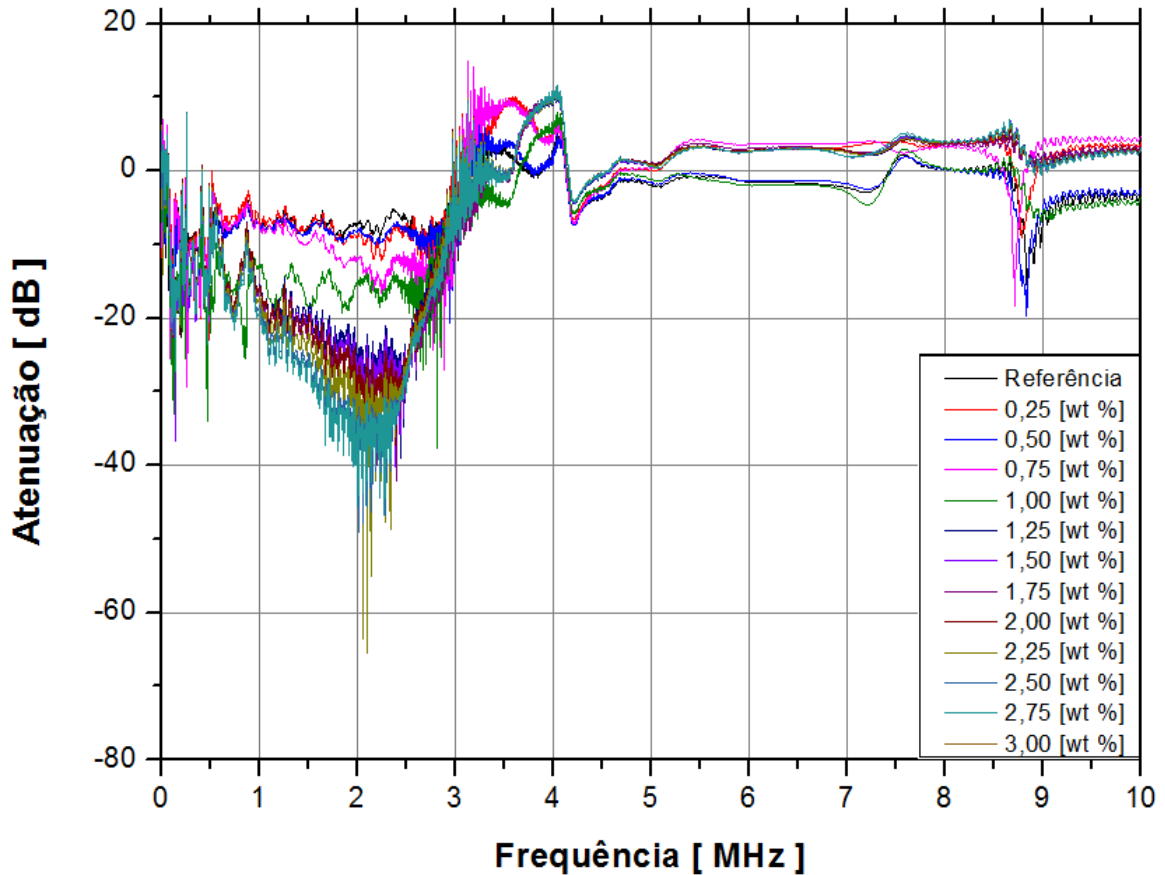


Figura 36: Atenuação em banda larga (Trifásico 180°)

Na Figura 36, é apresentada a BUA, para o escoamento trifásico. Mostra claramente um comportamento atenuante do escoamento trifásico e bem maior que o apresentado no escoamento bifásico.

Para a região onde foi aplicado a BUA novamente as variações são fortemente visíveis, quando comparado o escoamento trifásico com o bifásico. É possível observar também que no escoamento bifásico (Figura 35), para a faixa de frequência onde foram aplicados a BUA (1,00 a 2,5 MHz), os espectros tem um comportamento de queda ao longo das frequências.

Já para o escoamento trifásico (Figura 36) para a mesma região os espectros apesar das grandes variações têm um comportamento mais linear ao longo das frequências.

Este comportamento de queda e/ou linearidade apresentados na Figura 35 e na Figura 36 são certamente conferidos as distorções causadas pela presença de ar.

Conseqüentemente pode-se afirmar que as presenças de bolhas de ar no escoamento trifásico causaram essas variações nos espectros dentro desta dada região de frequência (1,00 a 2,5 MHz).

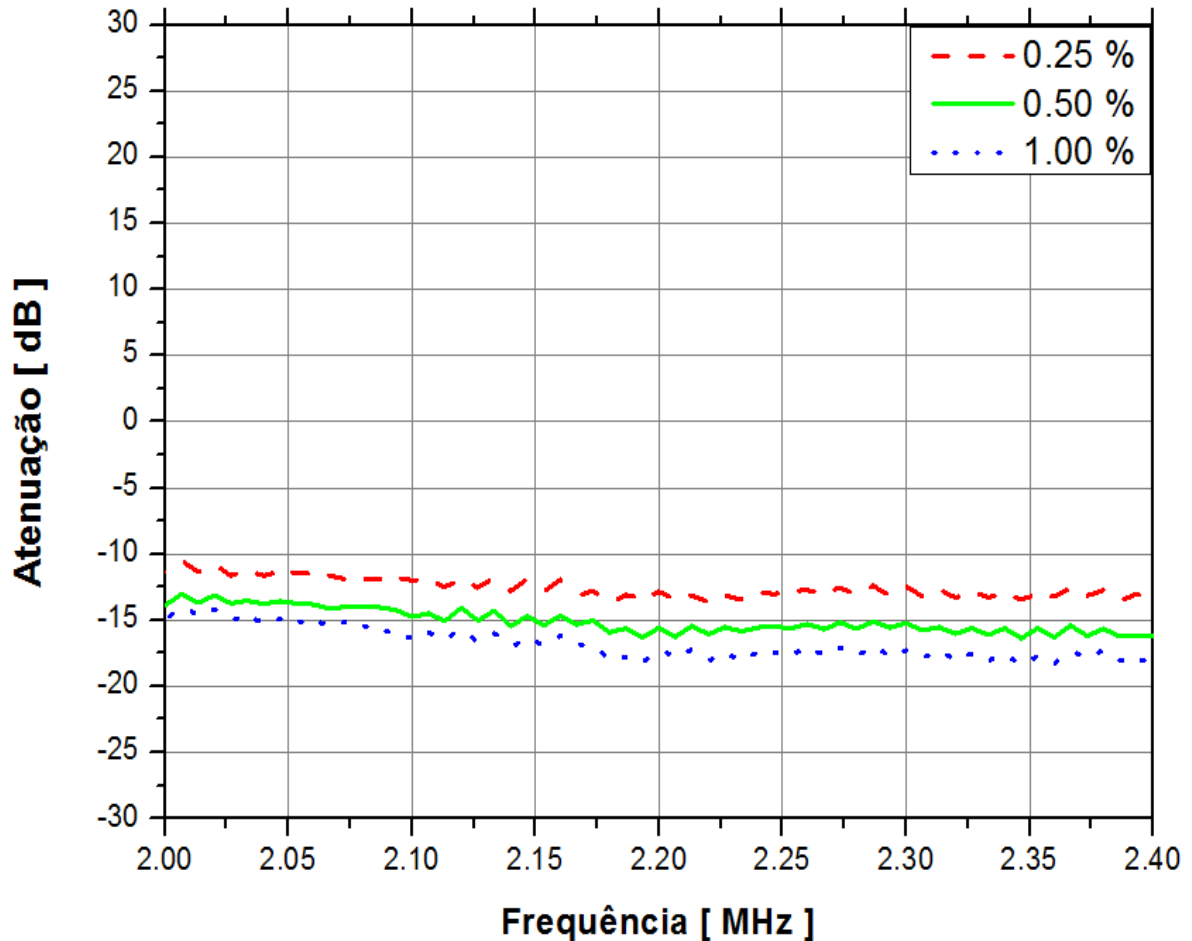


Figura 37: Região de atenuação quase linear para algumas concentrações (Bifásico 180°).

Além de que a presença da fase gasosa (devido ao espalhamento do feixe acústico, reflexão, refração, etc., causadas pelas bolhas) pode ter alterado o comportamento do espectro da suspensão, deixando o espectro linear ao longo das frequências.

Além das perturbações causadas, a atenuação apresentada pelo escoamento trifásico é bem mais acentuada que no escoamento bifásico, conforme já verificado anteriormente.

Estas atenuações também podem ser evidenciadas no detalhamento que inserido entre as frequências de 1 a 2,5 MHz, conforme a Figura 37.

Na Figura 37, devido ao alto número de variações do sinal e as grandes sobreposições dos sinais, que dificultam a visualização, apenas algumas concentrações foram utilizadas para

exemplificar. Verifica-se que para essa dada faixa de frequência o escoamento bifásico, tende a um comportamento linear ao longo das frequências.

Também pode ser visto que mesmo com a aplicação da BUA, a atenuação da concentração mais baixa cai gradativamente com o acréscimo da concentração da suspensão.

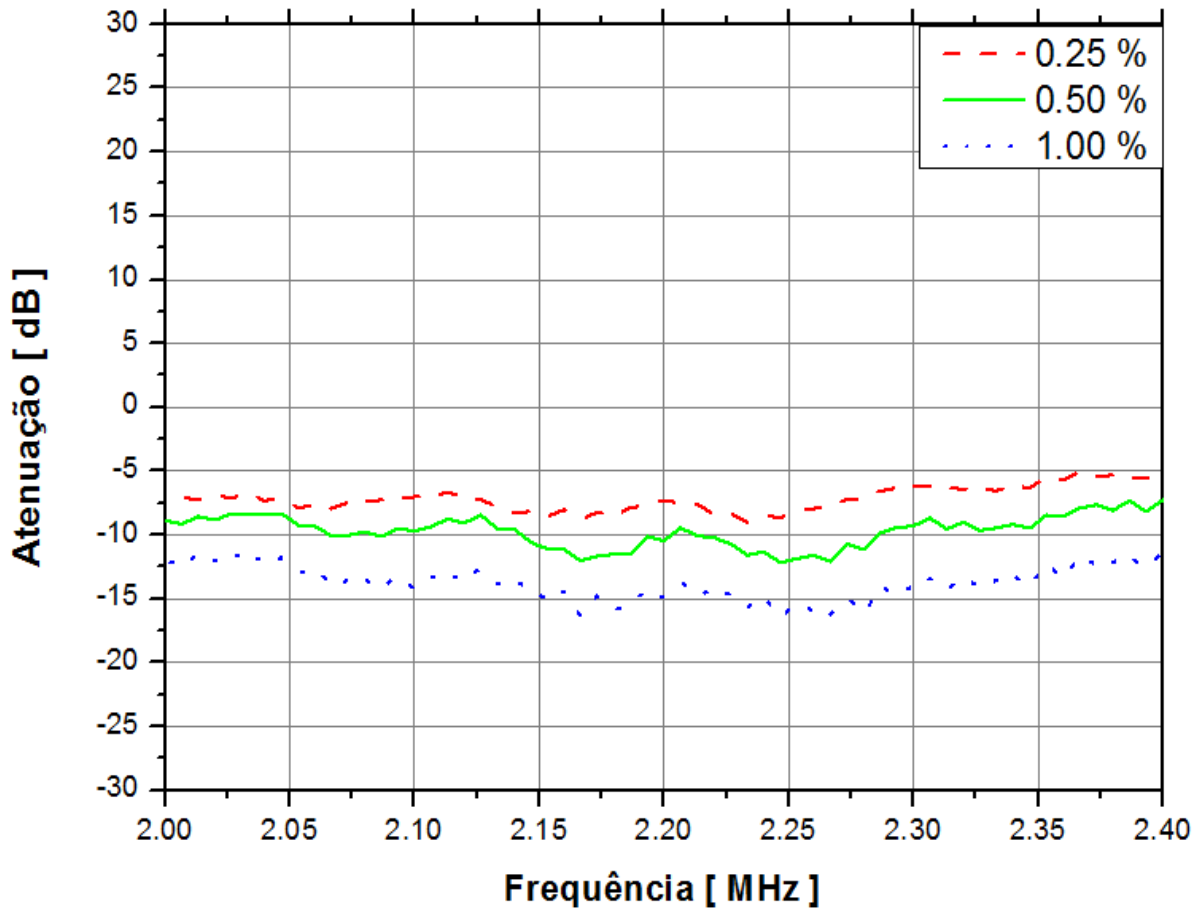


Figura 38: Região de Atenuação quase linear para algumas concentrações (Trifásico 180°)

A Figura 38, apresenta novamente a atenuação pela BUA gradual com o aumento da concentração de micro-esferas de vidro na suspensão.

Exibe também o comportamento mais oscilante do espectro nessa dada região de frequência, que comprova novamente os distúrbios causados pelas bolhas de ar no escoamento trifásico.

Outra forma de avaliar o escoamento é utilizar a nBUA, ou seja, a BUA normalizada, para isso foram calculados os coeficientes para a nBUA utilizando-se a regressão linear. Estes coeficientes estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Valores de nBUA para o Bifásico e Trifásico

Concentração [%]	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
nBua Bifásico [x10 ⁻⁶ dB/Hz.m]	-1,221	-1,427	-1,081	-1,428	-1,944	-2,261	-1,941	-2,098	-0,704	-2,399	-0,792	-0,615
nBua Trifásico [x10 ⁻⁶ dB/Hz.m]	1,512	0,542	1,512	0,427	-1,843	-4,113	-4,285	-4,300	-4,358	-4,584	-5,187	-5,276

Graficamente (Figura 39) é possível observar que, conforme aumenta a concentração de sólidos no escoamento bifásico, a nBUA tende a um comportamento parabólico constante. Para o escoamento trifásico o aumento gradativo de micro-esferas de vidro provoca uma queda exponencial deste coeficiente.

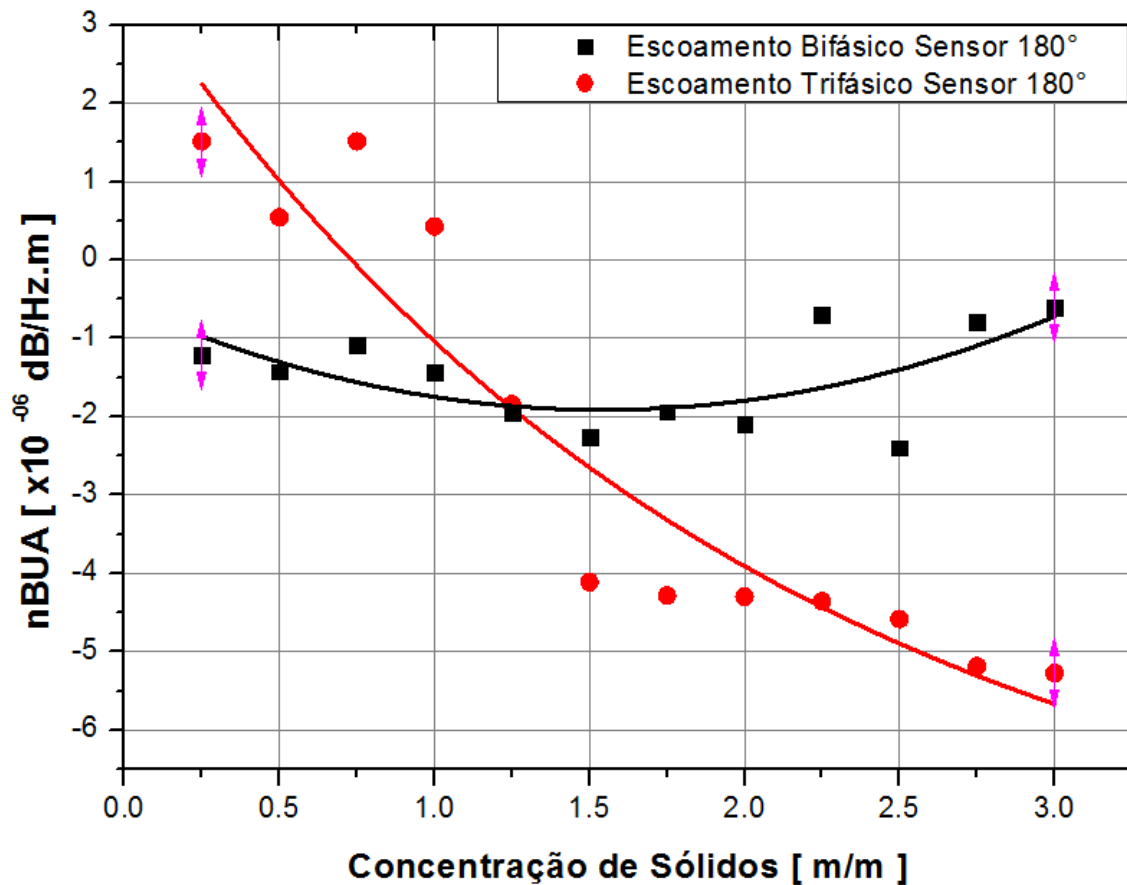


Figura 39: nBua em função da concentração de sólidos para os dois escoamentos.

Nota-se que no escoamento bifásico, de um comportamento parabólico, com uma variação entre o intervalo de -2,5 a -0,5 [x10⁻⁶dB/Hz.m].

Objetivamente teve pouca variação ao longo da faixa de concentração testada. Enquanto que para o escoamento trifásico a queda é rápida com o acréscimo das partículas. Nota-se que esse crescimento é bem expressivo com o aumento da fase dispersa.

Por fim, a BUA se mostra capaz de identificar as variações das fases dispersas bem mais expressiva no escoamento trifásico do que no bifásico. A atenuação em banda larga representa, assim, uma ferramenta adicional para caracterização de escoamentos bifásicos e trifásicos.

Mas por si só esta técnica não permite conclusões definitivas sobre a estrutura do escoamento e o valor das fases dispersas, sejam elas partículas sólidas ou frações de vazío.

Capítulo 5

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo utilizar técnicas ultrassônicas em um circuito de teste de escoamento multifásicos, focado em escoamentos do tipo líquido-sólido e líquido-sólido-gás, o qual permitiu a aquisição e o tratamento de dados experimentais.

Desta forma a seleção de uma boa instrumentação ultra-sônica foi levada em conta, para medição de fases dispersas nos escoamentos multifásicos. Esta instrumentação ultra-sônica se mostrou eficaz e com bons resultados.

As mudanças no tempo de trânsito ou na atenuação acústicas dos pulsos ultrassônicos, além de relacionados com as fases dispersas (micro-esferas de vidro e bolhas de ar) são dependentes também das dimensões das partículas sólidas e bolhas de ar. Por fim, mas não menos importante da fase contínua, da faixa de concentração e da resolução necessária.

Estes escoamentos multifásicos estudados são representativos daqueles que ocorrem na indústria petrolífera, desta forma para a caracterização destes escoamentos foram utilizadas as técnicas ultrassônicas.

Parte do objetivo deste trabalho foi utilizar um programa computacional para a aquisição dos dados acústicos e a construção de um aparato experimental. O aparato experimental foi projetado com o intuito de promover a circulação do escoamento multifásico (bifásico ou trifásico).

A partir deste banco de teste foi possível obter dados acústicos pelo programa computacional. Este registrou todos os dados acústicos obtidos pela estação ultra-sônica (seção onde continha os quatro sensores ultrassônicos). Os dados obtidos pelo programa

computacional (rotina no Labview) forneceram todos dados suficientes para a realização de todas as análises dos parâmetros acústicos convenientes.

Outro objetivo deste trabalho, a partir destes dados acústicos obtidos da programação computacional foi a de realizar os tratamentos convenientes, ou seja, análise dos dados ultrassônicos no domínio do tempo para os escoamentos multifásicos.

Destes tratamentos e análises pode-se verificar que a atenuação acústica a partir da razão de energia média mostrou um comportamento sistemático inter-relacionado. Ou seja, para ambos os escoamentos o acréscimo de micro-esferas de areia causaram um decaimento esperado na razão de energia.

Certificando que os sensores a 180° para transmissão direta e o emissor/receptor do tipo pulso-eco a 0° são utilizados com maior facilidade em relação aos sensores a 45° e a 135° , uma vez que o sinal obtido no escoamento monofásico (fase contínua água) pode ser usado como referência. Além disso, os sinais a 0° e 180° possuem um comportamento bem mais definido dentro de uma janela de aquisição, e são mais sensíveis a variações das fases dispersas.

A filtragem do sinal ultrassônico foi efetuada para a minimização dos ruídos no pulso ultrassônico no domínio do tempo. Este tratamento do sinal permitiu identificar as regiões do pulso com altos valores de ruído e conseqüentemente retirá-los. Este procedimento de filtragem foi aplicado aos sinais recebidos de todos os receptores, diminuindo assim a influência dos ruídos na atenuação acústica.

Além das correlações entre níveis de atenuação acústica com as concentrações de micro-esferas de vidro e frações de vazio nos escoamentos multifásicos, preocupou-se com as correlações entre o tempo de trânsito da onda acústica com as variações das fases dispersas para os dois escoamentos.

A variação do tempo de trânsito inicial com a concentração de sólidos se mostrou muito dependente da distribuição do tamanho das micro-esferas de vidro e em relação ao comprimento de onda.

Para o escoamento bifásico, o tempo de trânsito forneceu um comportamento parabólico compreendidos entre 78 a 79 μs . Demonstrando pouca variação ao longo das concentrações

testadas. Confirmando também que o conhecimento prévio das dimensões dos tamanhos das partículas sólidas é um requisito importante para medições confiáveis.

Para escoamento trifásico o valor de tempo de trânsito no escoamento monofásico apresentou um valor da ordem de 79 μs , com a adição das bolhas de ar (5% de fração de vazio) este valor reduziu bruscamente para aproximadamente 76,5 μs .

Com o acréscimo das micro-esferas de vidro junto com a fração de vazio, a variação do tempo de trânsito teve pouca ou quase nenhuma variação até a concentração de 1,25%, permanecendo nesta faixa de 76,4 a 76,6 μs .

A partir da concentração da suspensão de 1,25% de micro-esferas de vidro, este valor de tempo de trânsito aumenta para aproximadamente 77,00 μs . Este valor permanece com pouca ou nenhuma variação para todas as concentrações restantes.

Desta forma, considerando o comportamento parabólico do tempo de trânsito no escoamento bifásico e o comportamento praticamente constante a partir da concentração de 0,25% da suspensão no escoamento trifásico, conforme no trabalho de (Vatanakul et. al., 2004) a presença de bolhas de ar dispersas e as fases sólidas claramente tiveram efeitos diferentes na flutuação das formas de onda acústica.

Porém a presença das bolhas de ar foi aparentemente o fator significativo que gerou altas flutuações dos sinais acústicos, especialmente os do tempo de transmissão nos escoamentos multifásicos.

Foi observada pouca penetração ultra-sônica dos pulsos gerados. Isto devido aos múltiplos espalhamentos muito intenso, que provavelmente causam atenuação do feixe acústico do sinal recebido pelo sensor oposto.

Assim sendo, os sensores laterais, 45° e 135° puderam fornecer informações úteis que em conjunto com os sensores de 0° e 180° tornam essas medidas muito mais robustas.

A escolha da forma de tratamento e interpretação dos resultados, utilizarem a razão de energia em função da concentração da fase dispersa, por exemplo, se mostrou muito mais versátil, de fácil entendimento e fácil de utilizar que as outras técnicas, tais como atenuação dos pulsos ultrassônicos ou utilização da BUA.

A pesar de que outras técnicas também serem eficazes e demonstrarem o mesmo comportamento que da razão de energia. Os resultados aqui obtidos contribuem para o entendimento da interação entre a onda ultra-sônica e os escoamentos multifásicos estudados.

Este trabalho mostra a viabilidade de utilização desta técnica ultrassônica em laboratórios para estudo da estrutura de escoamentos multifásicos. Podendo estes escoamentos ser em bateladas, contínuos ou até mesmo uma suspensão estática, onde tubos com fases contínuas recebem a fase dispersa sem a necessidade de o escoamento estar em movimento.

Fica evidente que a técnica ultra-sônica tem o potencial para detectar os padrões de escoamentos a partir de correlação cruzadas de sinais acústicos. Os padrões de escoamentos podem ser detectados a partir dos sinais de ultrassônicos e o mesmo equipamento de ultrassom pode ser utilizado para a detecção de padrões de escoamento e medidas de velocidade, por exemplo.

Após a calibração, a técnica ultra-sônica pode fornecer concentrações de partículas em uma suspensão, frações de vazio ou de qualquer fase dispersa em escoamentos bifásicos e trifásicos.

A técnica ainda está sendo testado para medições de fases dispersas do tipo líquido-líquido e do tipo trifásico líquido-líquido-gás. Existindo a possibilidade de que o mesmo aparelho de ultra-sons possa ser utilizada para detecção do padrão de escoamento, medidas de velocidade e determinação das fases dispersas sendo elas partículas sólidas, gasosas ou líquidas.

Além de correlacionar as frações das fases dispersas esse método pode ser totalmente utilizada com misturas multifásicas sem a necessidade de separação das fases.

Para tanto esta sendo desenvolvido em conjunto com este trabalho, *Development of a multiphase flow metering procedure based on the ultrasonic technique ou MFM*, que visa fornecer um método eficaz de se medir escoamentos multifásicos baseados em técnicas ultra-sônicas.

Atualmente, essas questões estão sendo tratadas como um projeto da Petrobras, para testar a técnica ultra-sônica.

5.2 SUGESTÕES

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se que a aplicação da técnica ultra-sônica seja utilizada a outros escoamentos multifásicos e em escoamentos reais da indústria petrolífera, alterando o meio contínuo por óleo e comparando-os escoamentos entre si.

Sugere-se também que esta técnica ultra-sônica seja empregada em outros tipos de tubulações com diferentes tipos de diâmetros, (que representem também as dimensões reais das indústrias petrolíferas) e com o mesmo material, ou seja, tubos de aço, por exemplo.

Um estudo avançado e mais específico em análises de sinais que possibilitem identificar as fases dispersas em um escoamento multifásico. Para assim poderem-se quantificar as estruturas dispersas, diferenciá-las e de forma rápida promover uma correlação entre os sinais dos pulsos acústicos e as concentrações das fases dispersas reconhecendo cada estrutura independentemente presentes no escoamento multifásico.

Por fim, utilizar um banco de dados e informações a respeito de estruturas e padrões de escoamentos, que forneçam dados comparativos para um sistema de rede neural.

Este sistema, seria capaz de receber as informações acústicas em tempo real, compará-las com um banco de dados, e fornecer que tipos de estruturas estão presentes no escoamento, quantificá-las, tanto em escala laboratorial quanto na própria indústria petrolífera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ali, S. F. Two phase flow in large diameter vertical riser, Thesis of Doctor of Philosophy, 2009, Cranfield University, Bedfordshire, United Kingdom.
2. 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, 20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology, pp. 1288-1293.
3. Butz, P., Tauscher, B. (2002). *Emerging Technologies: Chemical Aspects, Food Research International*, v. 35, n. (2/3), p. 279-284.
4. Carvalho, R. D. M., Venturini, O. J., França, F. A. e Neves Jr., F., Application of the ultrasonic technique and high-speed filming for the study of the structure of air–water bubbly flows, *Experimental Thermal and Fluid Science Journal*, 2009, vol. 33, pp. 1065-1086.
5. Carvalho, R. D. M., Venturini, O. J., Tanahashi, E. I, 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.
6. Cheeke, J. David N., *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, Montreal, Canada: CRC Press LLC, 2002,480 p.
7. 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.

8. 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.
9. Doron, P., Barnea, D., Flow Pattern Maps for Solid-Liquid Flow in Pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, 1996, Vol. 22, pp. 273-283.
10. 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.
11. Maia, J. M. Sistema Ultrassônico para Auxílio ao Diagnóstico da Osteoporose, Tese de Doutorado, 2001, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
12. Nascimento, E. R. F. Desenvolvimento de Modelos Neurais Para o Processamento de Sinais Acústicos Visando a Medição de Propriedades Topológicas em Escoamentos Multifásicos, Tese de Doutorado, 2007, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
13. Powell, R. L. Experimental Techniques for Multiphase Flows. *Physics of Fluids*, 2008, Vol. 20, pp. 1-20.
14. Shukla, A., Prakash, A., 2006. Ultrasonic techniques to determine particle size and concentration in slurry systems. *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp 2468-2475.
15. Silva, C. B. C., Filho, M. J. B., Pinheiro, J. A., 2000. "*Medição De Vazão E Propriedades Em Escoamento Multifásico: Solução Econômica Para Diferentes Atividades Industriais*". *Boletim Técnico PETROBRAS*, Rio Janeiro, vol. 43(1) 45-61.
16. Soong, Y., Gamwa, I. K., Blackwell, A. G., Schehl, R. R., Zaroachak, M. F., 1995. *Measurements of Solids Concentration in a Three-phase Reactor by an Ultrasonic Technique*. *The Chemical Engineering Journal*, vol. 60, pp 161-167.
17. Stearns, Samuel D., *Digital Signal Processing with Examples in MatLab*, 2003, Florida, USA, CRC Press, 360 pages, vol. 1.
18. Stolojanu, V., Prakash, A., 1997. *Hydrodynamic Measurement in a Slurry Bubble Column Using Ultrasonic Techniques*. *Chemical Engineering Science*, vol. 52, pp 4225-4230.

19. Tanahashi, E. I., *Desenvolvimento da Técnica de Ultrassom para Medição da Fração de Vazio e Concentração de Particulados em Escoamentos Multifásicos*, Dissertação de Mestrado, 2010, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG, Brasil.
20. Tanahashi, E. I., Paiva, T A, Grangeiro, F. A., Carvalho, R. D. M., Venturini, O. J., Bannwart, A. C., and Bizotto, V. C., Application Of The Ultrasonic Technique For Monitoring Intermittent Liquid-Gas Flows and Liquid-Solid Flows, 7th North American Conference on Multiphase Technology, June, 2010, Banff, Canada.
21. Ulrick, R.J., 1947. *A Sound Velocity for Determining the Compressibility of Finely Divided Substances*. Journal Of Applied Physics, vol. 18, pp 983-987.
22. Ultrasonic Transducers Technical Notes, Panametrics-Olympus, Olympus NDT, 2006, p.48.
23. Vatanakul, M., Zheng, Y., Couturier, M. Application of Ultrasonic Technique in Multiphase Flow. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2004, Vol. 43, pp. 5681-5691.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.

28. Zheng, Y., 2003. *Ultrasonic Measurement for Two/Three-phase Flow Detection.*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 81, pp 268-270.
29. 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.

Apêndice

I. Análise dos Sinais Ultrassônicos para os sensores de 0°, 45° e 135°

Como mencionado anteriormente, um sinal ultrassônico característico para os sensores a 0°, 45° e 135° não pôde ser identificado sendo assim não foi possível identificar tempo de trânsito e amplitude para estes sinais, tendo-se calculado apenas a razões de energia para estes três sensores.

Neste ponto vale a pena ressaltar, como mencionado anteriormente, cada condição é composta por 10.000 pulsos, e cada concentração é composta por seis condições. Este procedimento é viável na aquisição dos dados ultrassônicos. Por serem obtidos e gravados de forma seqüencial, e desta forma facilita a identificação dos arquivos para assim identificar qual a concentração de cada condição e facilitar o tratamento. Estes itens são visivelmente verificados, conforme pode ser visto nas Figura 40, Figura 41 e Figura 42.

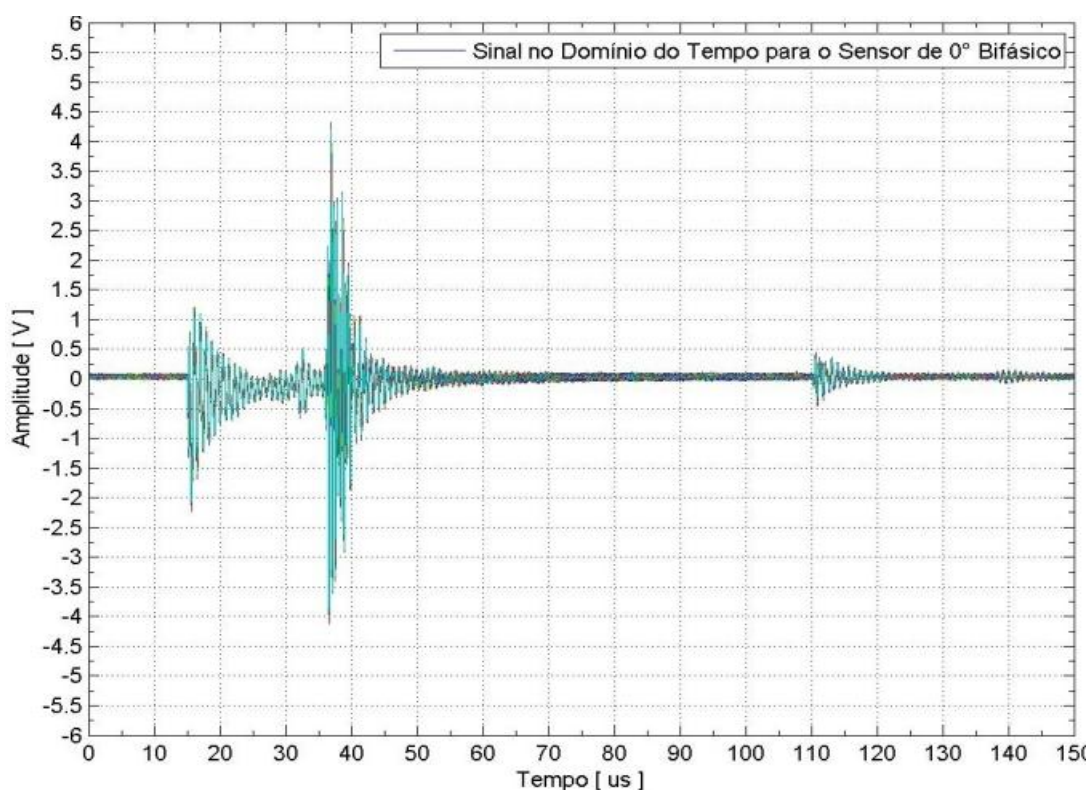


Figura 40: Sinal no Domínio do Tempo para o Sensor 0°

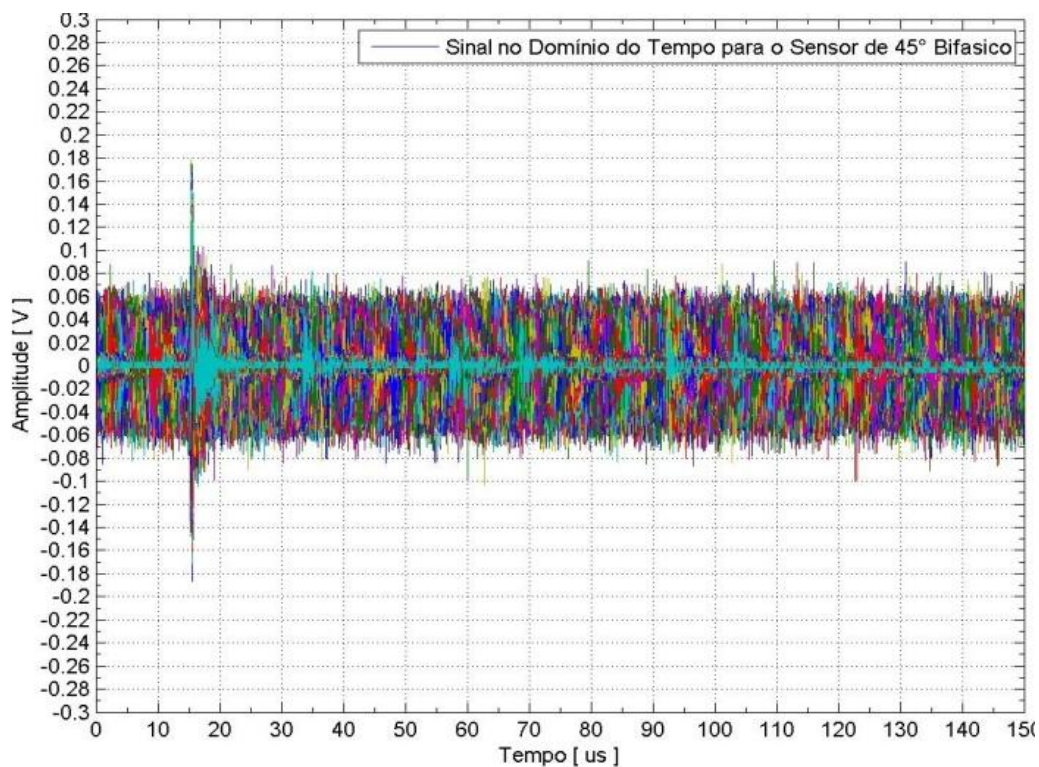


Figura 41: Sinal no Domínio do Tempo para o Sensor 45°

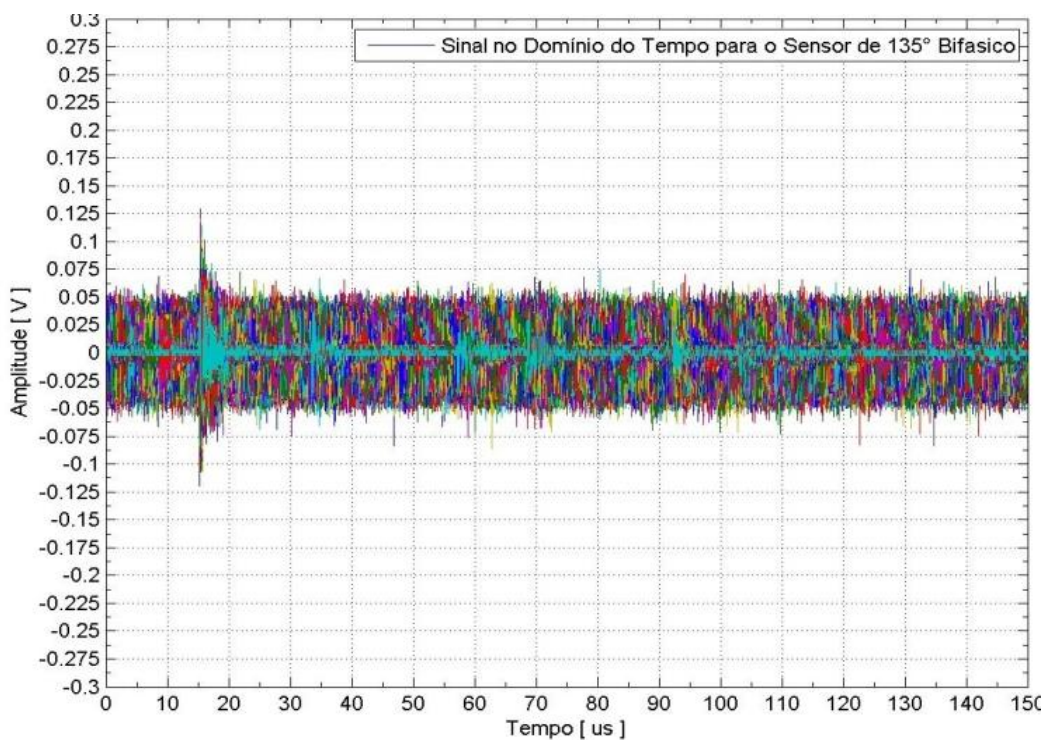


Figura 42: Sinal no Domínio do Tempo para o Sensor 135°

Todos os 10.000 pulsos adquiridos em cada condição foram sobrepostos, e desta forma pode-se notar que todos os pulsos individuais diferem uns dos outros dentro da mesma condição. 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.

Entretanto, ainda existem regiões onde os pulsos concordam fielmente entre si. Essa concordância fica mais bem evidenciada no sinal de 180°, diferentemente dos sinais conforme a Figura 40, Figura 41 e Figura 42.

A região de atividade, ou seja, a região afetada pelo escoamento se encontra na parte conturbada 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 do sinal. O cálculo da energia recebida por esses sensores foi feito utilizando somente o intervalo de tempo da região de atividade, assim delimitada.

II. CÁLCULO DA PROPAGAÇÃO DO ERRO

Neste apêndice será mostrado o cálculo realizado para obtenção do erro das medidas indiretas (*limite máximo de erro*) proveniente do erro gerado pelos instrumentos de medição (medidas direta) do aparato experimental.

E para isso utilizou se as medidas diretas da massa total de água e a massa total de micro esferas de areia, representando o valor de maior concentração, ou seja, 3,00 %.

$$m_{\text{sólido}} = 45(\text{kg})$$

$$m_{\text{água}} = 1500(\text{kg})$$

a) DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

As descrições dos instrumentos utilizados para a medição vazão é apresentados abaixo.

Medidor de vazão:

- Marca: METROVAL - RHM 12 - 3FS1PN

- Tipo CORIOLIS, série M1660507, modelo RHM, alimentação 85/250 VAC

-Fluido: Água

- Faixa de medição: 5 – 100 kg/min.

-Incerteza $\pm 0,15$ Kg/min.

Balança Eletrônica Microprocessadora Digital:

- Marca: DIGIMED

- Tipo DIGITAL, modelo KN-60, alimentação 90/240 VCA

- Faixa de medição: 0 – 60kg

-Incerteza $\pm 0,001$ kg

b) ERRO

A equação utilizada para obtenção da concentração de sólidos do experimento foi:

$$C = \frac{m_{\text{sólido}}}{m_{\text{sólido}} + m_{\text{água}}} (\%) \quad (1)$$

Para obter o erro máximo provável da concentração de sólidos realizou-se a derivada parcial da Equação C.1 em função de cada variável (medida direta):

$$\Delta C = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial C}{\partial m_{\text{sólidos}}} \right)^2 \cdot (\Delta m_{\text{balança}})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial m_{\text{água}}} \right)^2 \cdot (\Delta T_{\text{CORIOLLIS}})^2 \right]} \quad (2)$$

$$\Delta C = \sqrt{\left[\left[\left(\frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{sólido}} + m_{\text{água}}} \right) \cdot (\Delta m_{\text{balança}}) \right]^2 + \left[\left(\frac{-m_{\text{sólido}}}{m_{\text{sólido}} + m_{\text{água}}} \right) \cdot (\Delta m_{\text{CORIOLLIS}}) \right]^2 \right]} \quad (3)$$

$$\Delta C = \sqrt{\left[\left[\left(\frac{1500}{45 + 1500} \right) \cdot (0,001) \right]^2 + \left[\left(\frac{-45}{45 + 1500} \right) \cdot 0,15 \right]^2 \right]} \quad (4)$$

$$\Delta C = 4,476 \cdot 10^{-3} = 0,00448(\text{kg})$$

Onde:

ΔC - Erro médio máximo da concentração do experimento;

$\Delta m_{\text{balança}}$ - Erro da medida associada a balança analítica;

$\Delta m_{\text{CORIOLLIS}}$ - Erro da medida associado ao medidor de vazão d'água;

$m_{\text{sólido}}$ - Massa das partículas (micro esferas de vidro);

$m_{\text{água}}$ - Massa da água presente no reservatório;