UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

JOÃO PAULO DRUZINA MASSIGNAN

MÉTODOS DE ANÁLISE DE SINAIS DE ULTRA-SOM PARA CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2009

JOÃO PAULO DRUZINA MASSIGNAN

MÉTODOS DE ANÁLISE DE SINAIS DE ULTRA-SOM PARA CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de "Mestre em Ciências" – Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Jr.

CURITIBA

2009

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

M417m Massignan, João Paulo Druzina

Métodos de análise de sinais de ultra-som para caracterização de escoamentos bifásicos / João Paulo Druzina Massignan. – 2009.

93 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Flávio Neves Jr.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Informática Industrial, Curitiba, 2009

Bibliografia: f. 90-3

1. Ultra-som. 2. Escoamento bifásico. 3. Dinâmica dos fluídos. 4. Processamento de sinais. 5. Informática Industrial. I. Neves Junior, Flávio, 1963-, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Informática Industrial. III. Título.

CDD 621.3

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

Título da Dissertação Nº 512:

"Métodos de Análise de Sinais de Ultra-Som para Caracterização de Escoamentos Bifásicos"

por

João Paulo Druzina Massignan

Esta dissertação foi apresentada, às 15h do dia 16 de novembro de 2009, como requisito parcial para a obtenção de grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Informática Industrial, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI –, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Dr. Flávio Neves Junior
(Orientador - UTFPR)

Profª. Dr. Lúcia Valéria Ramos de Arruda
(UTFPR)

Prof. Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho
(UNIFEI)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Humberto Remígio Gamba
(Coordenador do CPGEI)

Av. Sete de Setembro, 3165 - 80230-901 - Curitiba – PR.
Tel. +55 (41) 3310 4680 / e-mail: cpgei-ct@utfpr.edu.br / http://www.cpgei.ct.utfpr.edu.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos nossos familiares e colegas de república pela compreensão e apoio durante todo o período. Agradeço aos colegas Msc. Rafael José Daciuk e Eng. Milton Yukio Nishida por sempre estarem dispostos a ajudar nos diversos momentos deste trabalho.

Agradeço o auxílio e a orientação que recebi do orientador Prof. Dr. Flávio Neves Jr e especial agradecimento à Profa. Dra. Lucia Valéria Ramos de Arruda pela ajuda durante este período.

Também agradeço aos seguintes professores da UNICAMP e UNIFEI: Dr. Fernando de Almeida França e Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho pelo auxílio na obtenção dos dados experimentais no LABPETRO na UNICAMP.

Agradeço também aos demais colegas do Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado (LASCA) da UTFPR pela amizade e ajuda.

O autor agradece o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, e o da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do Projeto CAMITATIBA (Técnicas Ultra-Sônicas para Medição de Fração de Vazio e Concentração de Particulados em Escoamento Multifásicos) e do Programa de Formação de Recursos Humanos para o setor de Petróleo e Gás (PRH10 - UTFPR).

RESUMO

MASSIGNAN, João Paulo Druzina. Métodos de análise de sinais de ultra-som para caracterização de escoamentos bifásicos. 93 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

Este trabalho apresenta um estudo sobre parâmetros do sinal de ultra-som que são afetados pelo escoamento bifásico água-ar, muito comuns em diversos processos industriais. Foi utilizado um par de transdutores no modo transmissão-recepção em um duto de acrílico com 54 mm de diâmetro interno. As técnicas utilizadas na análise do sinal foram a medição da velocidade do som por diversos métodos, a análise da energia e da amplitude máxima. Também é proposto o uso da atenuação em banda larga do ultra-som, uma técnica muito comum e utilizada no diagnóstico médico da osteoporose, mas pouco utilizada na indústria. Outra proposta foi utilizar o primeiro vale da onda de ultra-som recebida para normalização do sinal, evitando a necessidade de um sinal referência para a determinação da fração de vazios. É apresentada a metodologia teórica e os resultados dos experimentos que foram realizados em um circuito bifásico instalado no LABPETRO/UNICAMP. O *hardware* e *software* do sistema de aquisição de dados foram desenvolvidos no LASCA/UTFPR.

Palavras-chave: ultra-som, escoamento bifásico, medição de fração de vazios, processamento de sinais

ABSTRACT

MASSIGNAN, João Paulo Druzina. Ultrasound signal analysis methods for carachterization of two phase flow. 93 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

This work presents a study of ultrasound signal parameters that are affected by two-phase flow water-air present in several industrial process. A pair of ultrasound transducers in transmission-reception mode has been installed in a 54 mm inner diameter plexiglass pipe. Velocity measurement is calculated by many methods and also energy and maximum amplitude analysis was applied. Additionally, it is proposed a broadband ultrasound attenuation (BUA) based method to measure the void fraction. BUA is a very common method used to diagnoses osteoporosis but underused in industry. Other method based on a signal normalization by the first valley is developed to avoid the use of a reference signal to calibrate the prototype. Theoretical methods and experimental results are described. The results were obtained in a two phase circuit situated in LABPETRO/UNICAMP. The hardware and software of acquisition system were developed in LASCA/UTFPR.

Keywords: ultrasound, two-phase flow, void fraction measurement, signal processing

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY 18
FIGURA 2 – MONTAGEM EXPERIMENTAL - ERT 20
FIGURA 3 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO - ERT 20
FIGURA 4 – PROTÓTIPO INDUSTRIAL 21
FIGURA 5 – DESVIO DE FREQ. EM RELAÇÃO A FRAÇÃO DE VAZIOS 22
FIGURA 6 – DIAGRAMA EM BLOCOS DO SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE GÁS 23
FIGURA 7 – PROCESSAMENTO DE SINAL (A) SINAL (B) DETECTOR DE PICO (C) SEGURADOR DE ORDEM ZERO 24
FIGURA 8 – DIAGRAMA EM BLOCOS DO SISTEMA DE ULTRA-SOM. (A) MONTAGEM EXPERIMENTAL (B) RECEPTORES 25
FIGURA 9 – UDM (A) MONTAGEM EXPERIMENTAL (B) TRANSDUTOR 26
FIGURA 10 – RESULTADOS EM ESCOAMENTOS LÍQUIDO-SÓLIDO, GÁS-LÍQUIDO E GÁS-LÍQUIDO-SÓLIDO (A) DIFERENÇA DE TEMPO DE TRÂNSITO (B) RAZÃO ENTRE AS AMPLITUDES 28
FIGURA 11 – DESVIO PADRÃO (A) TEMPO DE TRÂNSITO (B) RAZÃO DE AMPLITUDE COMO FUNÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIOS E DE SÓLIDOS 29
FIGURA 12 – MONTAGEM EXPERIMENTAL DO UCT 30
FIGURA 13 – IMAGENS DE UCT EM DIVERSAS POSIÇÕES (A)80 CM (B)55 CM (C)30 CM 31
FIGURA 14 – MODOS DE PROPAGAÇÃO: (A) ONDA TRANSVERSAL E (B) ONDA LONGITUDINAL 34
FIGURA 15 – PROPAGAÇÃO DA ONDA DE ULTRA-SOM SENOIDAL NA DIREÇÃO POSITIVA DO EIXO X 36
FIGURA 16 – PROPAGAÇÃO DE DUAS ONDA DE ULTRA-SOM SENOIDAIS SOMADAS COM FREQÜÊNCIAS DIFERENTES NA DIREÇÃO POSITIVA DO EIXO X 37
FIGURA 17 – COMPORTAMENTO DA ONDA QUE INCIDE NA INTERFACE ENTRE OS MEIOS 1 E 2, CONSIDERANDO $C_1 < C_2$ 40
FIGURA 18 – TRANSDUTOR DE ULTRA-SOM 43
FIGURA 19 – PULSO DE EXCITAÇÃO DE 800 NS PARA UM TRANSDUTOR DE ULTRA-SOM 44
FIGURA 20 – PADRÕES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO VERTICAL. (A) BORBULHANTE, (B) CAP-BORBULHANTE (CALOTAS GASOSAS), (C) GOLFADAS (*SLUG*), (D) CAÓTICO-TURBULENTO (*CHURN-TURBULENT*) E (E) ANULAR 46

FIGURA 21 – PADRÕES DE ESCOAMENTO: 1% (BORBULHANTE), 5% (CALOTAS GASOSAS), 11% (TRANSIÇÃO ENTRE CALOTAS GASOSAS E GOLFADAS), 13% (GOLFADAS) 46
FIGURA 22 – ESQUEMÁTICO DO CONJUNTO EXPERIMENTAL 49
FIGURA 23 – MONTAGEM DA INSTRUMENTAÇÃO ULTRA-SÔNICA 51
FIGURA 24 – DIAGRAMA EM BLOCOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO 53
FIGURA 25 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO 53
FIGURA 26 – (A), (B) E (C) SINAIS DE ECG SEM PROCESSAMENTO (D) MÉDIA DE 100 SINAIS, ELEVANDO A SNR 55
FIGURA 27 – MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM - VELOCIDADE DE GRUPO: (1) ENVOLTÓRIO / VELOCIDADE DE FASE: (2) PRIMEIRO MÁXIMO (3) LIMIAR (4) PICO NEGATIVO (5) CRUZAMENTO COM ZERO . . 57
FIGURA 28 – (A) SINAL RECEBIDO (B) SINAL NORMALIZADO E TANGENTE DO PONTO DE MAIOR INCLINAÇÃO 59
FIGURA 29 – PRIMEIRO VALE DO SINAL DE ULTRA-SOM 60
FIGURA 30 – SINAL DE ULTRA-SOM NORMALIZADO PELO PRIMEIRO VALE 60
FIGURA 31 – (A) TRANSMISSÃO SEM MATERIAL (B) TRANSMISSÃO COM MATERIAL - TX: TRANSMISSOR E RX: RECEPTOR 62
FIGURA 32 – SINAIS DE ULTRA-SOM NO DOMÍNIO DO TEMPO 64
FIGURA 33 – SINAIS DE ULTRA-SOM NO DOMÍNIO DA FREQÜÊNCIA 64
FIGURA 34 – ATENUAÇÃO DO ULTRA-SOM EM BANDA LARGA 65
FIGURA 35 – REFLEXÕES E TRANSMISSÕES DO SINAL DE ULTRA-SOM NA SEÇÃO DE TESTE 65
FIGURA 36 – DEZ PULSOS DE ULTRA-SOM (ESQUERDA) ADQUIRIDOS PELO SISTEMA DESENVOLVIDO NO LASCA/UTFPR LADO A LADO (10 PULSOS = 1,18 MS DE ESCOAMENTO) E DETALHE DE UM PULSO ADQUIRIDO COM 12 BITS E 20 MSPS (DIREITA) 68
FIGURA 37 – ESCOAMENTO COM FRAÇÃO DE VAZIOS DE 1% (A) 50 PULSOS DE ULTRA-SOM (B) MÉDIA COERENTE DE (A) 69
FIGURA 38 – VELOCIDADE DO SOM EM DIVERSAS FRAÇÕES DE VAZIOS . . 74
FIGURA 39 – ENERGIA NORMALIZADA MÉDIA DO SINAL DE ULTRA-SOM . 76
FIGURA 40 – ENERGIA NORMALIZADA MÉDIA DO SINAL DE ULTRA-SOM - ESCALA LOGARÍTMICA 76
FIGURA 41 – AMPLITUDE MÁXIMA NORMALIZADA MÉDIA DO SINAL DE ULTRA-SOM 77
FIGURA 42 – AMPLITUDE MÁXIMA NORMALIZADA MÉDIA DO SINAL DE ULTRA-SOM - ESCALA LOGARÍTMICA 77
FIGURA 43 – AMPLITUDE MÁXIMA E MÉDIA MÓVEL DE EXPERIMENTOS COM (A) 1% E (B) 5% DE FRAÇÃO DE VAZIOS 78
FIGURA 44 – SINAIS DE ULTRA-SOM NORMALIZADOS PELO PRIMEIRO PICO NEGATIVO 80

FIGURA 45 – NORMALIZAÇÃO DO SINAL DE ULTRA-SOM 81
FIGURA 46 – ATENUAÇÃO EM BANDA LARGA - BUA (A) 5% DE FRAÇÃO DE VAZIOS (B) 10% DE FRAÇÃO DE VAZIOS 82
FIGURA 47 – ATENUAÇÃO EM BANDA LARGA NORMALIZADO - NBUA 84
FIGURA 48 – ATENUAÇÃO EM BANDA LARGA NORMALIZADO - NBUA, AJUSTE POR PARTES 85

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS 33
TABELA 2 – PROPRIEDADES ACÚSTICAS DE LÍQUIDOS 39
TABELA 3 – DADOS EXPERIMENTAIS 70
TABELA 4 – PARÂMETROS CALCULADOS 71
TABELA 5 – CÁLCULO DA VELOCIDADE DO SOM PARA OS MÉTODOS 1 A 4 72
TABELA 6 – CÁLCULO DA VELOCIDADE DO SOM PARA OS MÉTODOS 5 A 7 73
TABELA 7 – AMPLITUDE MÁXIMA NORMALIZADA DO SINAL DE ULTRA-SOM 75
TABELA 8 – ENERGIA NORMALIZADA DO SINAL DE ULTRA-SOM 75
TABELA 9 – NORMALIZAÇÃO DO SINAL DE ULTRA-SOM 80
TABELA 10 – ATENUAÇÃO EM BANDA LARGA NORMALIZADO - NBUA . . 83

LISTA DE SIGLAS

UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
LASCA	Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
BCS	Bomba Centrífuga Submersa
USD	United State Dollar
PDF	Probability Density Function
ECT	Electrical Capacitance Tomography
ERT	Electrical Resistance Tomography
RF	Radio Freqüência
UDM	Ultrasonic Doppler Method
PRF	Pulse Rate Frequency
UCT	Ultrasonic Computed Tomography
Rayl	Rayleigh
Msps	Mega Samples per Seconds
SDRAM	Synchronous Dynamic Random Access Memory
USB	Universal Serial Bus
BUA	Broadband Ultrasound Attenuation
nBUA	Normalized Broadband Ultrasound Attenuation
DMO	Densiometria Mineral Óssea
fps	Frames per Seconds

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	permissividade elétrica [F/m]
v	tensão elétrica [V]
K	constante
U	volume de gás [m^3]
p	pressão acústica [Pa]
c	velocidade [m/s]
t	tempo [s]
x	posição no eixo x [m]
k	número de onda [rad/m]
w	freqüência angular [rad/s]
λ	comprimento de onda [m]
f	freqüência [Hz]
c_p	velocidade de fase [m/s]
c_g	velocidade de grupo [m/s]
Z	impedância acústica [Rayl]
c_{part}	velocidade de deslocamento da partícula [m/s]
ρ	massa específica [kg/m^3]
θ	ângulo [rad]
R	coeficiente de reflexão
T	coeficiente de transmissão
α	atenuação [1/m] ou [dB/m]
$y[n]$	média coerente da n-ésima amostra
$x_i[n]$	valor da n-ésima amostra do i-ésimo sinal
N	numero total de pontos ou sinais

t_{ref}	tempo de trânsito do sinal de referência [s]
t_α	tempo de trânsito do sinal em uma determinada fração de vazios α [s]
c_{ref}	velocidade do som do sinal de referência [m/s]
c_α	velocidade do som do sinal em uma determinada fração de vazios α [m/s]
d	distância [m]
A	amplitude máxima do sinal [V]
A_N	amplitude do máxima do sinal normalizada em relação a uma referência
E	energia do sinal [$V^2.s$]
E_N	energia do sinal normalizada em relação a uma referência
s_{N_i}	i-ésimo sinal normalizado pelo primeiro vale
N_i	valor pico a pico do i-ésimo sinal normalizado pelo primeiro vale
BW	largura de banda [Hz]
f_{hi}	freqüência de corte superior [Hz]
f_{lo}	freqüência de corte inferior [Hz]
$V(f)$	sinal $v(t)$ no domínio da freqüência
$\alpha(f)$	atenuação do sinal de ultra-som em função da freqüência
R^2	coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 MOTIVAÇÕES 15
1.2 OBJETIVOS 15
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
2.1 PRINCÍPIOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS 18
2.2 PRINCÍPIOS SÔNICOS 23
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 30
3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO 34
3.1 TEORIA DE PROPAGAÇÃO DA ONDA DE ULTRA-SOM 34
3.1.1 Velocidade de Grupo, de Fase e de Sinal da Onda de Ultra-Som e Dispersão 35
3.1.2 Impendância Acústica 39
3.1.3 Incidência da Onda de Ultra-Som em Interfaces 39
3.1.4 Atenuação Acústica 41
3.1.5 Geração e Recepção de Sinais de Ultra-Som 42
3.2 ESCOAMENTO BIFÁSICO 44
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 46
4 METODOLOGIA 48
4.1 APARATO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 48
4.1.1 Montagem Experimental 48
4.1.2 Instrumentação Ultra-Sônica 50
4.1.3 Procedimento Experimental 50
4.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO 52
4.3 PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE ULTRA-SOM 54
4.3.1 Média Coerente ou Promediação 54
4.3.2 Velocidade do Som 55
4.3.3 Energia e Amplitude Máxima Normalizada do Sinal de Ultra-Som 57
4.3.4 Normalização do Sinal de Ultra-Som 58
4.3.5 Atenuação do Ultra-Som em Banda Larga - BUA 61
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 66
5 RESULTADOS 67
5.1 VELOCIDADE DO SOM 71
5.2 ANÁLISE DE ENERGIA E AMPLITUDE DO SINAL DE ULTRA-SOM 73
5.3 NORMALIZAÇÃO DO SINAL DE ULTRA-SOM 79
5.4 ATENUAÇÃO DE ULTRA-SOM EM BANDA LARGA - BUA 81
6 CONCLUSÕES 86
6.1 TRABALHOS FUTUROS 88
REFERÊNCIAS 90

1 INTRODUÇÃO

O escoamento vertical bifásico é de suma importância na produção de petróleo uma vez que os reservatórios petrolíferos produzem óleo e gás simultaneamente, os quais devem fluir até a superfície marinha através de poços, e destes até a plataforma de produção através de dutos verticais (*risers*) no mar.

Medições multifásicas são uma necessidade comum na indústria de óleo e gás, pois através destas é possível determinar a quantidade de óleo, gás e água que escoam por uma tubulação. Além disso, escoamentos gás-líquido são freqüentemente encontrados em caldeiras, reatores químicos e geradores de vapor de plantas nucleares. Ao longo de seu escoamento uma mistura pode desenvolver vários padrões de fluxo, sendo importante conhecer o seu comportamento ao longo do tempo.

Essas configurações físicas apresentam características que exigem modelagens distintas, apresentando relações próprias de perda de carga em função da vazão. A caracterização correta do padrão, sob dadas condições operacionais, é fundamental para se modelar a dinâmica do escoamento e determinar a relação entre perda de carga e vazão. Devido ao vasto campo de aplicações, muitos pesquisadores estudam vários métodos de medição da fração de vazio de acordo com os padrões de escoamento para melhor entendimento da dinâmica deste tipo de fenômeno.

Várias técnicas de medição têm sido desenvolvidas nos últimos anos, buscando soluções para aplicações em laboratórios de pesquisa e/ou ambientes industriais. Por exemplo, para aperfeiçoar a produção de petróleo é necessário ensaiar diversos equipamentos como a Bomba Centrífuga Submersa (BCS) nas diversas condições de escoamento com o objetivo de determinar parâmetros ótimos de projeto e de operação do equipamento.

Além do teste das BCS's, a medição bifásica também pode ser aplicada para determinar a quantidade produzida de gás e óleo em poços de produção, sem a necessidade de utilizar separadores de fases. O conhecimento da fração de cada fase é um parâmetro que pode ser utilizado para otimizar o fator de recuperação do poço de petróleo.

Outra aplicação na área de produção de petróleo é instalação do medidor multifásico na árvore de natal simplificando o *manifold* de produção, transformando-o em um *head* de produção. Também pode-se instalar o medidor no fundo do poço com a vantagem, em relação a instalação na árvore de natal, de que a medição será em condições de reservatório (SILVA; FILHO; PINHEIRO, 2000).

A instalação de um medidor multifásico por *manifold* implica na eliminação de linhas de testes, separador de teste e de toda a sua infra-estrutura. No caso da linha de teste, o custo médio estimado é de 600.000,00 USD/km. No caso de um medidor por poço, o custo de um *manifold* submarino seria drasticamente reduzido, transformando-o simplesmente em um head de produção (SILVA; FILHO; PINHEIRO, 2000).

1.1 MOTIVAÇÕES

O estudo da técnica de ultra-som aqui exposto tem como objetivo principal verificar a sua potencialidade para caracterização de escoamentos bifásicos e a quantificação de parâmetros importantes do escoamento, como a fração de vazios, de maneira *on-line* e sem a necessidade de separação das fases.

O uso da tecnologia de ultra-som apresenta diversas vantagens como a não intrusividade, não utilização de fontes radioativas, robustez, facilidade de instalação dentre outras características

Devido à complexidade dos fenômenos envolvidos na interação entre a onda acústica e o escoamento bifásico, a proposta e análise de novos métodos para medição de parâmetros do escoamento bifásico é um desafio que vem sendo abordado recorrentemente na literatura.

Do ponto de vista da tecnologia de aquisição e processamento de dados, foi desenvolvido um protótipo completo (*hardware, firmware* e *software*) de sonda não-intrusiva para aquisição e tratamento de dados de ultra-som em tempo real, com velocidade de aquisição e capacidade de armazenamento de dados compatíveis com as aplicações reais da indústria.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalhos são os seguintes:

- Analisar a correlação entre as diversas formas de cálculo da velocidade do som e a fração de vazios;

- Analisar a correlação entre a energia e amplitude máxima do sinal de ultra-som e a fração de vazios;
- Aplicar uma técnica de normalização do sinal pelo primeiro vale e verificar a influência da fração de vazios neste sinal, gerando uma sonda que não precisa do sinal de referência no escoamento com líquido;
- Aplicar a técnica de Atenuação em Banda Larga do Ultra-Som em uma determinada banda de freqüências e verificar a correlação com a fração de vazios do escoamento.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado de acordo com a seguinte estrutura. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão das principais pesquisas na análise de escoamentos bifásicos, não somente se restringindo a tecnologia de ultra-som, mas também abordando os princípios elétricos/magnéticos.

Uma breve introdução teórica sobre ultra-som e escoamento bifásico é apresentado no Capítulo 3.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada para a aquisição dos dados experimentais e os métodos de análise utilizados. Também neste Capítulo é apresentado o aparato experimental utilizado.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados da análise da velocidade do som, da energia e amplitude máxima do sinal de ultra-som assim como as duas novas propostas de análise, a atenuação do ultra-som em banda larga e uma proposta de normalização do sinal de ultra-som pelo primeiro vale.

As conclusões finais e propostas de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais trabalhos encontrados na literatura sobre as técnicas utilizadas para a análise de escoamentos bifásicos, principalmente aquelas baseadas em princípios mecânicos ou elétricos.

Devido à natureza não-linear dos escoamentos bifásicos (CANTELLI et al., 2005), vários métodos têm sido utilizados para caracterização da dinâmica complexa deste tipo de sistema a fim de encontrar modelos que ajudem na compreensão deste fenômeno.

Em 1975 JONES; ZUBER analisaram regimes de escoamento com diversos valores de fração de vazios através de imagens de raios-X. O padrão de escoamento era obtido através da análise da Função de Distribuição de Probabilidade (PDF) da fração de vazios.

Outra técnica utilizada baseia-se na medição do diferencial de pressão (CAI et al., 1994; VIAL et al., 2000). Este método possui limitações por causa da presença de gás, que pode ficar aprisionado em linhas de pressão (JONES; DELHAYE, 1976).

Os sensores de impedância elétrica têm sido os mais utilizados para o estudo dos escoamentos bifásicos. Dependendo da freqüência de excitação do sensor, podem-se analisar as características de resistência (MI; ISHII; TSOUKALAS, 2001; JULIá et al., 2007) ou capacitância (VIAL et al., 2000) da mistura. O problema dos métodos com sondas de impedância não-intrusiva é o longo período de observação exigido para se obter parâmetros estatísticos confiáveis.

Técnicas ultra-sônicas têm se mostrado uma alternativa viável para análise de meios opticamente opacos (CHANG; ICHIKAWA; IRONS, 1982; SOONG et al., 1995; WARSITO et al., 1997; MACCHI; GRACE; BI, 2001; KHISMATTULIN; AKHATOV, 2001; VATANAKUL; ZHENG; COUTURIER, 2004; ZHENGH, 2003; ZHENGH; ZHANG, 2004). Usando tomografia ultra-sônica, SUPARDAN et al. (2006) investigaram a distribuição das bolhas de gás em misturas ar-glicerina e ar-água, onde o líquido permanecia estático e o ar foi injetado através da parte inferior do aparato experimental.

A seguir são apresentados alguns trabalhos sobre a análise do padrão de escoamentos e a determinação da fração de vazios no escoamento bifásico utilizando princípios elétricos, magnéticos e sônicos.

2.1 PRINCÍPIOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS

Vários estudos apresentam diversas técnicas de sondas elétricas não intrusivas e intrusivas para a análise do escoamentos bifásico. Os trabalhos atuais focam em imagens de tomografias utilizando sensores elétricos.

HUANG; WANG; LI (2003) utilizam 12 sensores capacitivos, simetricamente montados no exterior de um duto de material não condutor em um tomógrafo por capacitância elétrica (ECT) que é uma das classes de tomografia disponível (Figura 1). No arranjo utilizado foi possível realizar 66 medidas de capacitância com 12 sensores. Estas medidas de capacitância são utilizados para reconstrução de uma imagem tomográfica. A seção de teste possui diâmetro interno de 50 mm com paredes em acrílico de 4 mm de espessura.

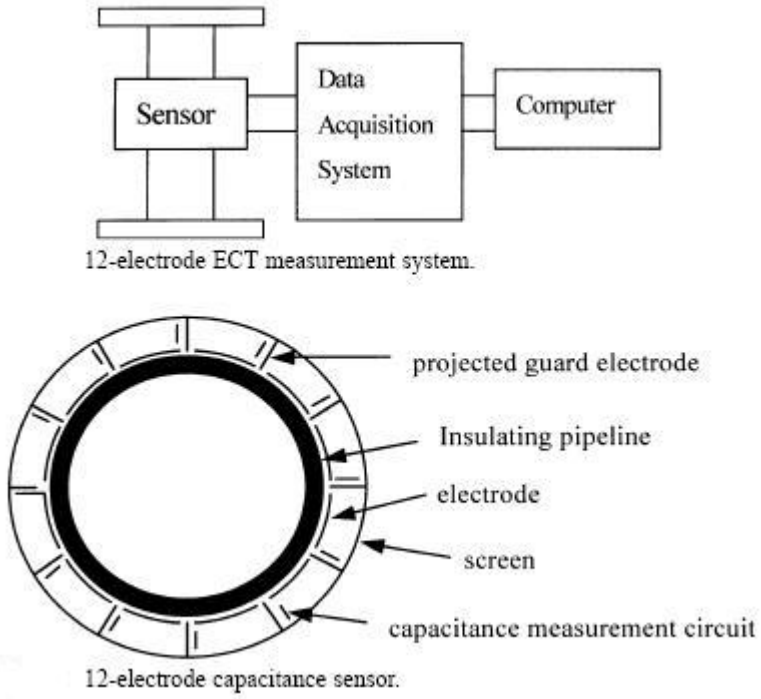


Figura 1: Electrical Capacitance Tomography - ECT

Fonte: (HUANG; WANG; LI, 2003)

O sistema é baseado no princípio de que diferentes fases do escoamento possuem diferentes constantes dielétricas (permissividade elétrica). A mudança da fração de vazios e da distribuição

destes vazios irá alterar a capacitância medida no escoamento.

De acordo com HUANG; WANG; LI (2003), a precisão e a qualidade da reconstrução da imagem em sistemas de tomografia por capacitância elétrica ainda não são satisfatórios. Por isso HUANG; WANG; LI (2003) propõe um novo modelo matemático e um novo algoritmo de reconstrução de imagem que fornecem dados quantitativos em diversos padrões de escoamentos bifásicos, tais como óleo e gás, que ocorrem na indústria de petróleo.

Em experimento dinâmico com óleo e gás, os autores obtiveram erros inferiores a 5 % na determinação da fração de vazios. Este método demonstra potencial em aplicações de laboratório. No entanto, a seção de teste utiliza como isolante elétrico o acrílico, com isso dificultando a realização de experimentos em ambientes industriais.

Para gerar uma imagem tomográfica podem-se utilizar medidas de resistência em um método análogo ao ECT, chamado tomografia por resistência elétrica (ERT), desde que uma das fases do escoamento seja condutora de eletricidade.

DONG et al. (2006) utilizam dois métodos baseados em ERT para estimar a fração de vazio local e a velocidade média da fase dispersa para obter a vazão da fase gasosa. O experimento é realizado com água e ar, onde somente o ar se movimenta ficando a água estática no aparato experimental.

O sistema é composto de dois planos de sondas de ERT (Figuras 2 e 3) uma vez que é aplicada a técnica de correlação dos sinais entre os dados adquiridos de cada plano de sondas. Cada plano é composto de 16 eletrodos em um tubo de acrílico de diâmetro interno de 125 mm. A distância entre os dois planos foi de 100 mm.

O primeiro método aplicado é chamado de “Método da Correlação de Pixels” e foi utilizado quando as distribuições espaciais da vazão e da fração de vazios não são uniformes. Neste método, para se medir a fração de vazios, é utilizada a limiarização da imagem tomográfica em tons de cinza. Este método demanda que a resolução da imagem reconstruída seja alta o suficiente para calcular a fração de vazios. No trabalho citado, a seção foi dividida em apenas 16 partes, não satisfazendo o requisito necessário ao calculo da fração de vazios com precisão adequada.

Certamente o aumento do número de eletrodos melhoraria o cálculo da fração de vazios, mas há restrições de velocidade de processamento para aplicações práticas.

O segundo método, chamado de “Correlação de Valor Característico”, é utilizado quando a distribuição de vazios e a vazão são uniformes na seção em análise. Neste método, é utilizada uma medida da variação de tensão em relação ao líquido puro para se determinar a fração de

vazios.

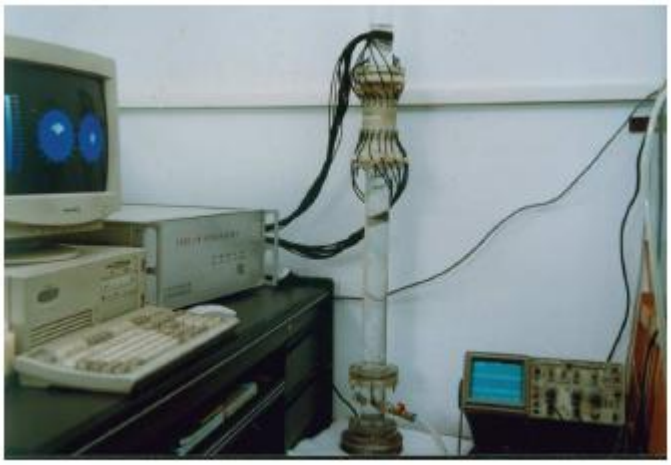


Figura 2: Montagem experimental - ERT

Fonte: (DONG et al., 2006)

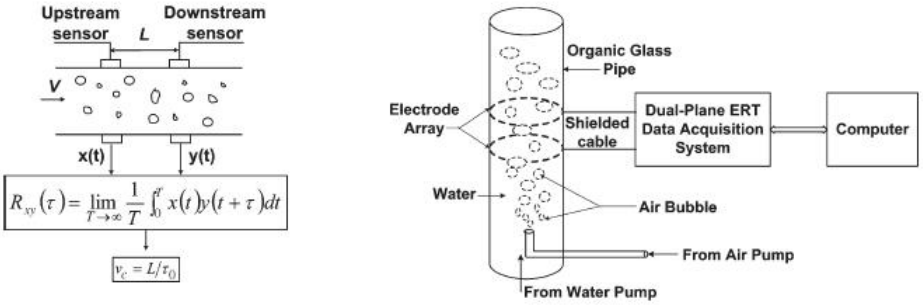


Figura 3: Diagrama esquemático - ERT

Fonte: (DONG et al., 2006)

Como o ECT, o ERT ainda é um método para ser utilizado em laboratório. Outro ponto importante é que sua utilidade se limita a líquidos condutores assim como o ECT se limita a dutos com paredes isolantes.

Também há propostas de soluções mais robustas para ambientes industriais, como o uso de um sensor eletromagnético não intrusivo de baixa potência (10 mW) que trabalha na faixa de 100-350 MHz. Este sistema é apresentado por WYLIE; SHAW; AL-SHAMMA'A (2006) onde um sinal de RF de 100-350 MHz é aplicado a uma cavidade ressonante eletromagnética não intrusiva (Figura 4) e atravessa o escoamento e é recebido por uma antena, também não intrusiva. O diâmetro da tubulação utilizado nos testes foi de 4 polegadas.

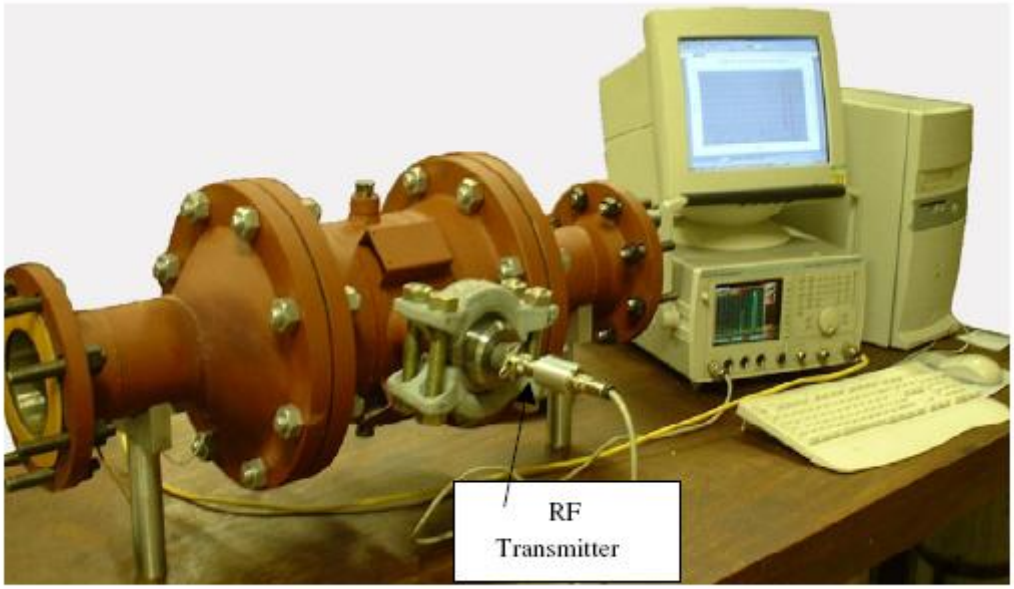


Figura 4: Protótipo Industrial
Fonte: (WYLIE; SHAW; AL-SHAMMA'A, 2006)

Neste trabalho é analisado o espectro de freqüência do sinal de RF recebido onde se mede o desvio da freqüência de ressonância, pois a permissividade da água ($\varepsilon_r = 81$) é muito maior que a do óleo ($\varepsilon_r = 2.2 \sim 2.5$) ou do gás ($\varepsilon_r = 1$). Assim uma pequena alteração na quantidade de água produz um grande deslocamento de freqüência.

O desvio da freqüência de ressonância é função da fração de vazios (Figura 5). Uma vantagem deste tipo de instrumento é a faixa de medição, que vai do tubo completamente cheio de líquido até completamente cheio de gás.

Uma dificuldade apresentada é que o desvio de freqüência depende da permissividade do meio ou em outras palavras, dos fluidos do escoamento. No escoamento de água do mar e gás, o desvio foi de 70 MHz, enquanto no escoamento de óleo e gás, este desvio foi de apenas 2 MHz, reduzindo a sensibilidade da medição, mas atingindo precisão de 2 %. Outra fonte de incerteza é devido a variação de temperatura que altera permissividade elétrica.

Além das técnicas baseadas em princípios elétricos, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos com sensores baseados em princípios mecânicos, especialmente utilizando tecnologia de ultra-som, devido à sua robustez, não invasividade e independência das características elétricas do fluido.

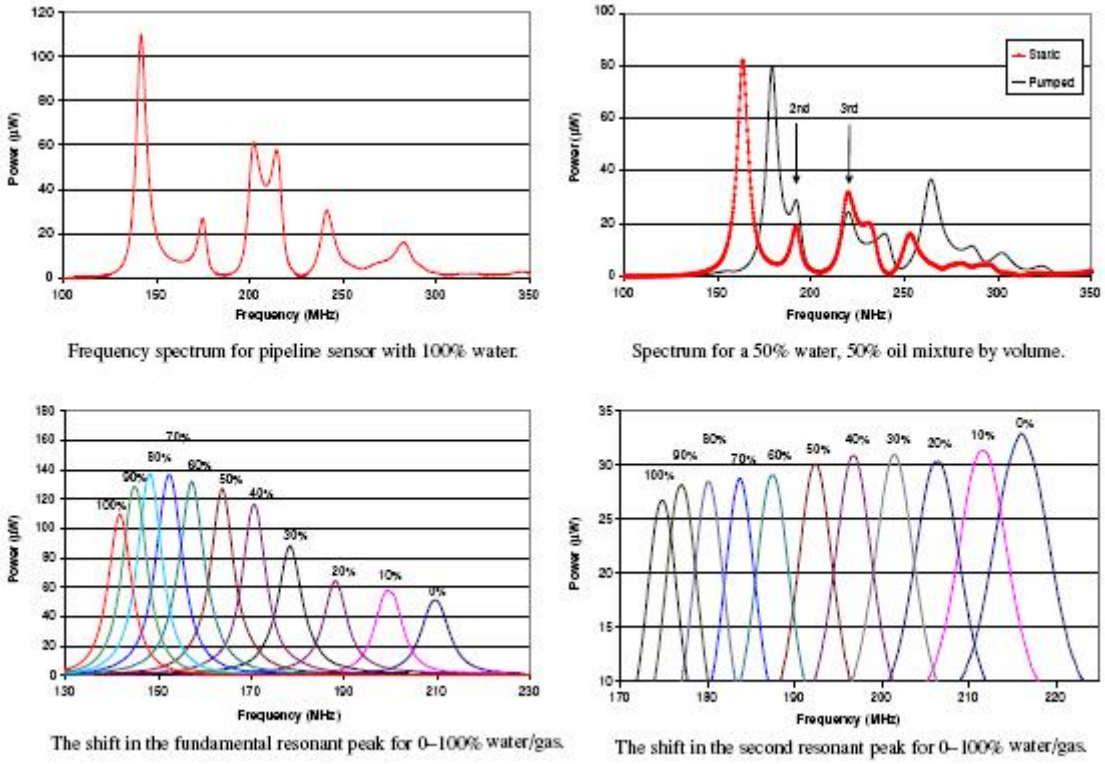


Figura 5: Desvio de freq. em relação a fração de vazios

Fonte: (WYLIE; SHAW; AL-SHAMMA'A, 2006)

2.2 PRINCÍPIOS SÔNICOS

O uso do ultra-som, em medições de processos industriais, possui a vantagem de ser não intrusivo e dos transdutores serem muito robustos e de relativo baixo custo.

Devido a estas características, ondas de ultra-som são utilizadas amplamente em aplicações industriais como medição de vazão e nível e aplicações médicas de ultra-sonografia. Além destas aplicações comercialmente disponíveis, há na literatura um crescente interesse em utilizar o ultra-som na medição das fase dispersas de escoamentos bifásicos.

Em XU; LEONARD; GREEN (1985) é apresentado um estudo para se determinar a concentração de gás na mistura água e ar em um circuito vertical de 2,5 metros de altura e 38 mm de diâmetro interno do duto com vazão de ar de até 600 ml/min. É utilizado um sistema com um par de transdutores posicionados em lados opostos do duto (Figura 6).

As freqüências dos transdutores utilizadas foram 0,5, 1,4 e 5 MHz. O transmissor é acionado por um trem de pulsos à taxa de 6 kHz, e o feixe de ultra-som atravessa o escoamento bifásico e tem sua amplitude modulada aleatóriamente pelo escoamento. A amplitude é alterada devido ao espalhamento da onda e à absorção por causa do descasamento de impedância entre o líquido e a fase gasosa. Foi utilizado o ultra-som pulsado em vez de de um sinal contínuo para evitar a ocorrência das ondas estacionárias.

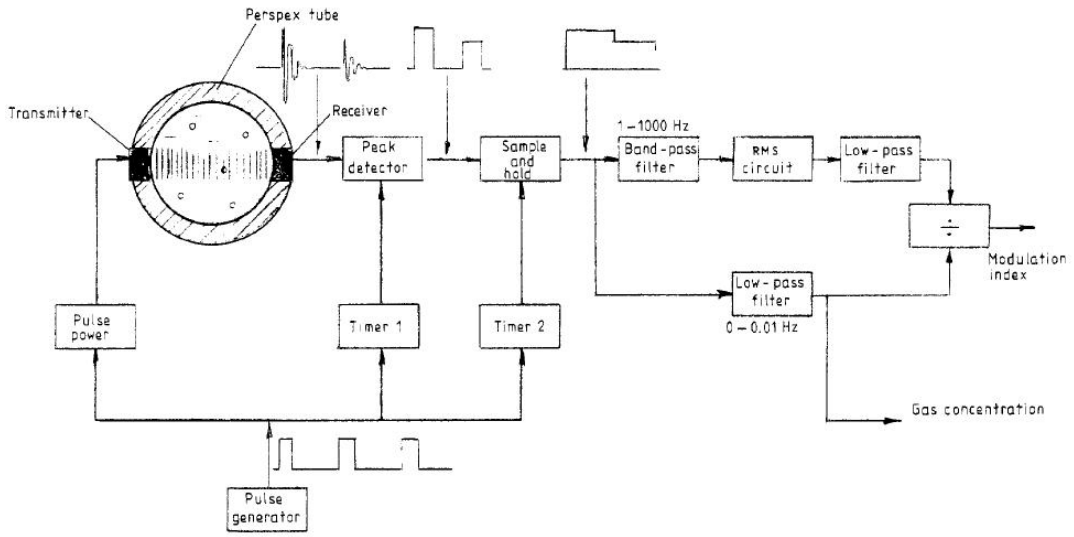


Figura 6: Diagrama em blocos do sistema para determinação da concentração de gás
Fonte: (XU; LEONARD; GREEN, 1985)

O sinal recebido é tratado através de um detector de pico, um segurador de ordem zero e um

filtro passa-baixas que funciona como um mediador do sinal (Figura 7). O modelo de atenuação utilizado (Equação 1) relaciona a amplitude do sinal recebido com um decaimento exponencial em função do volume de gás. Esta equação é válida para bolhas de tamanhos semelheantes.

$$v = v_0 * \exp(-KU) \tag{1}$$

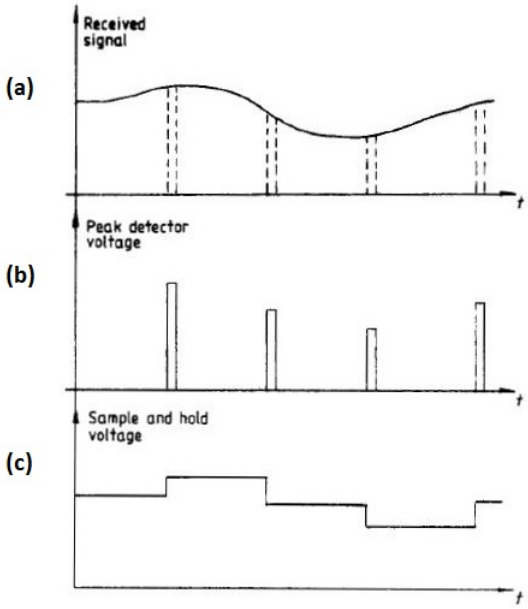


Figura 7: Processamento de sinal (a) Sinal (b) Detector de pico (c) Segurador de Ordem Zero
Fonte: (XU; LEONARD; GREEN, 1985)

Em XU et al. (1988) são utilizados dois pares de transdutores (Figura 8) para medição de vazão e modelagem do espalhamento da onda de ultra-som em escoamentos bifásicos. É empregada a técnica de ultra-som pulsado em uma montagem semelhante à apresentada em XU; LEONARD; GREEN (1985).

O sistema funciona com os dois transdutores sendo acionados simultaneamente a uma determinada taxa de repetição f_p e o sinal de ultra-som seguindo diretamente para os respectivos receptores. Estes sinais estão modulados em amplitude devido ao escoamento bifásico. Para o tratamento do sinal, há um detector de pico com um amostrador e segurador de ordem zero. Após este circuito, o sinal é filtrado por um filtro passa baixas. Os dois sinais tratados são correlacionados, gerando diversos diagramas de correlação da amplitude dos sinais recebidos pelos dois receptores para diversas situações de escoamento.

Neste diagramas de correlação foi observado que com vazão de ar muito baixa (menor que 10 ml/s) houve somente um pico no diagrama de correlação. Elevando a vazão de ar até 1% de

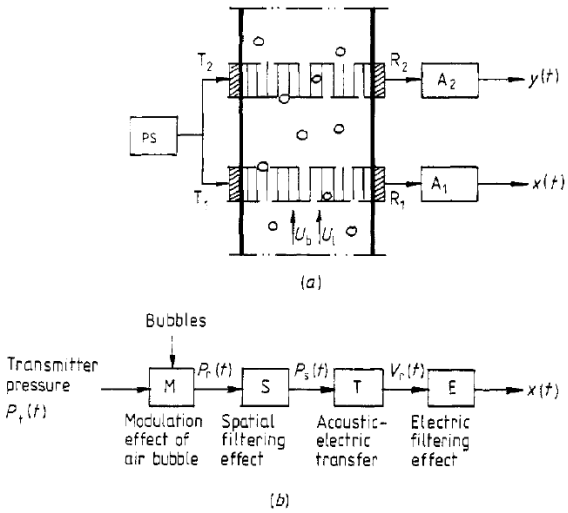


Figura 8: Diagrama em blocos do sistema de ultra-som. (a) Montagem Experimental (b) Receptores

Fonte: (XU et al., 1988)

fração de vazios se observaram dois picos. Com o aumento até 3%, estes dois picos foram se unindo gradualmente até novamente ter somente um pico no diagrama de correlação. Também foi apresentado um modelo de atenuação da onda de ultra-som simplificado para escoamentos com múltiplas reflexões devido a elevada densidade de bolhas de ar.

JONES; AMBLARD; FAVREU (1986) estudaram a interação de uma onda ultra-sônica com escoamentos de água com bolhas de ar. Os autores afirmam que não existe relação entre a atenuação da onda e a área de interface volumétrica em um escoamento com bolhas. Deste modo, se a atenuação da onda for usada para realizar medições de fração de vazio da fase dispersa, estimações do tamanho médio e formato das bolhas serão necessárias.

JONES; AMBLARD; FAVREU (1986) também discutiram a física envolvendo a passagem de uma simples bolha através do campo acústico não plano gerado por um transdutor de ultra-som em forma de pistão. Segundo seus estudos, duas bolhas idênticas passando entre o transdutor emissor e o receptor em posições diferentes ao longo de um mesmo eixo produzem efeitos diferentes. Assim, os sinais transmitidos através de escoamentos com bolhas são ambíguos, dependendo se as bolhas não estão distribuídas uniformemente ou distribuídas identicamente durante o tempo total da medição.

MURAKAWA; KIKURA; ARITOMI (2005) propõe uma nova técnica para determinar a velocidade de escoamento de cada fase. A técnica é baseada no método de desvio de freqüência

Doppler. Foram utilizados dois transdutores de tamanhos diferentes para as medidas de UDM.

Os dois transdutores ultra-sônicos foram construídos em um mesmo encapsulamento de 10 mm de diâmetro externo e com freqüências diferentes. O transdutor interno, com 3 mm de diâmetro, possui a freqüência de 8 MHz, enquanto o externo possui a freqüência de 2 MHz (Figura 9).

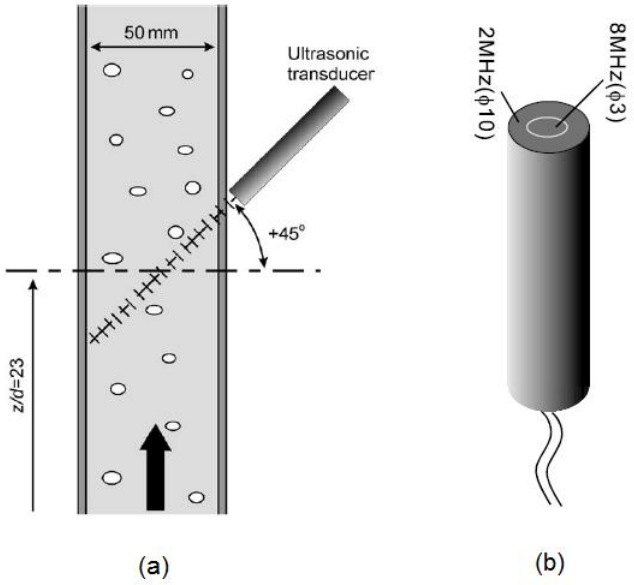


Figura 9: UDM (a) Montagem Experimental (b) Transdutor
Fonte: (MURAKAWA; KIKURA; ARITOMI, 2005)

Para determinar a velocidade da fase líquida utilizando o desvio doppler, foi necessário adicionar micro-partículas de nylon de 80 μm de diâmetro numa razão de 0,2 g/l. As bolhas de ar tinham entre 2-4 mm de diâmetro.

Neste sistema, o transdutor de 2 MHz foi utilizado para medir a velocidade de escoamento da fase gasosa, enquanto o transdutor de 8 MHz foi utilizado para a fase líquida. Através da medida destes dois transdutores foi possível determinar a probabilidade de distribuição de velocidade e o perfil desta velocidade em escoamentos de água com bolhas de ar.

Também foi verificado o efeito da freqüência e diâmetro do transdutor na precisão da medição. Como a probabilidade de bolhas cruzarem o feixe ultra-sônico aumenta com o diâmetro do transdutor, os autores obtiveram diferentes resultados para diferentes transdutores em medições realizadas em escoamentos com as mesmas condições.

ZHENGH; ZHANG (2004) utilizaram o desvio padrão da amplitude e do tempo de trânsito do sinal ultra-som para medir a fração de vazio das fases dispersas em escoamentos trifásicos.

Resultados experimentais para escoamentos ar-óleo e micro-esferas de vidro-óleo foram apresentados.

A montagem experimental utilizada por ZHENGH; ZHANG (2004) consiste de um par de transdutores de ultra-som de 3 MHz conectados a um *pulser-receiver* no modo transmissão-recepção, montados em uma coluna de 50 cm de diâmetro. A taxa de repetição de pulsos - PRF foi de 1000 pulsos por segundo. Como pré-processamento, em um conjunto com 200 sinais, foi calculada uma sinal médio através de pró-mediação, totalizando 5 sinais médios por segundo. Estes sinais médios foram utilizados nas análises posteriores. Foram tomadas algumas precauções para manter a temperatura do experimento constante.

Resultados experimentais demonstraram que a flutuação da amplitude do sinal de ultra-som (Figura 10 - b) se eleva consideravelmente na presença de gás ou gás-sólidos. Também se observa que o desvio padrão da razão entre amplitudes do escoamento gás-líquido é dez vezes maior que o escoamento líquido-sólido, indicando que as bolhas de ar são o fator predominante na atenuação acústica.

Entretanto, em escoamentos trifásicos ar/micro-esferas de vidro/óleo, parece existir uma interação entre as bolhas de ar e as micro-esferas de vidro de modo que a atenuação do sinal resultante é maior que a soma dos efeitos isolados de cada uma isoladamente. Eles observaram também existir um aumento exponencial da atenuação com o aumento da área interfacial das fases sólida e líquida. Além disso, as bolhas de ar causaram diversos valores positivos no tempo de trânsito das ondas ultra-sônicas no escoamento gás-líquido, conseqüentemente as leituras positivas no escoamento gás-líquido-sólido são devido ao escoamento gás-líquido (Figura 10 - a).

Neste trabalho também foi verificado que o tempo de trânsito é um processo aleatório estacionário, ou seja, todos os momentos estatísticos do tempo de trânsito não dependem de deslocamentos no tempo.

Para determinar a fração de vazios em escoamento trifásico ZHENGH; ZHANG (2004) utilizou a flutuação (desvio padrão) do tempo de trânsito. O conjunto de valores de tempo de trânsito foi particionado em dois conjuntos, onde um conjunto de dados possui grande correlação com os valores obtidos em escoamentos gás-líquido. Para determinar esta partição foi utilizado um método de otimização, onde se deseja maximizar o coeficiente de correlação de um conjunto de dados do escoamento trifásico com os valores de tempo de trânsito com escoamento gás-líquido. Após determinar o conjunto com maior correlação com o escoamento gás-líquido é utilizado o desvio padrão para se determinar a fração de vazios no escoamento trifásico. Técnica similar foi aplicada para separar a influência do escoamento líquido-sólido

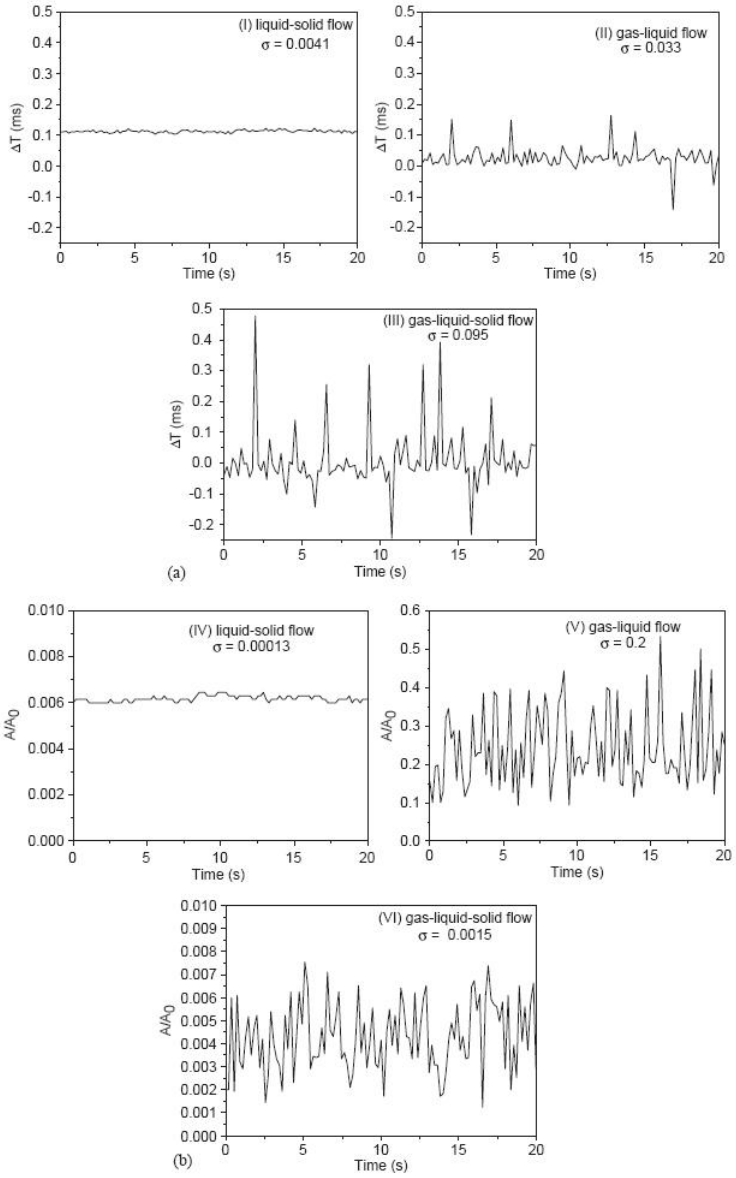


Figura 10: Resultados em escoamentos líquido-sólido, gás-líquido e gás-líquido-sólido (a) diferença de tempo de trânsito (b) razão entre as amplitudes

Fonte: (ZHENGH; ZHANG, 2004)

no sinal de amplitude de ultra-som

Os resultados de ZHENGH; ZHANG (2004) determinam simultaneamente a fração de sólidos e gás em um escoamento trifásico ascendente com apenas um par de transdutores de ultra-som, com isso, obtendo um sistema barato.

VATANAKUL; ZHENG; COUTURIER (2004) realizaram experimentos similares aos de ZHENGH; ZHANG (2004) utilizando esferas de vidro maiores. Também foram utilizados sensores de condutividade. Neste trabalho verificou-se que o espalhamento (desvio padrão) da razão de amplitude e o tempo de trânsito aumentam à medida que os percentuais das fases gasosa e sólida aumentam (Figura 11). Observaram também que esta última possui um efeito mais pronunciado e imediato que a outra.

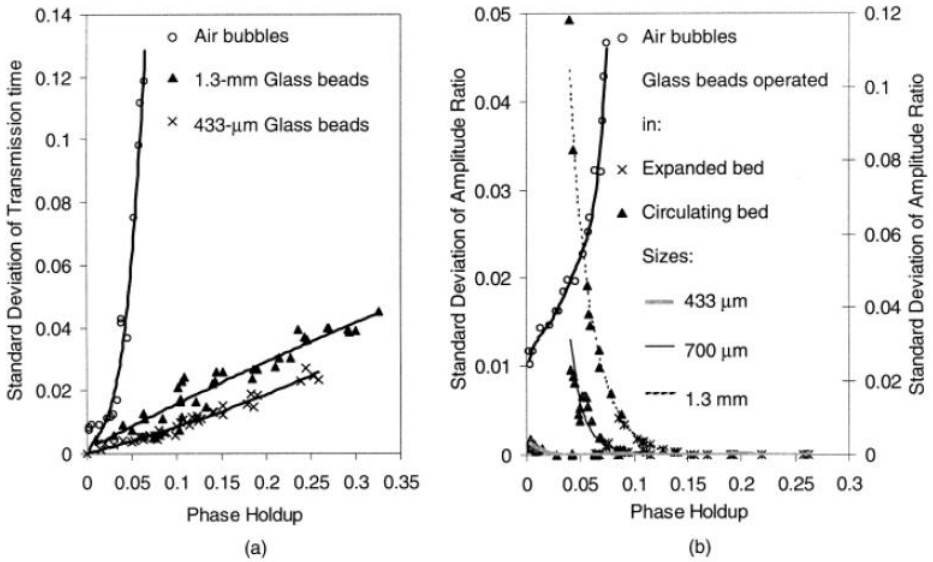


Figura 11: Desvio Padrão (a) tempo de trânsito (b) razão de amplitude como função da fração de vazios e de sólidos

Fonte: (VATANAKUL; ZHENG; COUTURIER, 2004)

Os transdutores de ultra-som utilizados possuíam freqüência central de 3 MHz, montados no modo transmissão-recepção em um duto de 10,2 cm de diâmetro interno. As bolhas de ar tinham entre 2 e 6 mm e as partículas sólidas eram esferas de vidro de 0,433 e 1,3 mm de diâmetro.

Verificou-se que em relação à amplitude do sinal, o espalhamento nos dados para gás-líquido aumentou rapidamente com o aumento da fração de vazio. Foi observada uma tendência oposta para o sistema sólido-líquido.

SUPARDAN et al. (2006) utilizam tomografia computadorizada por ultra-som - UCT.

Como as outras técnicas de tomografia, este sistema necessita de vários transdutores de ultra-som, para reconstruir a imagem do escoamento.

Neste estudo, distribuições temporais médias da atenuação do sinal de ultra-som foram analisadas em uma coluna de acrílico com 16 cm de diâmetro e 200 cm de altura, com escoamentos ar-água e ar-glicerina com fração de vazios de 10% do peso. Foram utilizados seis pares de transdutores de 2 MHz no modo transmissão que são rotacionados 20º até completar 180º para gerar a imagem tomográfica (Figura 12).

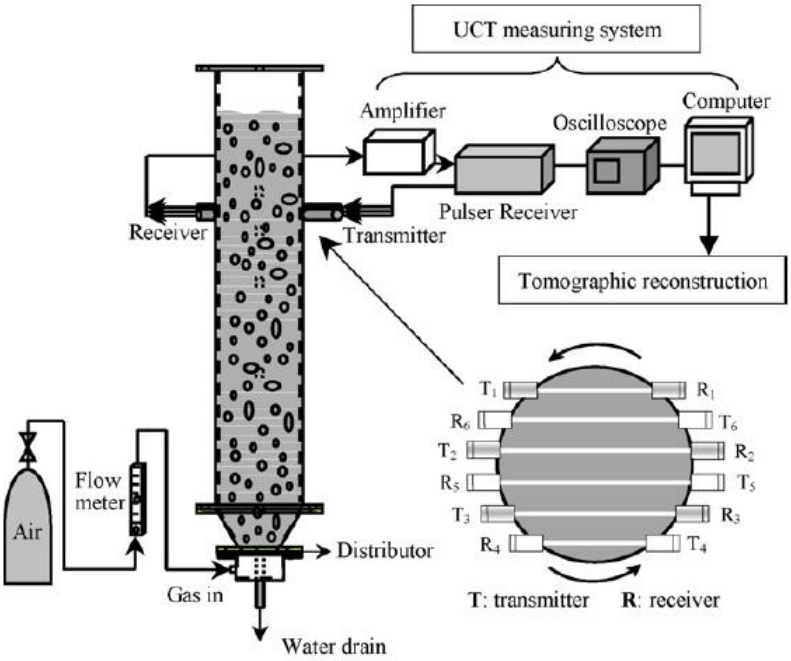


Figura 12: Montagem experimental do UCT

Fonte: (SUPARDAN et al., 2006)

Com isto adquire-se uma matriz 9 x 6 de medidas que, por interpolação utilizando o método de Lagrange, é ampliado para 36 x 11 medidas. Para cada caminho é utilizada uma média de cinco minutos da atenuação da energia do sinal de ultra-som. Com estes dados é possível reconstruir uma imagem com a distribuição de gás (Figura 13). O trabalho demonstrou o uso da UCT, para análise da distribuição de fases no escoamento bifásico assim como é realizado com o ERT e ECT.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante os últimos anos, muitos pesquisadores vem estudando vários métodos e técnicas aplicáveis ao desenvolvimento de instrumentos de medição de fração de vazios e para a determinação

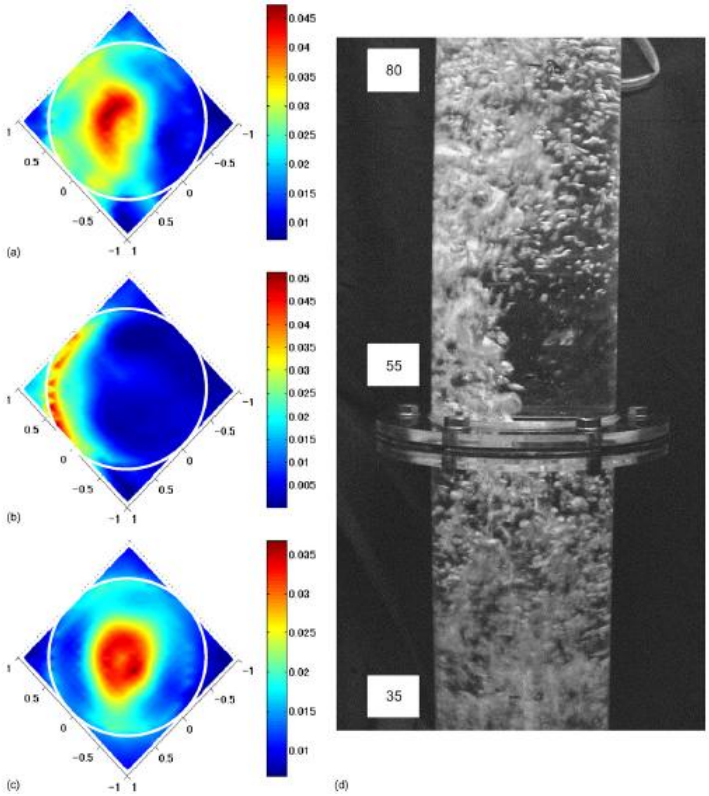


Figura 13: Imagens de UCT em diversas posições (a)80 cm (b)55 cm (c)30 cm

Fonte: (SUPARDAN et al., 2006)

do padrão de escoamentos. Diversos métodos tem sido propostos na área de análise de escoamentos multifásicos, principalmente utilizando princípios sônicos, elétricos e magnéticos. Alguns método possuem algumas vantagens e desvantagens como apresentado na Tabela 1.

Observa-se como vantagem das técnicas utilizando ultra-som são a robustez e o baixo custo, enquanto técnicas de tomografia ainda estão em desenvolvimento para obter melhores precisões, além do elevado custos por exigirem uma quantidade maior de transdutores.

Além da tradicional análise da amplitude e tempo de trânsito do sinal do ultra-som, o método doppler explora o desvio da freqüência, assim como o método com sinal de RF utiliza o desvio da freqüência de ressonância. Está análise da mudança da freqüência é um indício de alteração no formato do sinal que este trabalho explora.

Este trabalho utiliza técnicas ultra-sônica, no modo transmissão-recepção para analisar o escoamento bifásico vertical ascendente água-ar e determinar a sua fração de vazios. Utilizando parâmetros simples como velocidade do som (tempo de trânsito), atenuação e distorção do sinal deseja-se analisar a relação com a fração de vazios através da proposta de dois novo métodos de medição baseados na distorção e atenuação do sinal de ultra-som no domínio da freqüência.

Tabela 1: Comparação entre métodos de análise de escoamentos multifásicos

Método	Princípio	Medição	Vantagem	Desvantagem
Elétrico/Magnético				
ECT	Tomografia por capacitância elétrica	Topologia do escoamento Fração de vazios	Imagem da topologia do escoamento	Dutos com paredes não condutoras Alto custo - Diversos sensores de capacitância Longo período de observação
ERT	Tomografia por resistência elétrica	Topologia do escoamento Fração de vazios	Imagem da topologia do escoamento	Uma das fases deve ser condutora de eletricidade Alto custo - necessidade de muitos eletrodos para se obter precisão na medição Longo período de observação
RF	Desvio da freqüência de ressonância	Fração de vazios, óleo e água	Robustez	Permissividade elétrica depende da temperatura Permissividade elétrica do óleo e gás são muito próximas, reduzindo a sensibilidade da medição
Sônico				
Atenuação	Atenuação do sinal de ultra-som Modo transmissão	Fração de vazios	Baixo custo - 1 par de transdutores Robustez	Necessidade do valor de referência da amplitude máxima com escoamento monofásico
Desvio padrão da atenuação e do tempo de trânsito	Atenuação do sinal de ultra-som Tempo de trânsito do sinal de ultra-som Modo transmissão	Fração de vazios e sólidos	Baixo custo - 1 par de transdutores Robustez	Necessidade do valor de referência de amplitude máxima com escoamento monofásico Dificuldade se separar os efeitos do gás e sólidos para determinar a fração de vazios.
UDM	Desvio de freqüência doppler Modo pulso-eco	Velocidade do escoamento da fase liquida e gasosa	Baixo custo - 1 transdutor Robustez	Necessidade de particulados ou sólido em suspenção para determinar velocidade da fase liquida
UCT	Tomografia por atenuação do sinal de ultra-som Modo transmissão	Topologia do escoamento Fração de vazios	Imagem da topologia do escoamento	Alto custo - Diversos transdutores de ultra-som Necessidade de imagens com elevada resolução para calcular a fração de vazios
Outro				
Diferencial de pressão	Perda de carga	Fração de vazios	Baixo custo - transmissores de pressão Simplicidade	Gás pode ficar aprisionando em linhas de pressão Método intrusivo
Raio-X	Atenuação do sinal de raio-x	Fração de vazios		Fonte de raio-x

Fonte: Autoria própria

3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Este capitulo apresenta a teoria básica dos fenômenos envolvidas nos experimento com escoamentos bifásicos e propagação da onda de ultra-som, necessários para o entendimentos da interação física entre o sinal de ultra-som e o escoamento bifásico.

3.1 TEORIA DE PROPAGAÇÃO DA ONDA DE ULTRA-SOM

A onda de ultra-som é uma onda mecânica com freqüência fundamental superior a 20 kHz. Ela é gerada através de uma perturbação em um meio material. Basicamente há dois principais modos de propagação da onda no meio: ondas longitudinais e transversais (Figura 14). Nos sólidos, coexistem os dois modos de propagação, mas em líquidos e gases há somente o modo transversal.

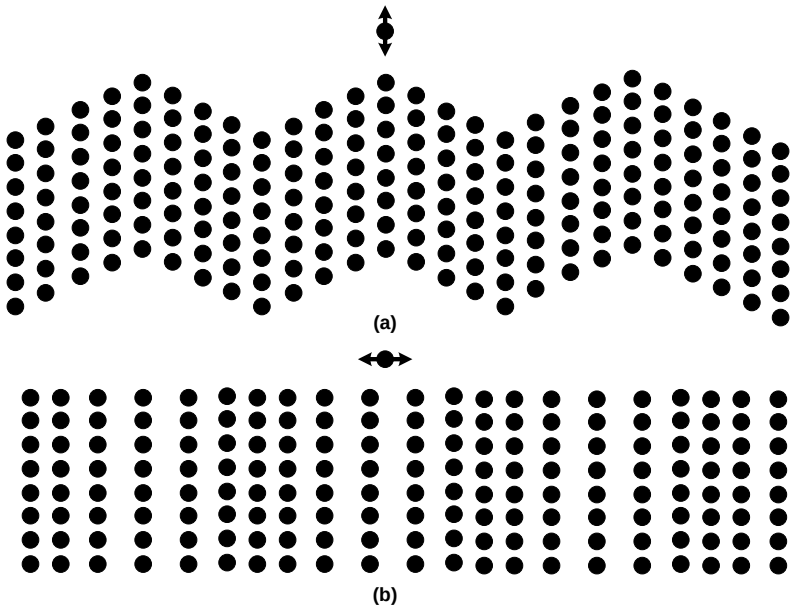


Figura 14: Modos de propagação: (a) Onda Transversal e (b) Onda Longitudinal

Fonte: Autoria própria

Estas perturbações se propagam através de uma onda de acordo com a Equação 2.

$$\nabla^2 \vec{p} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \vec{p}}{\partial t^2} \tag{2}$$

Um exemplo de solução unidimensional para esta Equação é a apresentado pela Equação 3. Esta solução é muito utilizada em modelos simples e eficazes.

$$p(x,t) = p_0 \cos(kx - wt) \tag{3}$$

A freqüência angular w de uma onda é o número de radianos por unidade de tempo em uma posição fixa. O número de onda k é o número de radianos por unidade de distância em um determinado tempo fixo. Assim, o comprimento de onda λ e a freqüência f são determinados pelas Equações 4 e 5.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \tag{4}$$

$$f = \frac{w}{2\pi} \tag{5}$$

As ondas de ultra-som podem ser geradas por sensores do tipo piezoelétricos, nos quais um distúrbio elétrico é transformado em um distúrbio mecânico.

A seguir são detalhados as principais características e os principais parâmetros medidos em uma onda de ultra-som.

3.1.1 Velocidade de Grupo, de Fase e de Sinal da Onda de Ultra-Som e Dispersão

A velocidade de uma onda pode ser definida de diferentes formas. O caso mais simples de propagação de uma onda é a de uma senóide se propagando somente em uma direção num meio isotrópico, homogêneo e não dispersivo.

Na propagação de uma onda, a amplitude é uma função do tempo e da posição. Observando a propagação da onda de ultra-som num instante de tempo fixo t_1, a amplitude do sinal de pressão varia cosenoidalmente (Equação 3) em relação a posição x. Observando o deslocamento de um ponto em x desta onda em t_1 e t_2 (Figura 15), determina-se a velocidade da onda pela Equação 6.

$$c_p = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{6}$$

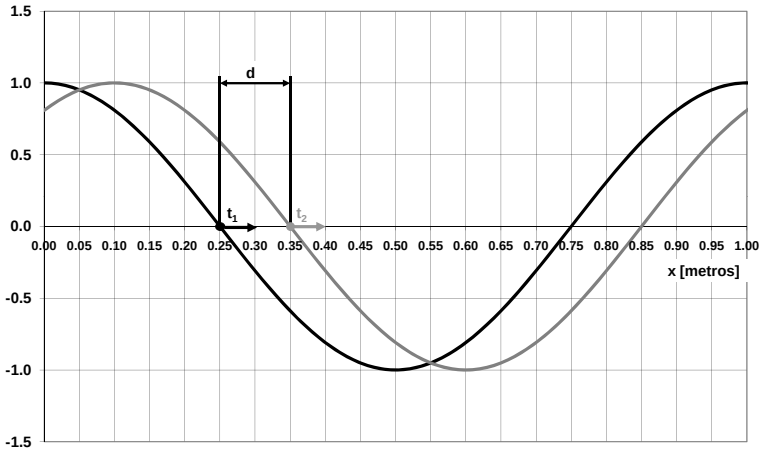


Figura 15: Propagação da onda de ultra-som senoidal na direção positiva do eixo x

Fonte: Autoria própria

Analisando o mesmo ponto em t_1 e t_2, no momento em que $p(x_1,t_1) = p(x_2,t_2)$ ocorre, se observa a propagação desta onda. Para que isso ocorra tem-se a condição dada pelas Equações 7, 8, 9 e 10.

$$p_0 \cos(kx_1 - wt_1) = p_0 \cos(kx_2 - wt_2) \tag{7}$$

$$kx_1 - wt_1 = kx_2 - wt_2 \tag{8}$$

$$k(x_2 - x_1) = w(t_2 - t_1) \tag{9}$$

$$\frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} = \frac{w}{k} \tag{10}$$

Comparando as Equações 6 e 10, tem-se que a velocidade da onda é dada pela Equação 11.

$$c_p = \frac{w}{k} \tag{11}$$

Para uma onda contínua e com uma só freqüência em seu espectro, a Equação 11 é utilizada para calcular a velocidade de fase (c_p), que é igual a velocidade de grupo, ou seja, a velocidade de onda.

Agora considerando um sinal que é a soma de duas ondas senoidais (Equação 12), com uma pequena diferença em suas freqüências, obtém-se as formas de onda da Figura 16.

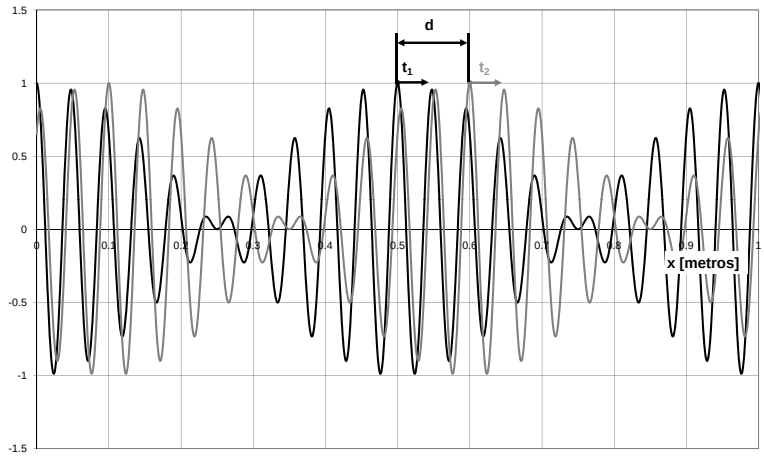


Figura 16: Propagação de duas onda de ultra-som senoidais somadas com freqüências diferentes na direção positiva do eixo x

Fonte: Autoria própria

$$p(x,t) = p_0 \cos[(k-\Delta k)x - (w-\Delta w)t] + \cos[(k+\Delta k)x - (w+\Delta w)t] \tag{12}$$

Utilizando as propriedades trigonométricas na Equação 12 chega-se à Equação 13.

$$p(x,t) = 2p_0 \cos(kx - wt)\cos(\Delta kx - \Delta wt) \tag{13}$$

A Equação 13 pode ser interpretada como uma onda senoidal com freqüência angular w e número de onda k, modulada em amplitude por $\cos(\Delta kx - \Delta wt)$. A velocidade de fase do sinal modulante, dada pela Equação 14, é a velocidade que o pacote de onda se propaga (envoltória), também chamado de velocidade de grupo (v_g). No caso limite em que um pacote de ondas é

formado pelo somatório de infinitas outras harmônicas de freqüências diferentes, a Equação 14 se torna a Equação 15.

$$c_g = \frac{\Delta w}{\Delta k} \tag{14}$$

$$c_g = \frac{\partial w}{\partial k} \tag{15}$$

Para um pulso de ultra-som de pequena duração, com 3 a 5 ciclos, a velocidade de grupo é a velocidade com que a envoltória desta onda se propaga.

Além da velocidade de fase e de grupo, há um caso especial da velocidade de fase chamado de velocidade de sinal. Em alguns casos, a propagação de informação através de ondas está relacionada com alguma mudança na onda, por exemplo, a existência ou não desta onda. Para determinar esta existência, utiliza-se o início ou fim desta onda. O ponto de medição inicial ou final, é aquele que determina quando a informação está presente. Em diversos casos, é necessário receber a onda por completo, em outros, o aparecimento de uma onda já é suficiente para obter a informação.

Resumidamente, podem-se definir as diferentes velocidades:

- Velocidade de Fase: Velocidade a que uma determinada fase da onda se propaga.
- Velocidade de Grupo: Velocidade com que a envoltória da onda se propaga.
- Velocidade de Sinal: Velocidade de fase em que se utiliza o início ou fim da onda como ponto de medição.

Em meios isotrópicos, homogêneos e sem dispersão, estas velocidades possuem o mesmo valor, mas em meios dispersivos isso não ocorre, pois a velocidade de fase depende da freqüência (CHEEKE, 2002), fazendo com que a velocidade de determinada fase não seja a mesma que a de grupo. Esta dispersão é a mesma que ocorre com a luz atravessando um prisma ou uma gota de chuva, separando a luz em suas diversas componentes (freqüências).

Este trabalho explora a propriedade do meio (escoamento) alterar a velocidade de cada freqüência do sinal de maneiras distintas, apresentando resultados das velocidade de fase, de grupo e de sinal. Também é realizando uma análise no domínio da freqüência, para a atenuação do sinal em suas diferentes freqüências.

3.1.2 Impendância Acústica

Um conceito importante, associado a transmissão de um sinal, é a impedância acústica característica. Ela é definida pelas Equações 16 e 17 (CHEEKE, 2002) e há analogia direta com a impedância elétrica, permitindo a aplicação do teorema da máxima transferência de energia, quando as impedância de dois materiais estão casadas, ou seja, são idênticas. Esta propriedade representa a oposição do meio à vibração de suas partículas, quando da passagem de ondas ultra-sônicas e depende de suas propriedades mecânicas. Sua unidade é o Rayl (Rayleigh).

$$Z = \frac{p}{c_{part}} \tag{16}$$

$$Z = \rho_0 c_0 \tag{17}$$

A Tabela 2 apresenta a velocidade do som, massa específica e impedância acústica para alguns fluidos.

Tabela 2: Propriedades Acústicas de Líquidos

Líquido	c_0 $(\frac{km}{s})$	ρ_0 $(\frac{kg}{m^3})$	Z **(MRayls)**
Acetona	1,17	0,79	1,07
Acrílico	2,60	1,18	3,2
Água do Mar	1,53	1,02	1,57
Água (20 ^oC)	1,48	1,00	1,483
Ar	0,33	0,0013	0,00043
Argônio Líquido (87 K)	0,84	1,43	1,20
Metanol	1,1	0,79	0,87
Gallium (30 K)	2,87	6,10	17,5
Glicerina	1,92	1,26	2,5
Hélio Líquido (2 K)	0,228	0,145	0,033
Mercúrio	1,45	13,53	19,6
Nitrogênio Líquido (77 K)	0,86	0,85	0,68
Silicone	1,35	1,1	1,5

Fonte: (CHEEKE, 2002)

3.1.3 Incidência da Onda de Ultra-Som em Interfaces

Quando se trabalha com ondas, normalmente, há passagem desta através de um meio para outro. Quando a onda de ultra-som encontra uma interface entre dois meios, uma parte da energia da onda incidente é refletida e outra parte é transmitida para o segundo meio (refração, Figura 17). Este processo é similar ao que acontece com as ondas eletromagnéticas.

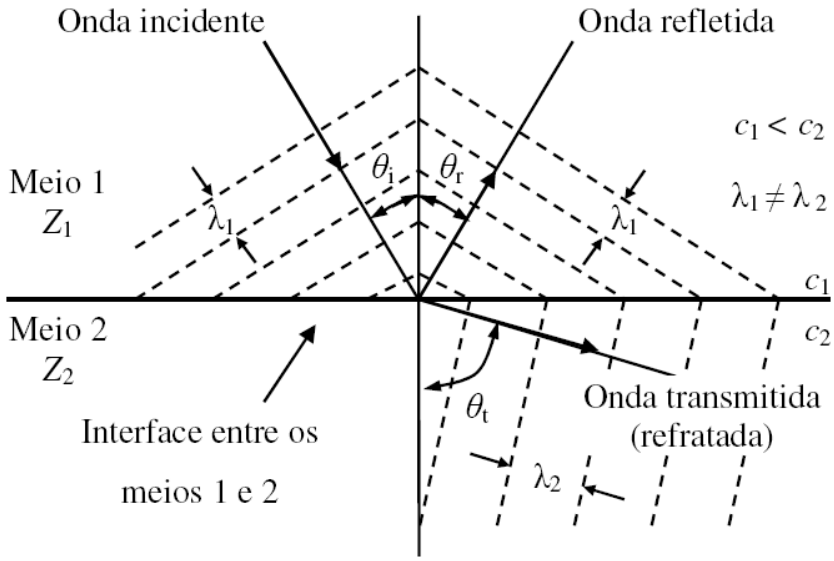


Figura 17: Comportamento da onda que incide na interface entre os meios 1 e 2, considerando $c_1 < c_2$

Fonte: (SBALQUEIRO, 2006)

Para onda de ultra-som com comprimento de onda não comparável às dimensões do objeto refletor, a relação de Snell (CHEEKE, 2002) é válida para determinar os ângulos de reflexão e refração de uma onda quando esta incide em uma interface (Equações 18 e 19). Os indices i, r e t significam incidente, refletida e transmitida respectivamente, assim como, os índices 1 e 2 se referem ao meio 1 e 2 na Figura 17.

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \tag{18}$$

$$\theta_i = \theta_r \tag{19}$$

Define-se a relação entre a pressão acústica transmitida e incidente como sendo o coeficiente de transmissão (Equação 20). Analogamente define-se o coeficiente de reflexão (Equação 21) como a relação entre a pressão acústica refletida e incidente.

$$T = \frac{p_t}{p_i} \tag{20}$$

$$R = \frac{p_r}{p_i} \tag{21}$$

Para o caso de incidência normal, as relações entre impedância acústica, coeficiente de transmissão e reflexão seguem as Equações 22, 23 e 24.

$$R + 1 = T \tag{22}$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \tag{23}$$

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{24}$$

Observando a Equação 24, verifica-se que se $Z_2 << Z_1$ tem-se $R \simeq -1$, o que significa reflexão total. No caso da condição $Z_2 = Z_1$, diz que o acoplamento está casado e está situação corresponde a máxima transferência de energia da onda de ultra-som de um meio para o outro.

Para o caso de incidência oblíqua em interfaces líquido-líquido, as Equações 25 e 26 relacionam a impedância acústica e seus coeficientes de reflexão e transmissão.

$$T = \frac{2Z_2 \cos\theta_i}{Z_2 \cos\theta_i + Z_1 \cos\theta_t} \tag{25}$$

$$R = \frac{Z_2 \cos\theta_i - Z_1}{Z_2 \cos\theta_i + \cos\theta_i Z_1} \tag{26}$$

Para o caso de incidência oblíqua em interfaces líquido-sólido, as condições são mais complexas, devido ao modo de propagação transversal que ocorre no sólido. Neste caso a impedância acústica da onda transversal é diferente da onda longitudinal, de acordo com CHEEKE (2002).

Neste trabalho, os transdutores são posicionados perpendicularmente à face das paredes dos dutos, com auxílio de sapatas. Devido a esta configuração de montagem ,a relação entre os coeficientes de transmissão e reflexão para interface sólido-líquido e a impedância acústica não dependem do ângulo de incidência e se aplicam as Equações de incidência normal 23 e 24.

3.1.4 Atenuação Acústica

A propagação da onda acústica em um meio apresenta perdas de energia devido a diversos mecanismos, entre eles a absorção pelo meio. Em líquidos, estas perdas são atribuídas à viscosidade e à condutividade térmica, normalmente chamada de atenuação clássica (CHEEKE,

2002).

Além da atenuação clássica, há outros fatores que podem reduzir a energia do sinal de ultra-som recebido, por exemplo, a divergência do feixe de onda, a dispersão devido à não homogeneidade do meio e a conversão em outros modos de vibração (ASSEF, 2006).

Desta forma, o escoamento bifásico é um meio que apresenta não homogeneidade, já que a não existe continuidade do fluido. Quando o feixe de ultra-som atravessa um fluido contendo substâncias, por exemplo, bolhas de ar, uma parte da energia é espalhada e absorvida pela descontinuidade do meio. Este efeito é devido à grande diferença de impedância acústica das fases constituintes do meio (XU; LEONARD; GREEN, 1985).

A atenuação do sinal de ultra-som pode ser modelada através de um decaimento exponencial (Equação 27), onde α [m^{-1}] é o coeficiente de atenuação (CHEEKE, 2002).

$$p(x) = p_0 e^{-\alpha x} \tag{27}$$

O coeficiente de atenuação também pode ser expresso, comumente, em dB/m (Equação 29).

$$\alpha[m^{-1}] = \frac{1}{x}\ln(\frac{p(x)}{p_0}) \tag{28}$$

$$\alpha[dB/m] = 20\log_{10}(e)\alpha[m^{-1}] \tag{29}$$

A escala dB é muito utilizada em análises no domínio da freqüência, devido as propriedades logarítmicas, onde as operações de divisão e multiplicação se transformam em subtração e soma, facilitando os cálculos e análises.

Neste trabalho, será analisado a atenuação em função da freqüência e conseqüentemente a Equação 29 em escala dB.

3.1.5 Geração e Recepção de Sinais de Ultra-Som

Para gerar uma onda de ultra-som, é necessário gerar um distúrbio mecânico e um meio material. Existem diversos métodos para gerar uma onda de ultra-som, incluindo a piezoeletricidade, eletrostrição, magnetostrição, eletromagnético (EMAT), geração por laser, etc.

Em 1880, os irmãos Curie descobriram o efeito piezoelétrico, que consiste na conversão de energia mecânica em elétrica, e existe o efeito piezoelétrico inverso, pelo qual a energia elétrica

é convertida em energia mecânica.

De todos os métodos, a piezoeletricidade é de longe a mais utilizada (CHEEKE, 2002). Os transdutores de ultra-som, baseados em materiais, são constituídos dos seguintes componentes principais (Figura 18):

- Elemento piezoelétrico;
- Camada de acoplamento acústico (casamento de impedância);
- Camada de retaguarda (*backing*);
- Casamento elétrico (normalmente 50 ohms);
- Conexão elétrica;
- Conector elétrico;
- Encapsulamento.

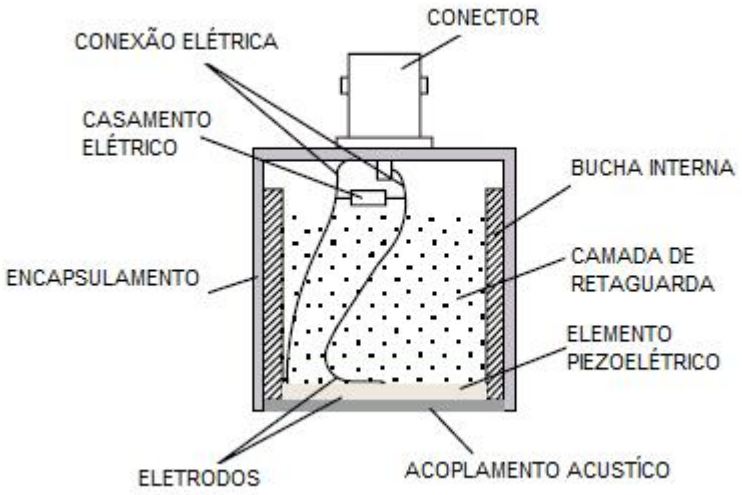


Figura 18: Transdutor de ultra-som
Fonte: (PANAMETRICS, 2005)

Os transdutores são normalmente excitados por pulsos retangulares com tensão na ordem de centenas de volts (valores típicos entre 100-400V) e largura dependendo da freqüência de ressonância do transdutor (Figura 19). Também podem ser excitados de forma contínua por uma senóide ou outra onda periódica, ou ainda, por alguns ciclos destes sinais, apresentando

tendo como restrição a potência que eles podem dissipar, que é em sinal da ordem de mW (valor típico para transdutores da PANAMETRICS: 125 mW).

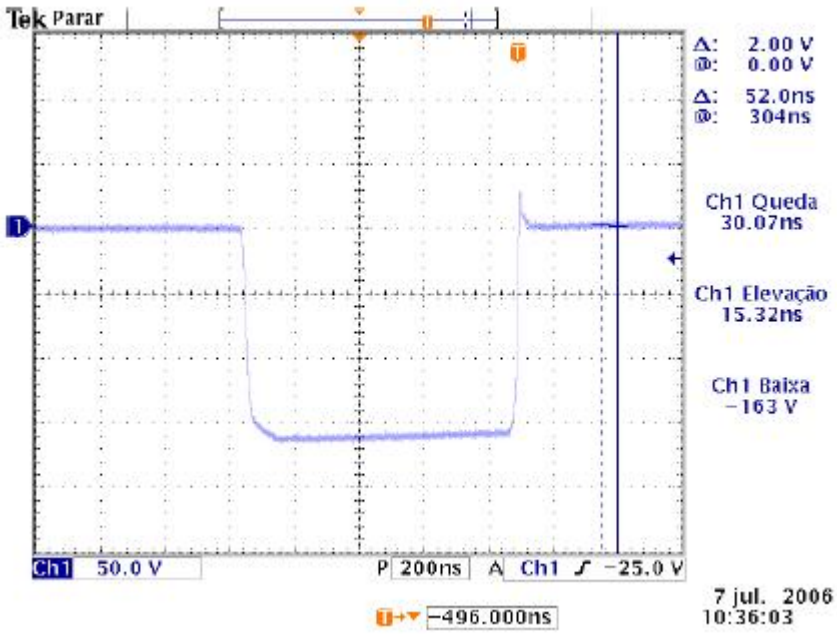


Figura 19: Pulso de excitação de 800 ns para um transdutor de ultra-som

Fonte: Autoria própria

O sinal recebido é da ordem de mV, necessitando um amplificador eletrônico para o condicionamento e digitalização do sinal. Cuidados devem ser tomados na construção do transdutor para que tenham características elétricas compatíveis com os cabos e circuitos condicionadores de sinal, assim evitando distorções na onda causadas pelo circuito eletrônico.

Além das características elétricas, normalmente é necessário utilizar algum líquido, geralmente glicerina, para acoplar o transdutor e a superfície da interface onde este é locado, visto que usualmente o material da superfície e do transdutor possuem uma grande diferença em suas impedâncias acústica, elevando a potência do sinal de ultra-som refletido.

3.2 ESCOAMENTO BIFÁSICO

O termo escoamento multifásico é utilizado para definir escoamentos em que o fluxo de um fluido apresenta mais de uma fase ou componente. Alguns classificam-os de acordo com o estado físico da matéria das diversas fases que compõem o escoamento, e portanto, se referem a escoamentos gás-sólido, líquido-sólido, borbulhante (líquido-gás) e assim por diante (BRENNEN, 2005). A definição de fase não é relativa ao estado da matéria (sólido, líquido,

gasoso, plasma), mas sim ao número de interfaces presentes no escoamento multifásico. Por exemplo, escoamento bifásico significa a presença de apenas uma interface, e pode ser do tipo líquido-líquido imiscíveis ou líquido-gás (SILVA; FILHO; PINHEIRO, 2000).

Uma das principais características dos escoamentos bifásicos é a geometria da distribuição de suas fases pelo duto, ou seja, sua topologia. Estas diversas topologias são conhecidas como padrões de escoamento.

De acordo com HERNáNDEZ et al. (2006), escoamentos bifásicos verticais são usualmente classificados em 5 padrões de escoamento de acordo com o formato, distribuição e densidade das interfaces. Considerando o fluxo ascendente de gás-líquido em um duto vertical com vazão constante, os padrões de escoamentos são detalhados a seguir (Figuras 20 e 21):

1. Escoamento Borbulhante : O líquido é a fase contínua e pequenas bolhas dispersas fluem no líquido. As bolhas estão distribuídas de maneira aproximadamente uniformes pela seção transversal.

2. Escoamento Cap-Borbulhante (Calotas Gasosas): O número de pequenas bolhas cresce e aparecem grandes bolhas esféricas, conhecidas como calotas gasosas que são formadas devido a coalescência das bolhas menores.

3. Escoamentos por Golfadas (*Slug*): A coalescência das calotas gasosas é elevada devido ao movimento turbulento do fluido e o diâmetro das bolhas se aproxima ao diâmetro do duto. Quando isto ocorre são formadas bolhas com o formato de uma bala de revólver, conhecidas como bolhas de Taylor. As bolhas de Taylor são separadas por golfadas de líquido contendo pequenas bolhas. Entre as bolhas de Taylor e as paredes do duto, o líquido escorre no sentido descendente formando um fino filme, apesar de o fluxo ser no sentido ascendente.

4. Escoamento Caótico-Turbulento (*Churn-Turbulent*): Quando a vazão de gás é elevada, ocorre a quebra das bolhas de Taylor que levam a um regime de fluxo instável e a continuidade das golfadas de líquido é repetidamente destruída. Este líquido se acumula, formando uma ponte, sendo novamente carregado pelo gás.

5. Escoamento Anular: A fase gasosa escoa continuamente no centro do duto e a fase líquida escoa nas parede do duto como um filme. Pequenas bolhas de líquido aparecem no meio do fluxo de gás, mas é incomum verificar gás no escoamento do filme de líquido.

Esta é uma classificação qualitativa. Em relação a parâmetros quantitativos, pode-se considerar a vazão de cada fase, o escorregamento de velocidade entre as fases ou ainda a concentração

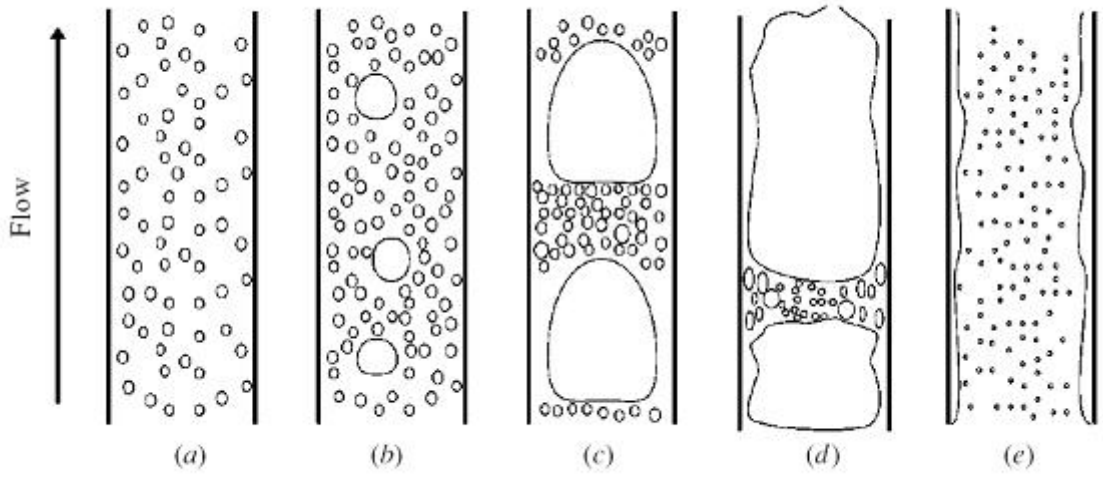


Figura 20: Padrões de escoamento bifásico vertical. (a) borbulhante, (b) cap-borbulhante (calotas gasosas), (c) golfadas (*slug*), (d) caótico-turbulento (*Churn-Turbulent*) e (e) anular

Fonte: (HERNáNDEZ et al., 2006)

volumétrica de cada fase. Estes parâmetros podem ser correlacionados com o padrão de escoamento fluindo no interior do duto.

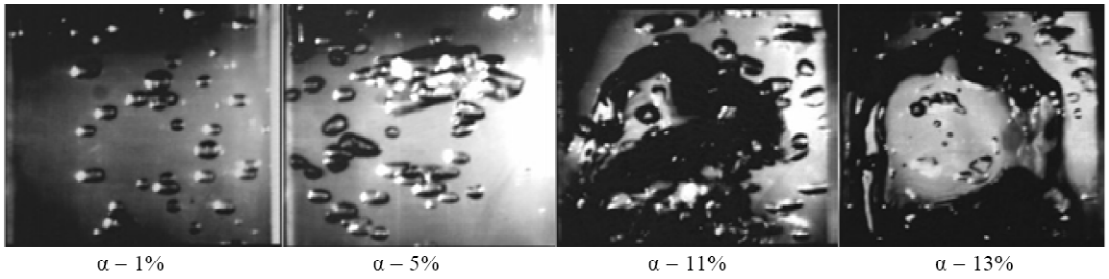


Figura 21: Padrões de escoamento: 1% (Borbulhante), 5% (Calotas Gasosas), 11% (Transição entre Calotas Gasosas e Golfadas), 13% (Golfadas)

Fonte: Autoria própria

Este trabalho se restringe ao escoamento bifásico vertical ascendente, entre água e ar, onde a fase contínua é a água.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As informações apresentadas neste capítulo são para o entendimento dos principais fenômenos de interação do sinal de ultra-som e o escoamento bifásico, sendo a velocidade do som e

atenuação do sinal os principais parâmetros da onda se ulta-som analisados.

Em especial, vale ressaltar que é estudado o escoamento água-ar, onde as reflexões na interface líquido-gás possuem $R \simeq -1$, o que significa reflexão total, gerando um multi-percurso do sinal de ultra-som pelo escoamento bifásico. Outro ponto, foi a escolha do posicionamento perpendicular dos transdutores a superfície do duto, evitando perdas nas reflexões devido ao ângulo de acoplamento entre as duas superfícies.

Este trabalho se restringe ao escoamentos borbulhantes, cap-borbulhante, golfadas e suas respectivas transições.

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o aparato experimental e os procedimentos realizados para a aquisição dos dados experimentais com escoamentos bifásicos água-ar. Também são apresentadas as técnicas utilizadas para o processamento do sinal de ultra-som.

4.1 APARATO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1.1 Montagem Experimental

Os experimentos foram realizados no LABPETRO na UNICAMP em um circuito construído especificamente para o estudo de medições de frações de vazio em escoamentos bifásicos água-ar vertical. A Figura 22 representa uma visão esquemática do equipamento de testes. O misturador água-ar consiste de um tanque de água no qual a parte inferior de um duto de acrílico com 54 mm de diâmetro interno está inserida. Dentro deste duto existe um meio poroso cilíndrico através do qual é injetado ar comprimido no fluxo de água.

A mistura ar-água ocorre no espaço anular entre o meio poroso e o duto acrílico e rapidamente evolui para o padrão de escoamento com bolhas. O espaço anular foi projetado de modo a garantir uma velocidade mínima do líquido, assegurando assim um processo de mistura adequado e estável.

Seguindo o fluxo a partir do misturador, uma seção com 3,5 m de comprimento do duto acrílico assegura o desenvolvimento hidrodinâmico do escoamento com bolhas antes que este entre na seção de teste para medição da fração de vazio.

A seção de teste é na verdade um segmento com 10 cm de comprimento do mesmo duto acrílico de 54 mm de diâmetro interno, no qual os transdutores de ultra-som estão localizados. Além disso, um transdutor de pressão por relutância variável inserido logo em seguida aos transdutores de ultra-som mede a pressão do fluxo; esta leitura é necessária para o cálculo da vazão de ar durante a realização dos testes.

Após a seção de testes, uma seção de duto acrílico de 1,6 m de comprimento descarrega

o escoamento bifásico água-ar em um separador de fase. Um dispositivo instalado nesta parte do sistema permite realizar medições para o cálculo da fração de vazio volumétrica, as quais podem ser usadas para corroborar os resultados obtidos com os sensores ultra-sônicos.

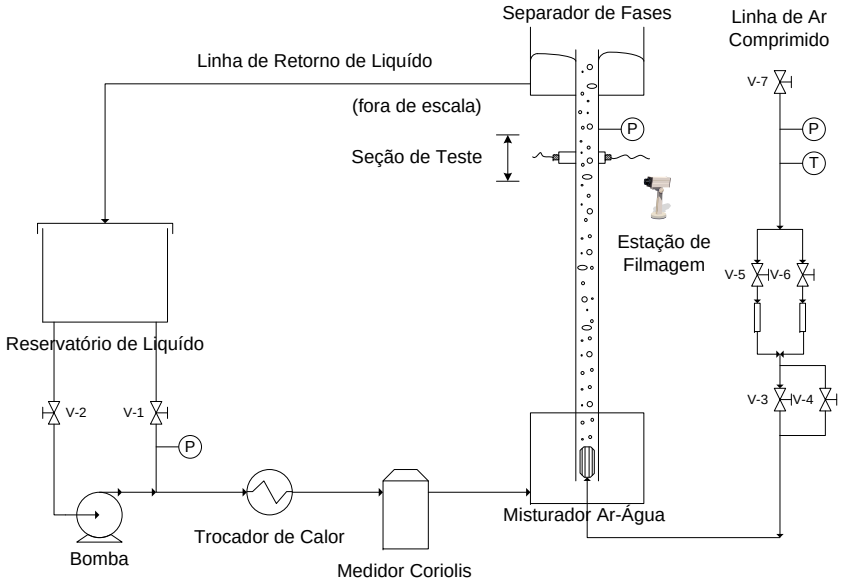


Figura 22: Esquemático do conjunto experimental

Fonte: Autoria própria

No separador, o ar é liberado para a atmosfera enquanto a água retorna por gravidade ao reservatório de líquido. Uma bomba centrífuga força então a água novamente para o misturador água-ar, fechando assim o circuito.

Um trocador de calor localizado na saída da bomba é usado para restringir as variações na temperatura da água; o meio refrigerante é água corrente à temperatura ambiente. Um inversor de freqüência permite uma variação na vazão de água de 0 a 5000 kg/hr. A vazão da água é medida por um medidor de vazão por efeito Coriolis modelo Rheonik RHM12, o qual inclui um RTD para medições de temperatura. A vazão de ar é medida pelos elementos de vazão laminar modelos 50MJ10-9 e 50MJ10-12.

Transdutores de pressão modelo PX 750 Omega, medindo de 0 a 700 mmH2O, são usados para medir a diferença de pressão entre os elementos de vazão laminar. Um transdutor de pressão idêntico, situado logo após os elementos de vazão laminar, faz a leitura da pressão na

vazão de ar. Medições da pressão atmosférica provêm da estação meteorológica da Universidade Estadual de Campinas, informadas continuamente pela Internet.

Um termopar tipo J mede a temperatura do ar fluindo. Manômetros tipo Bourdon e termopares permitem uma verificação de redundância destes parâmetros digitais automáticos bem como um monitoramento visual da correta operação do circuito.

4.1.2 Instrumentação Ultra-Sônica

A Figura 23 apresenta uma vista esquemática da instrumentação na seção de teste. Dois adaptadores em acrílico, com 40 mm e 10 mm de comprimento, foram desgastados com o uso de máquinas em um dos lados para se adaptar exatamente à superfície externa dos dutos de acrílico. Os transdutores de ultra-som, emissor e receptor, foram então fixados nas superfícies opostas dos adaptadores de 40 mm e 10 mm, respectivamente; particularmente para o transdutor emissor esta montagem garante que o campo próximo do campo acústico se localize no bloco de 40 mm de acrílico, e não no escoamento bifásico (PANAMETRICS, 2005).

Uma fina camada de vaselina foi aplicada à face frontal dos transdutores antes da montagem para melhorar o acoplamento acústico do arranjo. O trajeto ultra-sônico emissor-receptor é composto por 40 mm de bloco de acrílico no lado do emissor, 3 mm de acrílico da parede do duto, 54 mm de escoamento bifásico dentro do duto, mais 3 mm de acrílico da parede do duto, e 10 mm de bloco de acrílico no lado do receptor. Em outras palavras, o caminho completo percorrido pela onda ultra-sônica consiste de um segmento de 43 mm através do acrílico na parte do emissor, 54 mm através do escoamento, e outro segmento de 13 mm através do acrílico na parte do receptor. Ao se verificar o tempo de trânsito da onda ultra-sônica a espessura da camada de vaselina foi desconsiderada.

O transdutor emissor gera um pulso de ultra-som dentro da faixa recomendada para sinais transmitidos na água. Para a excitação dos transdutores e aquisição dos sinais de ultra-som provenientes dos receptores foi usado um sistema desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná com 3 canais de ultra-som no modo transmissão-recepção. Os dados são armazenados em arquivos em um computador pessoal, que podem ser lidos em aplicativos para análise e tratamento de sinais, por exemplo, MATLAB e similares.

4.1.3 Procedimento Experimental

Nos trabalhos iniciais sobre o estudo da técnica de ultra-som neste aparato experimental foi observado um grande espalhamento nos dados acústicos devido ao sistema de aquisição

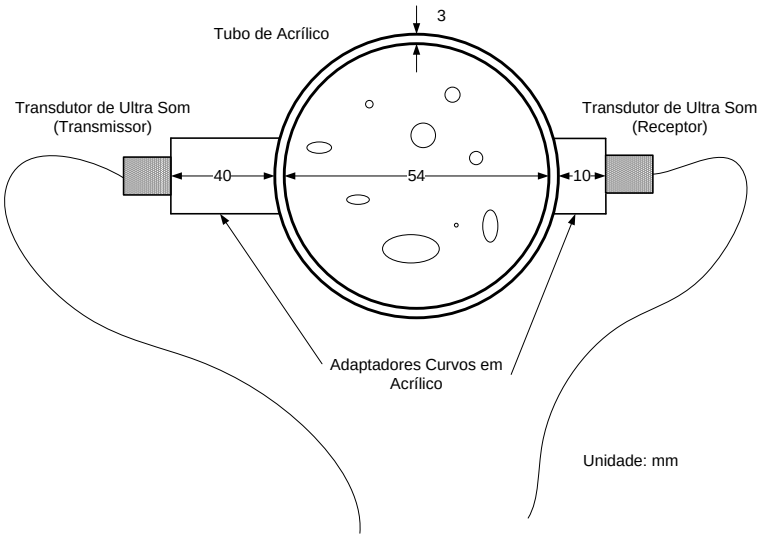


Figura 23: Montagem da instrumentação ultra-sônica

Fonte: Autoria própria

(VASCONCELOS et al., 2006; CARVALHO et al., 2007a). O sistema de aquisição utilizado neste trabalho reduz este espalhamento devido a sua grande capacidade de memória e a sua especificidade à aplicação. A seguir é apresentado o procedimento experimental que foi utilizado para a aquisição dos dados:

- A taxa de repetição de pulsos (PRF) foi escolhida como 8,45 kHz (1 onda a cada 118,34 μs), que é a máxima taxa para que duas ondas e seus ecos não se sobreponham.
- A taxa de amostragem foi de 20 Msps a 12 bits (SBALQUEIRO, 2006), para evitar *aliasing* e reduzir os erros de quantização devido a conversação analógico-digital.
- Foram adquiridos 131.068 ondas por experimentos, o que equivale ao tempo de 15,61 segundos de aquisição contínua
- A vazão de água foi mantida o mais constante possível, enquanto a vazão de ar era ajustada até atingir a fração de vazios desejada. A fração de vazios foi calculada de acordo com DIAS; FRANçA; ROSA (2000).
- A água no circuito de teste foi forçada a passar por um trocador de calor, resfriado com água à temperatura ambiente. Assim a variação da temperatura da água no circuito foi minimizada, praticamente se manteve à temperatura ambiente.

- O sinal de referência foi adquirido com escoamento de água líquida monofásica e à temperaturas próximas àquela que foi realizado o experimento, com isso reduzindo as discrepâncias devido aos efeitos da temperatura.
- Para cada fração de vazio foram realizados dez experimentos de 15,61 segundos, onde a cada cinco experimentos era realizada uma das condições de operação da montagem.
- Foram adquiridos dados para escoamentos de 1% a 16% de fração de vazios em passos de 1%.

Foi assim possível reduzir a dispersão dos dados, com isso, o assegura-se que espalhamento dos dados é devido a efeitos da natureza do escoamento bifásico, assim possibilitando uma análise confiável do fenômeno de interação entre a onda de ultra-som e o escoamento bifásico.

4.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Para atender às especificações de alta PRF e freqüência amostragem foi utilizado um sistema de aquisição dos dados de ultra-som desenvolvido por NEVES et al. (2006).

Este sistemas é compostos de duas placas, uma de aquisição e excitação dos transdutores e a placa de processamento (Figuras 24 e 25).

A placa de aquisição é composta por 3 canais independentes com conversores analógicos digitais com taxa de amostragem de 20, 40 ou 80 Msps e quantização de 12 bits como recomendado por SBALQUEIRO (2006). O estágio de amplificação é composto por amplificadores com banda passante de 600 MHz e ganho controlado digitalmente de -7dB até 39dB. A impendância de entrada é de 50 ohms, compatível com os transdutores comercialmente disponíveis que foram utilizados.

O circuito de excitação gera um pulso retangular com tensão negativa com a largura necessária para excitar o transdutor. Ele também permite a excitação com PRF de 8,45 kHz, que é o limite para não danificar o transdutor e evitar que duas ondas se sobreponham. Vale salientar que devido a esta taxa de PRF é possível reduzir os espalhamento nos dados encontrados em VASCONCELOS et al. (2006)e CARVALHO et al. (2007a).

A placa de processamentos controla todos os periféricos da placa de aquisição e possui 64 Mbytes de memória SDRAM para o armazenamento dos sinais de ultra-som, para posterior processamento o que permite armazenar 131.068 sinais de ultra-som (15,51 segundos) de cada experimento. A placa de processamento possui capacidade de processamento para execução dos algoritmos propostos neste trabalho em tempo real.

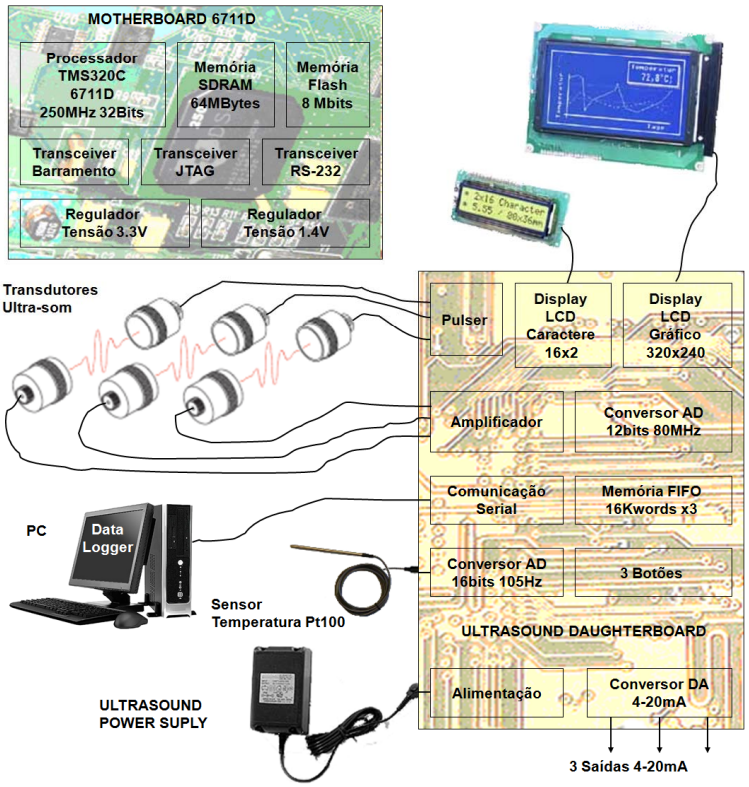


Figura 24: Diagrama em blocos do sistema de aquisição e processamento

Fonte: Autoria própria

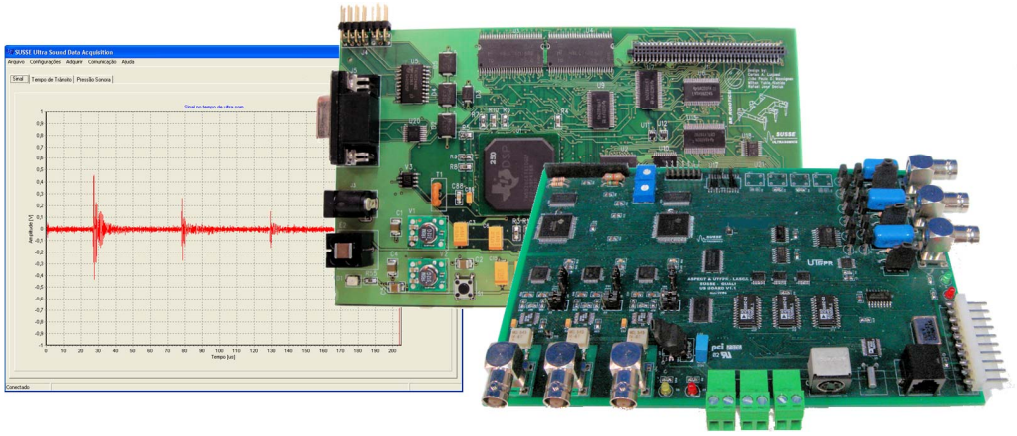


Figura 25: Sistema de aquisição e processamento

Fonte: Autoria própria

Para a transferência de dados foi utilizado uma interface USB 2.0 que permite taxas de 480 Mbits/s.

4.3 PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE ULTRA-SOM

O sinal de ultra-som fornece diversas informações sobre as propriedades físicas, químicas ou estado físico do meio que ele atravessa. Estas informações são obtidas através de parâmetros da onda de ultra-som como velocidade, amplitude, energia e espectro de freqüência do sinal. Para correlacionar estes parâmetros com a fração de vazios, é necessário processar este sinal a fim de obter quais parâmetros são afetados pelo escoamento bifásico.

Além da tradicional técnica da atenuação da amplitude máxima do sinal de ultra-som, são propostas a normalização do sinal como um todo pelo primeiro eco e análise da atenuação no domínio da freqüência para análise do escoamento bifásico.

A possibilidade de aplicação destas técnicas se baseia no aumento da capacidade de processamento que os processadores digitais de sinais atualmente oferecem, o que permite a utilização de técnicas mais complexas de análise em um tempo aceitável para aplicação em processos industriais.

As seções seguintes apresentam a modelagem matemática destas técnicas.

4.3.1 Média Coerente ou Promediação

Neste trabalho foi utilizada a média coerente como pré-processamento do sinal. Esta técnica permite filtrar o ruído que está no sinal e gerar um sinal representativo médio daquele que interagiu com o escoamento bifásico.

A média coerente é calculada de acordo com a Equação 30.

$$y[n] = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^{N} x_i[n] \tag{30}$$

A média coerente é muito utilizado em aplicações médicas, como no caso dos sinais de ECG (BARBOSA, 2003), melhorando a relação sinal ruído (Figura 26). ZHENGH; ZHANG (2004) utilizaram esta técnica em 200 sinais de ultra-som para a análise de escoamentos líquido-gás-sólido.

Além de gerar um sinal representativo, este pré-processamento reduz a quantidade de dados a serem processados pelas técnicas mais complexas. Neste trabalho cada experimento gerou 65

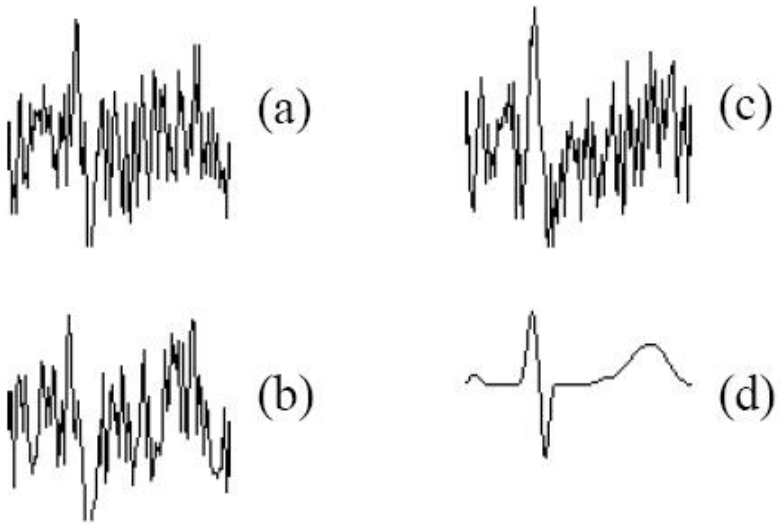


Figura 26: (a), (b) e (c) Sinais de ECG sem processamento (d) Média de 100 sinais, elevando a SNR
Fonte: Autoria própria

MB de dados em 15,51s de aquisição. Como foram dez experimentos para cada fração de vazios, o total a ser analisado é de 650 MB de dados.

Para a análise de cada experimento, os dados adquiridos foram dividos em cinco partes e cada parte gerou um sinal médio (equação 30) referente a uma janela de 3,1 s de escoamento. A quantidade de dados foi reduzida de 65 MB por experimento para apenas 2560 bytes por experimento pré-processado pela técnica de média coerente.

4.3.2 Velocidade do Som

Para o cálculo da velocidade do som, é medido o tempo que a onda leva para ir do transmissor ao receptor, que é conhecido como tempo de trânsito. Esta característica é alterada de acordo com o meio que a onda de ultra-som atravessa. Esta parâmetro é utilizado como princípio básico em muitos medidores de vazão baseados em ultra-som (LYNNWORTH, 1975; WEBSTER, 1999).

Neste trabalho para o cálculo da velocidade do som se aplicam as Equações 31 e 32, onde velocidade do som de referência utilizado é a água líquida monofásica.

$$\triangle t = t_{ref} - t_{\alpha} = \frac{d}{c_{ref}} - \frac{d}{c_{\alpha}} \tag{31}$$

$$c_\alpha = \frac{d * c_{ref}}{(d - \triangle t * c_{ref})} \tag{32}$$

Em geral, a velocidade do som em um meio também depende da freqüência fundamental do pulso ultra-sônico. Nestes casos é importante levar em consideração as diferentes velocidades apresentadas pelo sinal, como a velocidade de fase, velocidade de grupo e a velocidade do sinal (WEAR, 2000).

Geralmente, para se realizar medidas da velocidade da onda de ultra-som no meio utiliza-se a diferença de tempo de trânsito do sinal recebido com o tempo de trânsito de um sinal de referência previamente conhecido. Para se determinar esta diferença tempo de trânsito, normalmente utiliza-se a diferença de tempo entre marcas no sinal (Figura 27) tais como (WEAR, 2000):

- Primeiro ou segundo máximo ou mínimo do sinal;
- Primeiro desvio detectável do zero;
- Limiar de 10% do máximo valor;
- Limiar de 3 desvios padrões do ruído;
- Primeiro cruzamento com zero;
- Cruzamento específico com zero;
- Primeiro ao quarto cruzamento com zero;
- Cruzamento com zero da primeira inclinação negativa.

Além das marcas citadas acima é possível medir este tempo através das seguintes técnicas:

- Pico da envoltória do sinal;
- Fase da transformada de Hilbert da correlação com um sinal de referência (SBALQUEIRO, 2006).

Em CARVALHO et al. (2007b) é definido o tempo de trânsito ponderado pela energia com objetivo da caracterização do escoamento bifásico, e também é apresentado uma análise entre a duração do pulso de ultra-som e o escoamento bifásico.

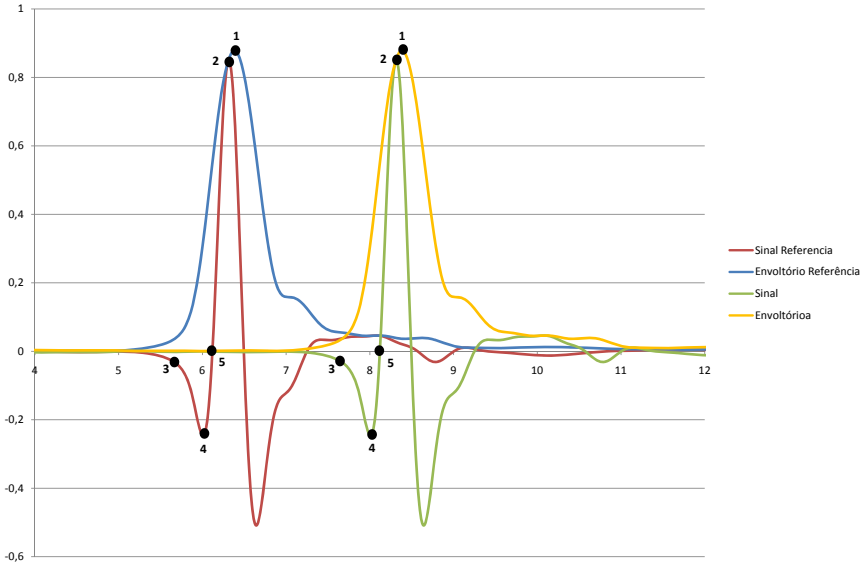


Figura 27: Medição da Velocidade do Som - Velocidade de Grupo: (1) Envoltório / Velocidade de Fase: (2) Primeiro Máximo (3) Limiar (4) Pico Negativo (5) Cruzamento com Zero

Fonte: Autoria própria

A escolha do método a ser utilizado para determinar a velocidade do som, deve levar em consideração a aplicação e a capacidade de processamento disponível. Técnicas que necessitam calcular o envoltório do sinal ou a transformada de Hilbert, consomem um tempo de processamento maior, devido a sua complexidade, do que simplesmente determinar uma marca fixa no sinal, como por exemplo, o valor máximo do sinal. Para cada aplicação é necessário verificar a influência do método no cálculo da velocidade do som.

Este trabalho irá analisar a influência entre a fração de vazios e alguns métodos de determinação do tempo de trânsito, verificando a possibilidade do uso da velocidade do som como parâmetro para determinação da fração de vazios.

4.3.3 Energia e Amplitude Máxima Normalizada do Sinal de Ultra-Som

Um dos parâmetros mais analisados e utilizados nas técnicas de análise de escoamentos bifásicos é a amplitude do sinal. Para medição da fração de vazios, esta amplitude sofre atenuação dependendo tanto da freqüência do transdutor, como do tamanho médio das bolhas. Assim a amplitude do sinal e a atenuação necessitam de calibração para cada aparato experimental.

O princípio básico é que com o aumento da fração de vazios é esperado o aumento da atenuação do sinal de ultra-som e com isso a redução de amplitude máxima e energia recebida pelo transdutor. Utilizando uma referência sem escoamento bifásico, pode-se estimar a fração de vazios média durante um certo período.

Para verificar esta atenuação, mede-se a amplitude máxima normalizada (Equação 34) ou a energia do sinal normalizado (Equação 36). Estas equações são aplicadas no resultado obtido pelo pré-processamento utilizando a média coerente.

Diversas técnicas que utilizam a tecnologia de ultra-som necessitam de um sinal de referência para realizar uma normalização e calibração das medidas. Esta referência usualmente é a água líquida monofásica.

Como referência foi utilizado água líquida monofásica da tubulação do aparato experimental. Nas equações a seguir o índice i, indica o i-ésimo experimento e Ref o sinal de referência.

$$A_i = max\{v_i(t)\} \tag{33}$$

$$A_{N_i} = \frac{A_i}{A_{Ref}} \tag{34}$$

A energia de um sinal é diretamente proporcional ao quadrado da sua amplitude (HAYKIN; VEEN, 1999), com isso as Equações 35 e 36 são utilizadas para o cálculo da Energia Normalizada do sinal. Como referência, para normalização, também foi utilizado água líquida monofásica na tubulação do aparato experimental.

$$E_i = \int v_i^2(t)dt \tag{35}$$

$$E_{N_i} = \frac{E_i}{E_{Ref}} \tag{36}$$

4.3.4 Normalização do Sinal de Ultra-Som

A necessidade de uma referência leva a uma constante calibração do sistema de medição, o que não é aceitável na maioria das aplicações industriais de processos contínuos. Além dos padrões de escoamento bifásico, é também possível que as características químicas e físicas dos fluidos sejam alteradas. Logo é um grande avanço utilizar um parâmetro na própria onda

de ultra-som para a sua normalização, conferindo a técnica de medição por ultra-som maior confiabilidade e robustez, com isso evitando constantes aferições. Além do mais, seria mais um parâmetro a ser utilizado para a avaliação do escoamentos bifásico.

Em HOPPE et al. (2001) é realizado um estudo para elevar a precisão da medida dos parâmetros do sinal de ultra-som em um sensor de densidade. É apresentado a influência das bolhas de ar na medição da velocidade do som e na amplitude do sinal. Neste trabalho é realizado o estudo com escoamento bifásico nitrogênio e água até 3,3 % de fração de vazios e bolhas com tamanhos na faixa de 0,25 a 1,5 mm de diâmetros e sistema de processamento digital de sinais com taxa de amostragem de 20 MHz.

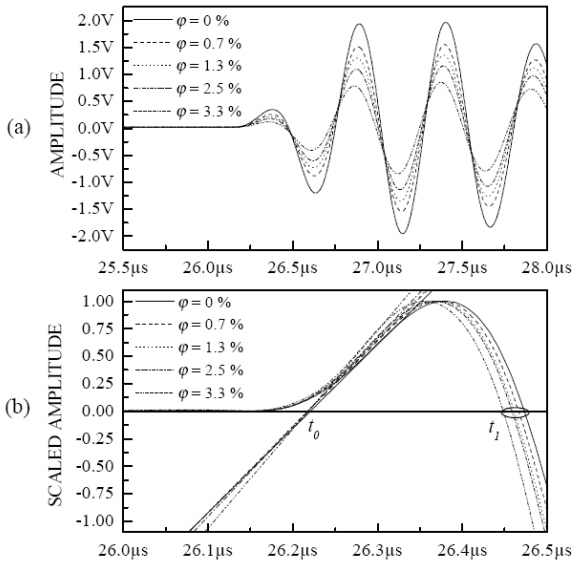


Figura 28: (a) Sinal Recebido (b) Sinal Normalizado e Tangente do ponto de maior inclinação

Fonte: (HOPPE et al., 2001)

De acordo com HOPPE et al. (2001), o tempo de chegada não se altera com o escoamento bifásico, assim a velocidade do som é constante. Para conseguir medir a velocidade do som, sem a influência do escoamento bifásico, HOPPE et al. (2001) normalizam o sinal pelo máximo valor do primeiro vale e utilizam a tangente no ponto de maior inclinação da curva na primeira parte do sinal (Figura 28), pois este é menos influenciado pelo escoamento bifásico. Neste método, o erro de medição da velocidade do som cai de 1,7 m/s pelo método clássico para 0,2 m/s com este novo método.

Na análise deste trabalho é proposto utilizar o valor absoluto do primeiro vale (Figura 29) para normalizar o sinal (Equação 37 e Figura 30), baseado na premissa de que este sofre menor

influência do escoamento bifásico como em HOPPE et al. (2001).

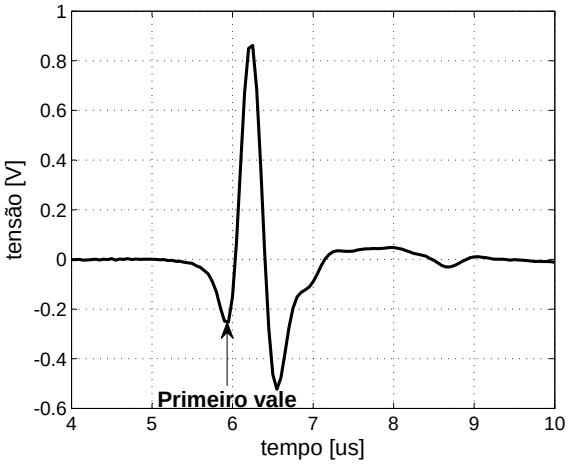


Figura 29: Primeiro vale do sinal de ultra-som

Fonte: Autoria própria

$$s_{N_i}(t) = \frac{v_i(t)}{|primeiro\{min\{v_i(t)\}\}|} \tag{37}$$

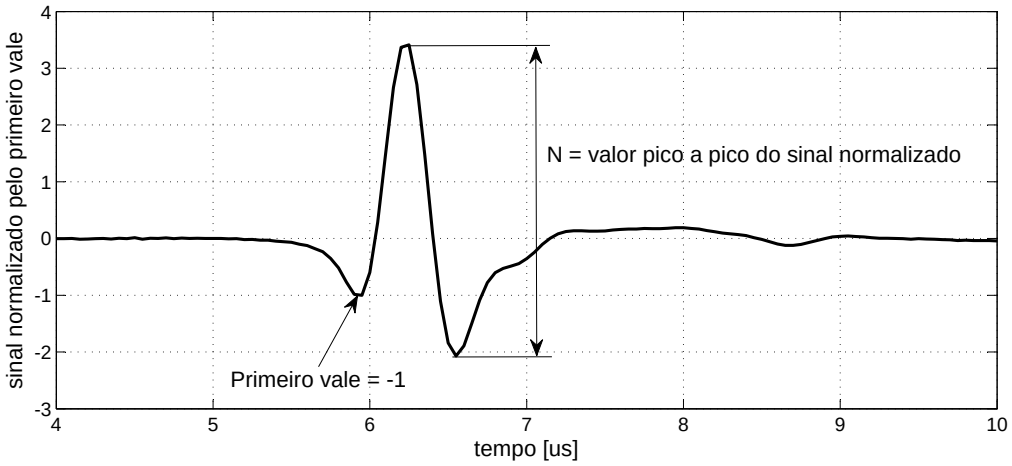


Figura 30: Sinal de ultra-som normalizado pelo primeiro vale

Fonte: Autoria própria

Após a normalização do sinal, é utilizado o valor pico a pico do sinal normalizado (Equação 38) como parâmetro para correlacionar com a fração de vazios.

$$N_i = max\{s_{N_i}(t)\} - min\{s_{N_i}(t)\} \tag{38}$$

Assim como para o cálculo da energia e da amplitude máxima do sinal de ultra-som, o sinal utilizado para ser normalizado é a média coerente calculada no pré-processamento do sinal de ultra-som.

O primeiro vale do sinal de ultra-som que atravessa o escoamento bifásico é o menos afetados pelas interferências construtivas e destrutivas, devido ao multi-percurso ocasionado pela reflexões líquido-gás (reflexão total da onda de ultra-som com as bolhas de ar). Este multipercurso tende a deformar o sinal no domínio do tempo, além de atenua-lo. Isto ocorre, pois o primeiro vale é o primeiro a chegar ao receptor com a amplitude atenuada em reação a água líquida monofásica. Esta atenuação ocorre, pois ainda há uma parte do primeiro vale sofrendo múltiplas reflexões e deformando o sinal.

4.3.5 Atenuação do Ultra-Som em Banda Larga - BUA

A análise de atenuação do ultra-som utilizando o pico do sinal no domínio do tempo é uma análise em apenas uma das diversas freqüências que compõem o sinal de ultra-som. Geralmente os transdutores são excitados com um pulso estreito gerando um sinal com múltiplas freqüências, ou seja, um sinal com uma banda larga de freqüências.

Quando um sinal em banda larga de ultra-som atravessa um meio, a forma de onda do pulso se modifica como resultado da atenuação e dispersão do meio. Também como resultado, as altas freqüência são mais atenuadas que as baixas freqüências. Depois de atravessar o meio, o sinal não somente sofre uma redução de escala em relação ao sinal original, mas também modifica sua forma (HE, 1998).

As técnicas de análise do domínio da freqüência são muito utilizadas em aplicações na área de processamento de sinais, como a análise do Diagramas de Bode em projetos de filtros, modelos não paramétricos na identificação de sistemas dinâmicos, série e transformada de fourier na análise de características como freqüência de ressonância, banda passante, fator de qualidade de filtros, análise de harmônicos em redes elétricas entre outras aplicações.

Devido a interação entre um meio e o sinal de ultra-som ter características de um filtro passa-baixas, é conveniente utilizar um método que analise a atenuação em função da freqüência. Esta análise é realizada no domínio da freqüência.

Um dos parâmetros do sinal de ultra-som, no domínio da freqüência, é a a taxa de atenuação

em uma determinada faixa de freqüências, conhecida como *Broadband Ultrasound Attenuation* (BUA). A BUA vem sendo utilizado por vários autores da área médica como um parâmetro de quantificação de massa de diferentes materiais, entre eles o osso, no diagnóstico da osteoporose. (ASSEF, 2006).

A medida da BUA do osso calcâneo (calcanhar) para diagnóstico de osteoporose foi descrita pela primeira vez em 1984 por Langton e seus colaboradores, e atualmente é uma técnica consagrada para este fim, com no mínimo sete fabricantes mundiais deste tipo de equipamentos (LANGTON; NJEH, 2008).

Para o cálculo do BUA, é considerado que o coeficiente de atenuação pode ser interpolado por uma função linear de acordo com a freqüência (Equação 39), dentro de uma determinada faixa de freqüências ($BW = f_{hi} - f_{lo}$). O coeficiente angular m desta reta é conhecido como BUA normalizado (nBUA) e utilizando a escala em dB, possui unidade de dB/(Hz.m).

$$\alpha(f) = m * f + \alpha_0 \tag{39}$$

Geralmente os dados são coletados utilizando-se o método transmissão-recepção e, desta forma, é possível compensar as variações da amplitude do sinal com a freqüência para um determinado par de transdutores (MAIA, 2001).

Para se determinar a BUA de um material, é necessário comparar o espectro do sinal ultrasônico de um material de referência na faixa de freqüências desejada, por exemplo, da água degaseificada (faixa de freqüências de 0,2 MHz a 0,7 MHz), com o espectro do sinal obtido após propagação através do material (MAIA, 2001) (Figura 31).

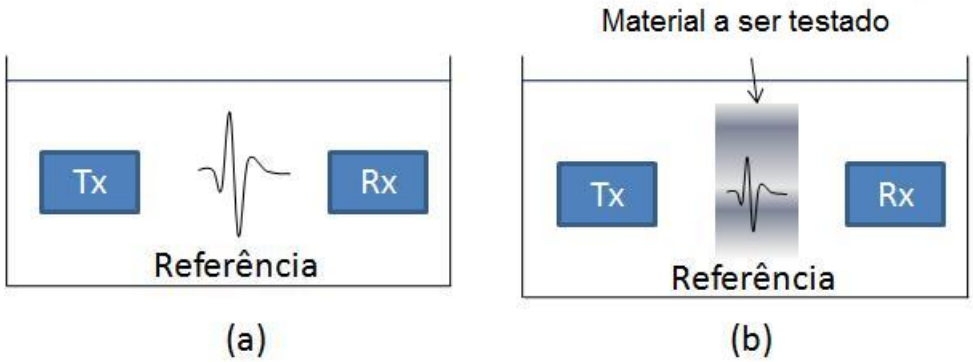


Figura 31: (a) Transmissão sem material (b) Transmissão com material - Tx: Transmissor e Rx: Receptor

Fonte: Autoria própria

O resultado desta comparação, que é feita subtraindo-se um espectro do outro em escala dB (Equação 41), resulta em uma região onde há uma relação aproximadamente linear, entre a atenuação e a freqüência, para a qual pode-se aplicar uma regressão linear (Equação 39), cujo coeficiente angular é o próprio índice BUA com unidade em dB/Hz (MAIA, 2001). Para o cálculo do espectro de freqüência do sinal de referência e do sinal medido, utiliza-se a Transformada de Fourier (OPPENHEIM; WILLSKY, 1996; HAYKIN; VEEN, 1999) . O índice BUA e o BUA normalizado possuem unidades diferentes, pois o BUA normalizado (nBUA) é o índice BUA divido pela distância entres os transdutores.

$$\alpha(f) = \frac{\arg(V(f))}{\arg(V_{Ref}(f))} \tag{40}$$

$$\alpha(f) = 20 * \log_{10}[\arg(V(f))] - 20 * \log_{10}[\arg(V_{Ref}(f))] \tag{41}$$

A Equação 41 é equivalente ao módulo da resposta em freqüência de um filtro em escala dB, conhecido como Diagrama de Bode. Este tipo de análise apresenta quais as freqüências sofrem maior atenuação pelo escoamento bifásico.

A Figura 32 apresenta o sinal de referência e o sinal que atravessou o material a ser testado no domínio do tempo. As Figuras 33 e 34 apresentam o o resultado do cálculo da Transformada de Fourier e Atenuação do Sinal (Equação 41) para uma determinada faixa de freqüência. Observa-se nas Figuras 33 e 34 que a banda passante do sinal de ultra-som é considerável, na ordem de MHz, por isso a atenuação do ultra-som é chamada de banda-larga.

No diagnóstico de osteoporose, a Densiometria Mineral Óssea (DMO) utiliza o princípio de que o aumento de vazios nos ossos modifica a BUA. Similarmente, neste trabalho, é proposto realizar uma análise no domínio da freqüência do sinal de ultra-som que atravessa o escoamento bifásico, onde o nBUA irá medir o aumento da fração de vazios no escoamento bifásico, ou seja, o escoamento bifásico será o material a ser testado. Esta é uma proposta inovadora apresentada nesta dissertação, a adoção de uma técnica utilizada no diagnóstico médico na área de instrumentação industrial.

De acordo com a seção de teste utilizada (Figura 35), observa-se que o caminho 1, 2, 3, 4 e 5 é o mesmo a seção preenchida com água líquida monofásica (caminho 3) ou pelo escoamento bifásico.

Outra consideração é que o coeficiente de reflexão e transmissão nas interfaces 2-3 e 3-4 na média não se alteram, independente do tipo de escoamento no interior da tubulação, pois a água

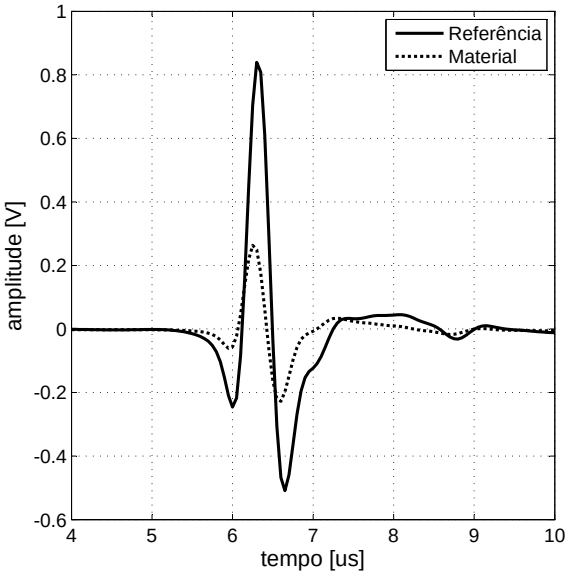


Figura 32: Sinais de Ultra-Som no Domínio do Tempo

Fonte: Autoria própria

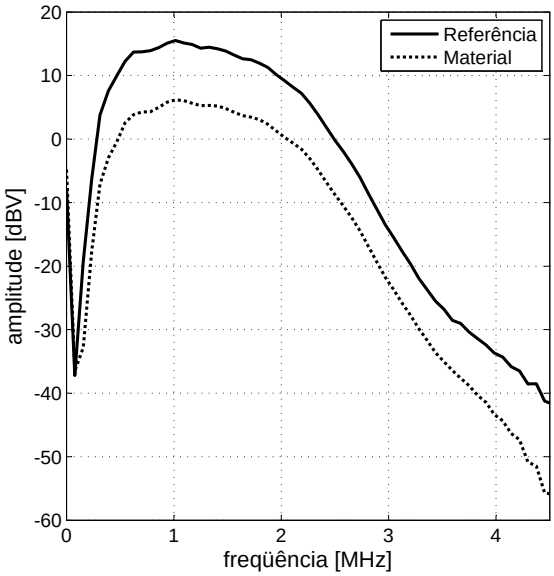


Figura 33: Sinais de Ultra-Som no Domínio da Freqüência

Fonte: Autoria própria

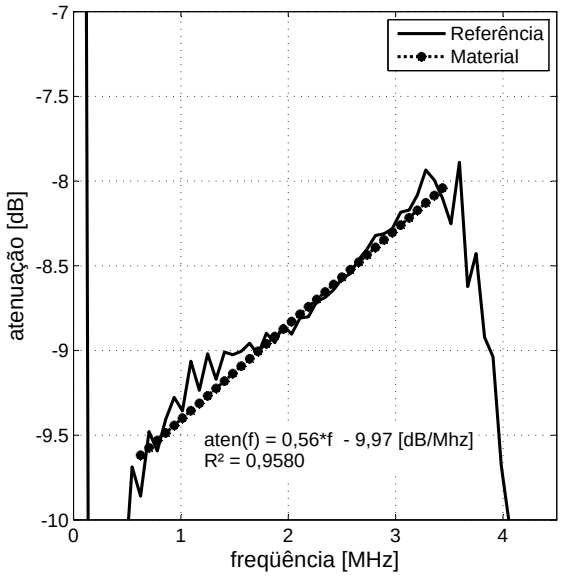


Figura 34: Atenuação do Ultra-Som em Banda Larga

Fonte: Autoria própria

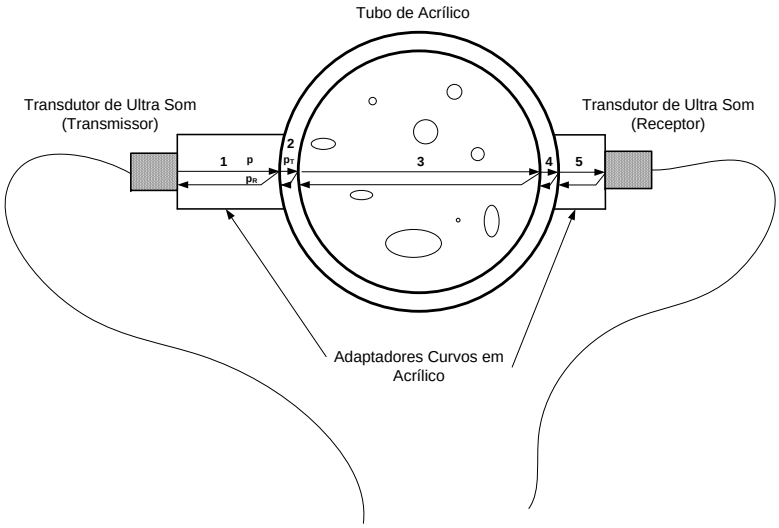


Figura 35: Reflexões e Transmissões do Sinal de Ultra-Som na Seção de Teste

Fonte: Autoria própria

líquida é o fluido em contato constante com as paredes internas da tubulação.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou o aparato experimental e a instrumentação ultra-sônica utilizada nesta pesquisa. A Seção 4.3.5 apresentou as técnicas e equações aplicadas no sinal de ultra-som, sendo importante ressaltar a modelagem por Atenuação do Ultra-Som em Banda Larga é utilizada em diagnósticos médicos. Neste trabalho esta técnica foi aplicada como método de análise do escoamento bifásico.

5 RESULTADOS

O levantamento de dados experimentais foi realizado no LABPETRO/UNICAMP em um circuito multifásico com o auxílio do *hardware* e *softwares* desenvolvidos no LASCA/UTFPR e descritos neste trabalho na Seção 4.2. A fase contínua do escoamento foi água e a fase dispersa o ar comprimido. Não houve controle de temperatura, apenas medição.

Foram realizados testes cobrindo a faixa de 0 % (referência com a água líquida monofásica) a 16 % de frações de vazios num escoamento água-ar. Para cada valor nominal de fração de vazios foram realizados dez amostras, totalizando 170 conjuntos de pulsos ultra-sônicos. Cada amostra teve duração de 15,51 segundos, durante as quais foram adquiridos 131.068 sinais de ultra-som por experimento. A taxa de repetição utilizada foi de 8,45 kHz.

O sinal de ultra-som foi amostrado a uma freqüência de 20 Msps com 12 bits de resolução (Figura 36). Cada sinal possui 256 pontos e cada ponto é armazenado em uma palavra de 2 bytes, totalizando aproximadamente 64 MB por amostra. O conjunto total de dados analisados possui 10,63 GB.

O ganho do amplificador foi mantido em um valor constante mantendo uma relação de compromisso entre não saturar o amplificador quando o sinal atravessa a referência e a necessidade de amplificar o sinal a 16 % de fração de vazios. A faixa de tensão de saída do amplificador diferencial ficou entre -1 V e +1 V.

Cada experimento individual, com 131.068 sinais (15,51 s), foi divido em cinco partes iguais, equivalendo a uma janela de 3,1 s por parte. Uma vez que foram realizados dez amostras por fração de vazios e a divisão em cinco conjuntos por experimento resultou em 50 conjuntos de dados por fração de vazios. A cada conjunto com 26.213 sinais (3,1 s) foi aplicado o cálculo de média coerente, como descrito na Seção 4.3.1 (Figura 37). Aos 50 sinais médios é que foram aplicados os métodos descritos neste trabalho.

O uso da média coerente permitiu reduzir significativamente a quantidade de dados, e conseqüentemente, o tempo de processamento. ZHENGH; ZHANG (2004) realizam uma média de 200 pulsos a uma taxa de repetição de pulsos de 1000 Hz.

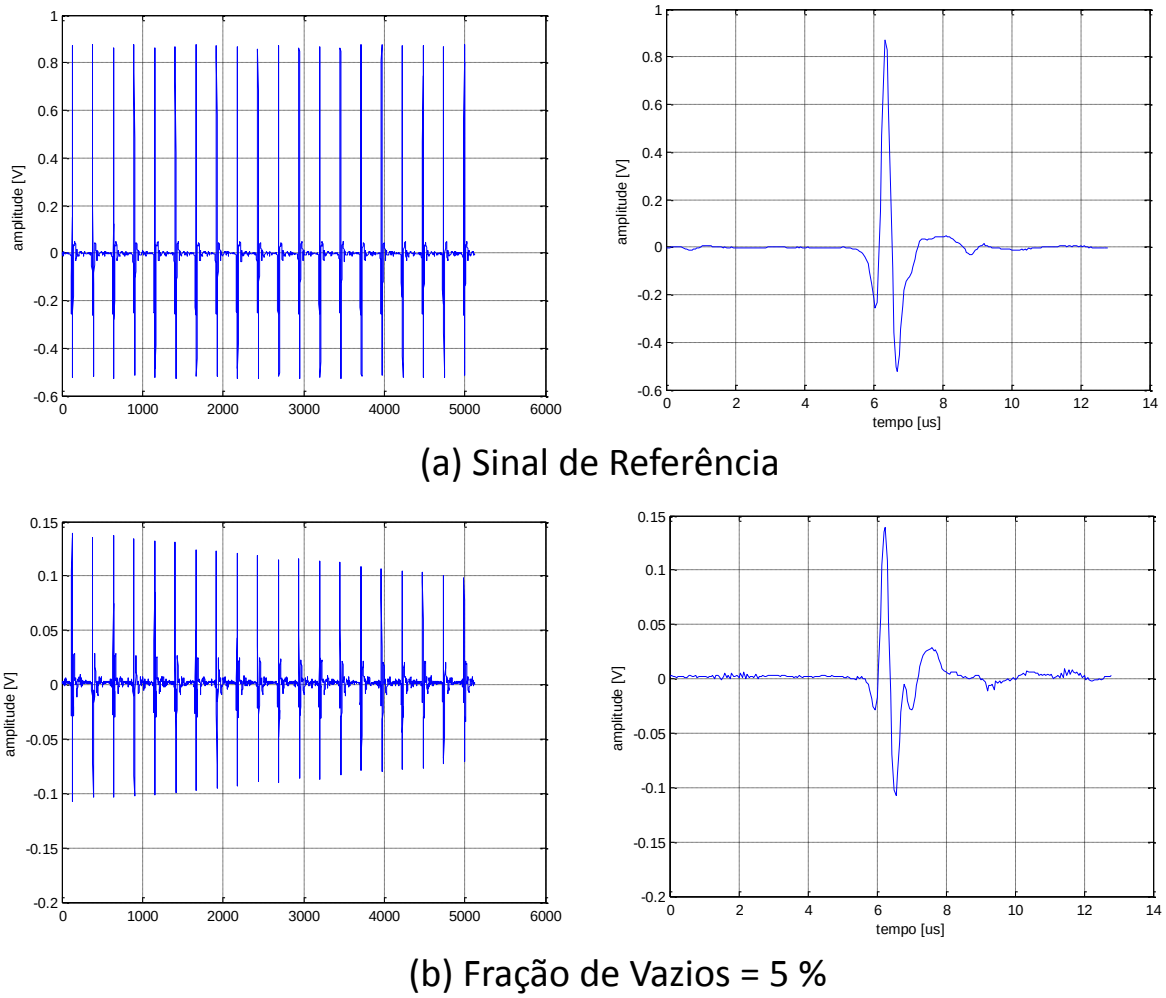


Figura 36: Dez pulsos de ultra-som (esquerda) adquiridos pelo sistema desenvolvido no LASCA/UTFPR lado a lado (10 pulsos = 1,18 ms de escoamento) e detalhe de um pulso adquirido com 12 bits e 20 Msps (direita)

Fonte: Autoria própria

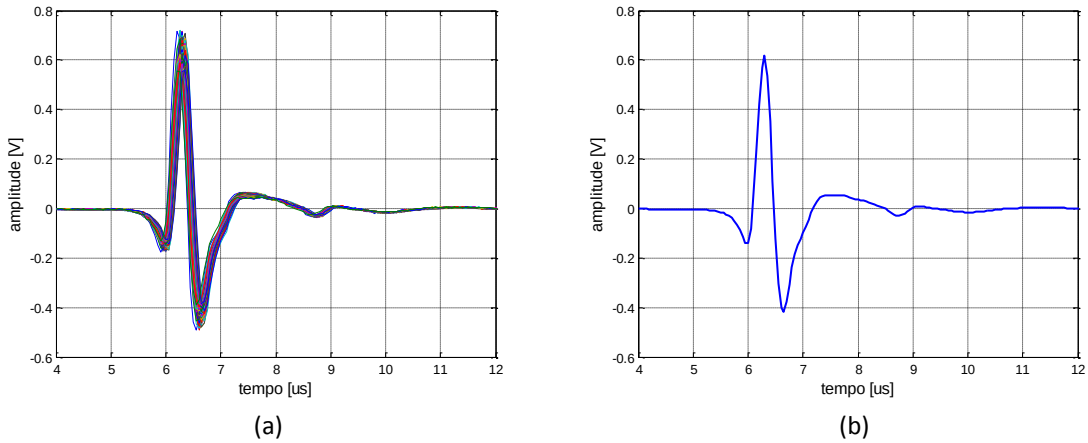


Figura 37: Escoamento com fração de vazios de 1% (a) 50 pulsos de ultra-som (b) Média Coerente de (a)

Fonte: Autoria própria

Para cada sinal processado foi calculada a velocidade do som utilizando como referência o sinal na água líquida monofásica. O cálculo da energia, amplitude máxima do sinal e atenuação em banda larga também utilizou como referência o sinal de ultra-som atravessando a água. Também foi aplicada a equação de normalização do sinal pelo primeiro vale, apresentado na Seção 4.3.4.

A Tabela 3 apresenta os valores medidos experimentalmente com o valor da fração de vazios calculada utilizando uma planilha em Excel baseado na metodologia apresentada DIAS; FRANçA; ROSA (2000) (Tabela 4) .

Em CARVALHO et al. (2009) é apresentado um estudo utilizando ultra-som e filmagens de alta velocidade (250 e 1000 fps) no mesmo circuito experimental utilizado neste trabalho (série #2, em um total de seis séries). Neste aparato experimental, a faixa de 1% a 8%, o padrão escoamento foi identificado como borbulhante. Na faixa 8% a 12%, o padrão escoamento foi identificado como calotas gasosas e de 12% a 15% por golfadas (CARVALHO et al., 2009).

Devido à natureza aleatória do escoamento bifásico, foi realizada uma análise estatística dos dados, calculando-se a média, a variância e o intervalo de confiança além de ajuste de curvas e o cálculo do coeficiente de determinação do ajuste (R^2), para verificar a correlação dos parâmetros com a fração de vazios.

A seguir são apresentados os resultados dos dados processados utilizando as técnicas descritas nestes trabalhos.

Tabela 3: Dados experimentais

Exp.	Linha de Líquido			Linha de Ar Comprimido					Seção de Testes
	Água			Ar			Rel. Ar		Ar
	T [$°C$]	ṁ [kg/s]	ṁ [kg/h]	T [$°C$]	P [mmH_2O]	P [$mmAlcool$]	P [bar]	P [kgf/cm^2]	P [kgf/cm^2]
1-5	27,6	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,00	0,00	0,229
6-10	26,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,00	0,00	0,222
11-15	27,4	0,5880	2116,8	27,7	9,5	12,0	0,65	0,66	0,228
16-20	27,3	0,5900	2124,0	27,3	9,1	11,5	0,64	0,65	0,228
21-25	27,2	0,6024	2168,6	27,0	18,9	24,0	0,63	0,64	0,228
25-30	27,1	0,5920	2131,2	26,6	18,7	23,8	0,63	0,64	0,225
31-35	27,1	0,5950	2142,0	26,5	27,6	35,0	0,63	0,64	0,222
35-40	27,1	0,5970	2149,2	26,4	27,7	35,2	0,62	0,63	0,222
41-45	27,1	0,6000	2160,0	26,4	38,2	48,5	0,63	0,64	0,219
46-50	27,1	0,6000	2160,0	26,4	37,8	48,0	0,62	0,63	0,219
51-55	27,0	0,6010	2163,6	26,4	48,0	61,0	0,62	0,63	0,216
56-60	27,0	0,6030	2170,8	26,4	48,0	61,0	0,62	0,63	0,216
61-65	27,0	0,6070	2185,2	26,4	57,7	73,2	0,62	0,63	0,214
66-70	27,0	0,6070	2185,2	26,2	57,3	72,7	0,62	0,63	0,214
71-75	26,1	0,6100	2196,0	25,6	-	87,3	0,61	0,62	0,210
76-80	26,2	0,6100	2196,0	25,6	-	87,2	0,61	0,62	0,210
81-85	26,2	0,5900	2124,0	25,6	-	101,5	0,60	0,61	0,206
86-90	26,3	0,5860	2109,6	25,6	-	101,7	0,60	0,61	0,207
91-95	26,3	0,5880	2116,8	25,6	-	113,5	0,60	0,61	0,206
96-100	26,3	0,5880	2116,8	25,6	-	113,4	0,60	0,61	0,206
101-105	26,3	0,5880	2116,8	25,6	-	128,8	0,60	0,61	0,205
106-110	26,4	0,5900	2124,0	25,6	-	128,8	0,60	0,61	0,204
111-115	26,4	0,5900	2124,0	25,6	-	141,5	0,60	0,61	0,204
116-120	26,3	0,5900	2124,0	25,6	-	141,5	0,60	0,61	0,204
121-125	26,3	0,5920	2131,2	25,6	-	156,4	0,60	0,61	0,201
126-130	26,3	0,5920	2131,2	25,6	-	156,4	0,60	0,61	0,202
131-135	26,4	0,5950	2142,0	25,7	-	171,2	0,60	0,61	0,201
136-140	26,4	0,5950	2142,0	25,7	-	171,5	0,60	0,61	0,200
141-145	26,6	0,5900	2124,0	27,1	-	101,7	1,84	1,88	0,199
146-150	26,7	0,5900	2124,0	27,1	-	101,7	1,86	1,90	0,199
151-155	26,8	0,5930	2134,8	27,3	-	102,0	2,12	2,16	0,196
156-160	26,8	0,5930	2134,8	27,4	-	101,9	2,13	2,17	0,196
161-165	26,9	0,5950	2142,0	27,9	-	102,3	2,37	2,42	0,196
166-170	26,9	0,5950	2142,0	28,1	-	102,4	2,37	2,42	0,194

Fonte: Autoria própria

Tabela 4: Parâmetros Calculados

Exp.	Parâmetros Calculados											
	Linha de Ar Comprimido				Seção Testes		Água		j ar $[cm/s]$	j água $[cm/s]$	j $[cm/s]$	Fração de Vazios [%]
	μ_{dry} $[\mu P]$	μ_{wet} $[\mu P]$	Qstd $[m^3/s]$	Qactual $[m^3/s]$	Qatual $[m^3/s]$	ρ_{ar} $[kg/m^3]$	ρ $[kg/m^3]$	Q $[m^3/s]$				
1-5	171,6	171,6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,35	995,9	0,00E+00	0,0	0,0	0,0	0,00
6-10	171,6	171,6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,35	996,3	0,00E+00	0,0	0,0	0,0	0,00
11-15	185,0	185,0	8,84E-06	8,69E-06	1,18E-05	1,35	995,9	5,90E-04	0,5	25,8	26,3	1,05
16-20	184,8	184,8	8,47E-06	8,34E-06	1,13E-05	1,35	995,9	5,92E-04	0,5	25,9	26,4	1,00
21-25	184,7	184,7	1,77E-05	1,74E-05	2,34E-05	1,35	996,0	6,05E-04	1,0	26,4	27,4	2,03
25-30	184,5	184,5	1,75E-05	1,73E-05	2,33E-05	1,35	996,0	5,94E-04	1,0	26,0	27,0	2,04
31-35	184,4	184,4	2,57E-05	2,54E-05	3,44E-05	1,35	996,0	5,97E-04	1,5	26,1	27,6	2,96
35-40	184,4	184,4	2,59E-05	2,55E-05	3,44E-05	1,35	996,0	5,99E-04	1,5	26,2	27,7	2,96
41-45	184,4	184,4	3,56E-05	3,51E-05	4,77E-05	1,34	996,0	6,02E-04	2,1	26,3	28,4	4,05
46-50	184,4	184,4	3,52E-05	3,47E-05	4,69E-05	1,34	996,0	6,02E-04	2,0	26,3	28,4	3,99
51-55	184,4	184,4	4,46E-05	4,40E-05	5,96E-05	1,34	996,0	6,03E-04	2,6	26,3	29,0	5,02
56-60	184,4	184,4	4,46E-05	4,40E-05	5,96E-05	1,34	996,0	6,05E-04	2,6	26,4	29,0	5,01
61-65	184,4	184,4	5,35E-05	5,28E-05	7,16E-05	1,34	996,0	6,09E-04	3,1	26,6	29,7	5,94
66-70	184,3	184,3	5,31E-05	5,24E-05	7,12E-05	1,34	996,0	6,09E-04	3,1	26,6	29,7	5,91
71-75	184,0	184,0	6,37E-05	6,29E-05	8,51E-05	1,34	996,3	6,12E-04	3,7	26,7	30,4	6,97
76-80	184,0	184,0	6,36E-05	6,28E-05	8,50E-05	1,34	996,2	6,12E-04	3,7	26,7	30,4	6,96
81-85	184,0	184,0	7,39E-05	7,30E-05	9,84E-05	1,33	996,2	5,92E-04	4,3	25,9	30,2	8,10
86-90	184,0	184,0	7,40E-05	7,32E-05	9,86E-05	1,33	996,2	5,88E-04	4,3	25,7	30,0	8,14
91-95	184,0	184,0	8,24E-05	8,15E-05	1,10E-04	1,33	996,2	5,90E-04	4,8	25,8	30,6	8,98
96-100	184,0	184,0	8,24E-05	8,14E-05	1,10E-04	1,33	996,2	5,90E-04	4,8	25,8	30,6	8,98
101-105	184,0	184,0	9,34E-05	9,23E-05	1,25E-04	1,33	996,2	5,90E-04	5,4	25,8	31,2	10,07
106-110	184,0	184,0	9,34E-05	9,23E-05	1,25E-04	1,33	996,2	5,92E-04	5,4	25,9	31,3	10,06
111-115	184,0	184,0	1,02E-04	1,01E-04	1,37E-04	1,33	996,2	5,92E-04	6,0	25,9	31,8	10,94
116-120	184,0	184,0	1,02E-04	1,01E-04	1,37E-04	1,33	996,2	5,92E-04	6,0	25,9	31,8	10,94
121-125	184,0	184,0	1,13E-04	1,12E-04	1,51E-04	1,33	996,2	5,94E-04	6,6	25,9	32,6	11,95
126-130	184,0	184,0	1,13E-04	1,12E-04	1,51E-04	1,33	996,2	5,94E-04	6,6	25,9	32,5	11,94
131-135	184,1	184,1	1,23E-04	1,22E-04	1,65E-04	1,33	996,2	5,97E-04	7,2	26,1	33,3	12,89
136-140	184,1	184,1	1,24E-04	1,22E-04	1,66E-04	1,33	996,2	5,97E-04	7,2	26,1	33,3	12,92
141-145	184,7	184,7	7,40E-05	7,29E-05	1,78E-04	1,32	996,1	5,92E-04	7,8	25,9	33,6	13,81
146-150	184,7	184,7	7,40E-05	7,29E-05	1,79E-04	1,32	996,1	5,92E-04	7,8	25,9	33,7	13,90
151-155	184,8	184,8	7,42E-05	7,30E-05	1,97E-04	1,32	996,1	5,95E-04	8,6	26,0	34,6	15,01
156-160	184,9	184,9	7,42E-05	7,30E-05	1,97E-04	1,32	996,1	5,95E-04	8,6	26,0	34,6	15,03
161-165	185,1	185,1	7,44E-05	7,31E-05	2,13E-04	1,32	996,0	5,97E-04	9,3	26,1	35,4	16,05
166-170	185,2	185,2	7,45E-05	7,32E-05	2,13E-04	1,32	996,0	5,97E-04	9,3	26,1	35,4	16,08

Fonte: Autoria própria

5.1 VELOCIDADE DO SOM

A bibliografia não apresenta consenso sobre a influência do escoamento bifásico sobre a velocidade do som. Alguns autores afirmam que a velocidade deve ser reduzida com o aumento da fração de vazios, pois devido aos múltiplos caminhos referente às reflexões nas bolha de ar, o tempo para o sinal se propagar será aumentado.

Motivado por este debate, foi analisado de maneira prática e experimental o comportamento da velocidade do som em diversas frações de vazios. Além do próprio valor da velocidade do som, também é observado se o método de cálculo influencia na correlação com o escoamento água-ar.

Para o cálculo da velocidade do som, foi medida a diferença de tempo entre um sinal de referência com velocidade conhecida (água líquida monofásica) e aplicada as Equações 31 e 32 apresentadas na Seção 4.3.2.

A referência para o cálculo da velocidade do som (Equação 32) foi a água líquida monofásica a 27,6^{o}C para as amostras número 11-70 e 26°C para o restante. Foram utilizadas duas medidas de referência, pois o experimento foi realizado em dois dias diferentes. De acordo com a Tabela 6 em BELOGOL'SKII et al. (1999) e utilizando interpolação linear, a velocidade do som para 27,6^{o}C é de 1503,4 m/s (referência) e para 26°C é de 1499.34 m/s (referência). O métodos aplicados foram os seguintes:

- 1 - Velocidade de Fase - Pico máximo entre os sinais;
- 2 - Velocidade de Fase - Pico mínimo entre os sinais;
- 3 - Velocidade de Fase - Limiar abaixo do nível de ruído;
- 4 - Velocidade de Fase - Primeiro pico negativo (primeiro vale);
- 5 - Velocidade de Fase - Primeiro cruzamento com zero;
- 6 - Velocidade de Grupo - Pico das envoltória dos sinais;
- 7 - Velocidade de Grupo - Fase da Transformada de Hilbert da correlação dos sinais;

As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados com os valores médios, variância e intervalo de confiança (95%) calculados. Cada fração de vazios é uma média de 50 amostras.

Tabela 5: Cálculo da Velocidade do som para os métodos 1 a 4

Fração de Vazios	Pico máximo			Pico mínimo			Limiar			Primeiro vale		
	Média	Var.	I.C.	Média	Var.	I.C.	Média	Var.	I.C.	Média	Var.	I.C.
1,02	1504,4	0,1596	0,1107	1504,6	0,1722	0,1150	1502,8	0,1457	0,1058	1504,4	0,1579	0,1101
2,03	1504,9	0,1186	0,0954	1505,3	0,1139	0,0935	1500,6	0,1344	0,1016	1504,8	0,1202	0,0961
2,96	1505,3	0,0242	0,0431	1505,7	0,0287	0,0470	1497,5	0,1299	0,0999	1505,0	0,0249	0,0438
4,02	1505,4	0,0482	0,0608	1506,0	0,0637	0,0700	1493,9	0,2371	0,1350	1505,0	0,0592	0,0675
5,01	1506,6	0,1450	0,1056	1507,3	0,1537	0,1087	1491,4	0,3135	0,1552	1506,0	0,1841	0,1189
5,92	1505,9	0,6536	0,2241	1506,7	0,5874	0,2124	1488,6	0,6456	0,2227	1505,3	0,6193	0,2181
6,96	1500,7	0,0429	0,0574	1501,5	0,0387	0,0545	1481,5	0,3509	0,1642	1500,0	0,0518	0,0631
8,12	1498,3	0,6802	0,2286	1499,2	0,6684	0,2266	1476,6	0,8968	0,2625	1497,6	0,6357	0,2210
8,98	1496,0	0,1113	0,0925	1497,0	0,1088	0,0914	1473,4	0,2771	0,1459	1495,4	0,1190	0,0956
10,07	1495,2	0,0420	0,0568	1496,2	0,0344	0,0514	1472,2	0,3195	0,1567	1494,5	0,0617	0,0689
10,94	1494,6	0,1597	0,1108	1495,6	0,1721	0,1150	1471,8	0,5961	0,2140	1494,0	0,1823	0,1184
11,94	1494,9	0,0884	0,0824	1496,0	0,0898	0,0831	1471,7	0,5745	0,2101	1494,2	0,0756	0,0762
12,90	1495,0	0,0611	0,0685	1496,1	0,0597	0,0677	1471,2	0,4196	0,1796	1494,2	0,0608	0,0683
13,86	1500,4	1,1260	0,2941	1501,5	1,0338	0,2818	1476,0	1,4409	0,3327	1499,4	1,0256	0,2807
15,02	1499,8	0,1074	0,0908	1501,0	0,1057	0,0901	1474,6	0,5333	0,2024	1498,8	0,1127	0,0930
16,06	1500,0	1,3653	0,3239	1501,3	1,3332	0,3200	1473,3	9,3485	0,8475	1498,9	1,2809	0,3137

Fonte: Autoria própria

A Figura 38 mostra que os métodos 1, 2 ,4, 5, 6 e 7 (excluído o 3) apresentam valores diferentes, mas seguem uma mesma tendência de variação. Para a faixa entre 26°C e 28°C (BELOGOL'SKII et al., 1999) há uma variação teórica de 5,05 m/s devido a alteração da temperatura da água. Os valores obtidos pelos métodos 1, 2, 4 ,5 e 7 estão numa faixa de aproximadamente 18 m/s, dificultando qualquer análise da influência do escoamento bifásico. Este obstáculo é causado pela temperatura que influencia à velocidade do sinal de ultra-som na mesma ordem de grandeza que o escoamento bifásico.

Não se podem descartar estas alterações, mas também é difícil separar e correlacionar a influência da temperatura e da fração de vazio individualmente.

Tabela 6: Cálculo da Velocidade do som para os métodos 5 a 7

Fração de Vazios	Primeiro cruz. com zero			Pico dos envelopes			Fase da T. de Hilbert		
	Média	Var.	I.C.	Média	Var.	I.C.	Média	Var.	I.C.
1,02	1504,3	0,1510	0,1077	1503,9	0,1285	0,0994	1504,7	0,1505	0,1075
2,03	1504,9	0,1249	0,0980	1503,8	0,1108	0,0923	1505,4	0,1177	0,0951
2,96	1505,2	0,0267	0,0453	1503,6	0,0208	0,0400	1506	0,0215	0,0406
4,02	1505,4	0,0680	0,0723	1503,1	0,0665	0,0715	1506,3	0,0575	0,0664
5,01	1506,4	0,1753	0,1160	1503,7	0,1505	0,1075	1507,7	0,1586	0,1104
5,92	1505,8	0,6301	0,2200	1502,6	0,5925	0,2134	1507,2	0,6264	0,2194
6,96	1500,8	0,0459	0,0594	1497,2	0,0710	0,0738	1502,1	0,0379	0,0539
8,12	1498,4	0,6521	0,2238	1494,1	0,7200	0,2352	1499,9	0,6713	0,2271
8,98	1496,2	0,1094	0,0917	1491,6	0,1112	0,0924	1497,7	0,1128	0,0931
10,07	1495,4	0,0717	0,0742	1490,6	0,0492	0,0615	1497	0,0544	0,0647
10,94	1494,8	0,1965	0,1229	1489,9	0,1919	0,1214	1496,5	0,1816	0,1181
11,94	1495,1	0,1053	0,0899	1489,8	0,0874	0,0819	1496,9	0,1093	0,0917
12,90	1495,1	0,0815	0,0792	1489,5	0,0376	0,0537	1497,1	0,0841	0,0804
13,86	1500,5	1,0870	0,2890	1494,8	1,1989	0,3035	1502,5	1,0720	0,2870
15,02	1499,9	0,1368	0,1025	1493,6	0,0945	0,0852	1502,1	0,1377	0,1028
16,06	1500,0	1,2951	0,3154	1493,3	1,3232	0,3188	1502,5	1,3953	0,3274

Fonte: Autoria própria

O terceiro método aplicado (Velocidade de Fase - Limiar abaixo do nível de ruído) apresentou a tendência de que a velocidade do som é reduzida em 29,4 m/s com o aumento da fração de vazios até o valor de 9%. Esta tendência é devida à atenuação da amplitude da onda e conseqüente o deslocamento de um mesmo valor de tensão para um tempo mais longo. Este método se baseia num limiar fixo de tensão, diferente do apresentado em CARVALHO et al. (2007b) que procura uma alteração significativa de tensão em cada sinal. Na seção seguinte é observado que a amplitude e a energia têm a mesma tendência até o valor de 9% de fração de vazios.

A velocidade de fase e de grupo são afetadas, pois, como será mostrado a seguir, a onda de ultra-som tem seu formato afetado e conseqüentemente o cálculo da velocidade do som. Apesar de ser um parâmetro relativamente fácil de se medir, a velocidade do som não demonstrou sensibilidade suficiente para se destacar em relação à temperatura e ser empregada como um parâmetro robusto para inferência de fração de vazios ou do padrão de escoamento.

5.2 ANÁLISE DE ENERGIA E AMPLITUDE DO SINAL DE ULTRA-SOM

A amplitude e energia do sinal de ultra-som que atravessa o escoamento bifásico tende a se atenuar com o aumento da fração de vazios. Esta redução não segue uma mesma tendência para toda a faixa de frações de vazios estudada. Para este aparato experimental foi verificado o valor para o qual este parâmetro não possui mais correlação com a fração de vazios.

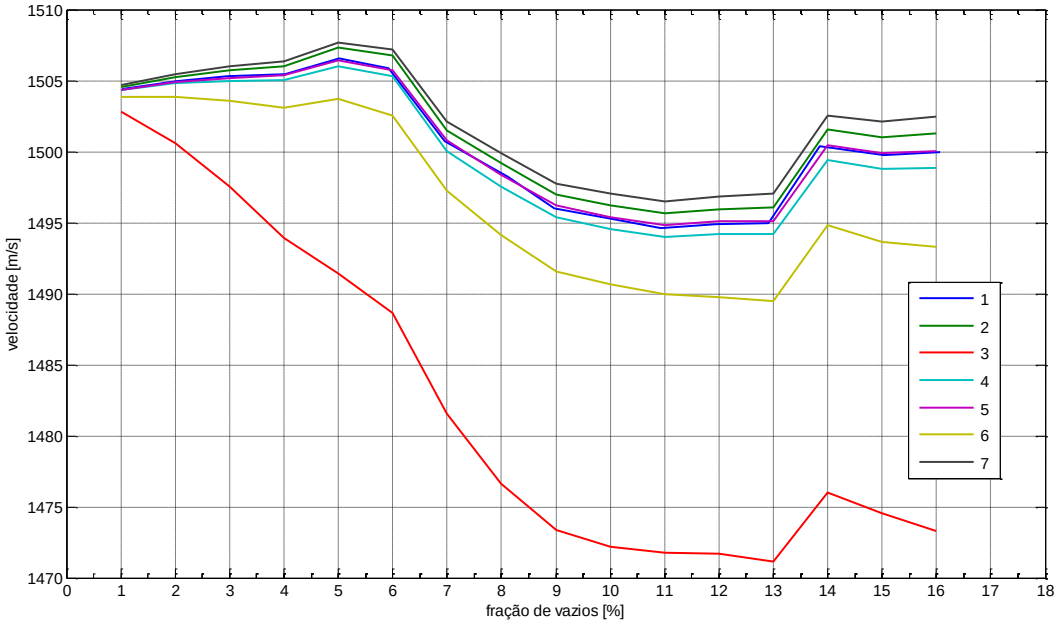


Figura 38: Velocidade do som em diversas frações de vazios

Fonte: Autoria própria

Foram utilizadas as Equações 33, 34, 35 e 36 para o cálculo da energia e amplitude normalizadas de cada experimento. Também foram calculados a média, a variância e o intervalo de confiança (95%) dos dados (Tabelas 8 e 7) para verificar e analisar a relação entre a energia média e amplitude máxima do sinal e a fração de vazios.

Tabela 7: Amplitude Máxima Normalizada do Sinal de Ultra-Som

	FRAÇÃO DE VAZIOS [%]							
	1,03	**2,04**	**2,96**	**4,02**	**5,02**	**5,93**	**6,97**	**8,12**
Média	0,74305	0,56167	0,42983	0,31474	0,23330	0,18319	0,14791	0,09992
Variância	0,00008	0,00019	0,00020	0,00010	0,00008	0,00008	0,00009	0,00007
Intervalo de Confiança	0,00254	0,00385	0,00396	0,00272	0,00248	0,00249	0,00268	0,00228
	FRAÇÃO DE VAZIOS [%]							
	8,98	**10,07**	**10,94**	**11,95**	**12,91**	**13,86**	**15,03**	**16,07**
Média	0,08159	0,07673	0,07921	0,07889	0,07332	0,07023	0,06175	0,05386
Variância	0,00005	0,00007	0,00008	0,00009	0,00008	0,00006	0,00006	0,00005
Intervalo de Confiança	0,00191	0,00224	0,00252	0,00261	0,00241	0,00218	0,00214	0,00187

Fonte: Autoria própria

Tabela 8: Energia Normalizada do Sinal de Ultra-Som

	FRAÇÃO DE VAZIOS [%]							
	1,03	**2,04**	**2,96**	**4,02**	**5,02**	**5,93**	**6,97**	**8,12**
Média	0,57697	0,34313	0,21137	0,11954	0,06822	0,04414	0,02979	0,01432
Variância	0,00018	0,00021	0,00017	0,00005	0,00002	0,00002	0,00001	0,00000
Intervalo de Confiança	0,00370	0,00397	0,00361	0,00187	0,00126	0,00110	0,00098	0,00052
	FRAÇÃO DE VAZIOS [%]							
	1,03	**2,04**	**2,96**	**4,02**	**5,02**	**5,93**	**6,97**	**8,12**
Média	0,01007	0,00900	0,00970	0,01031	0,00936	0,00863	0,00730	0,00601
Variância	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Intervalo de Confiança	0,00040	0,00046	0,00056	0,00061	0,00051	0,00046	0,00046	0,00037

Fonte: Autoria própria

Observando as Figuras 39 e 40, verifica-se um comportamento exponencial da energia até aproximadamente 9% de fração de vazios. Ajustando os valores de acordo com a Equação 1 para a faixa de 1% a 9% obtém-se a Equação 42 com coeficiente de determinação R^2 = 0,999.

$$E(\alpha) = 0,95\exp(-0,51\alpha) \tag{42}$$

Esta equação demonstra uma boa correlação entre a energia e a fração de vazios até 9%, sendo que acima deste valor a energia do sinal não é significativamente alterada pelo escoamento bifásico. Este comportamento pode ser observado na Figura 40, onde se verifica um joelho no valor de 9% na curva.

Para a amplitude máxima normalizada também foi utilizada a mesma metodologia, sendo os dados são apresentados na Tabela 7.

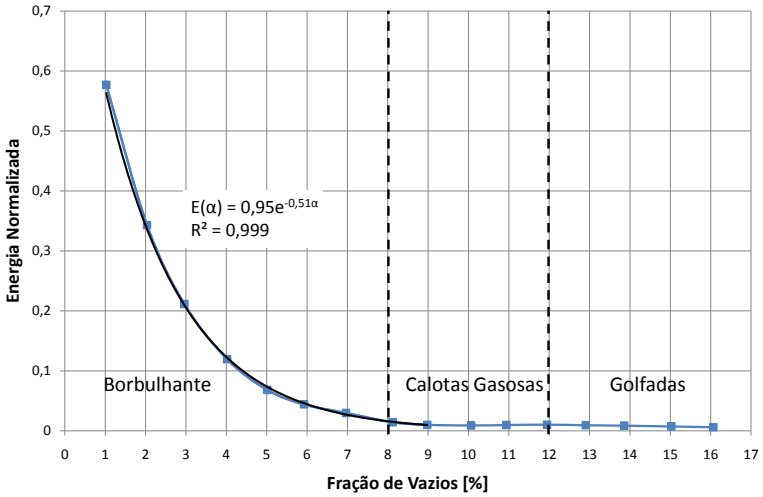


Figura 39: Energia Normalizada Média do Sinal de Ultra-Som

Fonte: Autoria própria

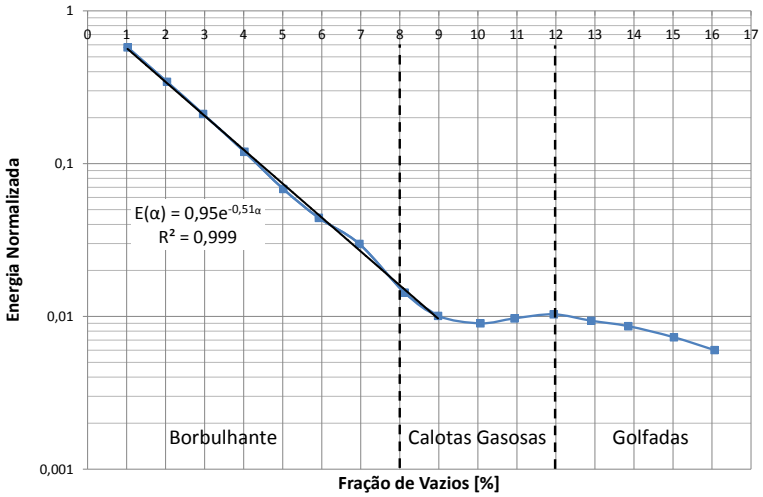


Figura 40: Energia Normalizada Média do Sinal de Ultra-Som - Escala Logarítmica

Fonte: Autoria própria

Observando as Figuras 41 e 42 verifica-se o mesmo comportamento exponencial da energia até aproximadamente 9% de fração de vazios. Ajustando os valores de acordo com a Equação 1 para a faixa de 1% a 9% obtém-se a Equação 43 com coeficiente de determinação $R^2 = 0{,}999$.

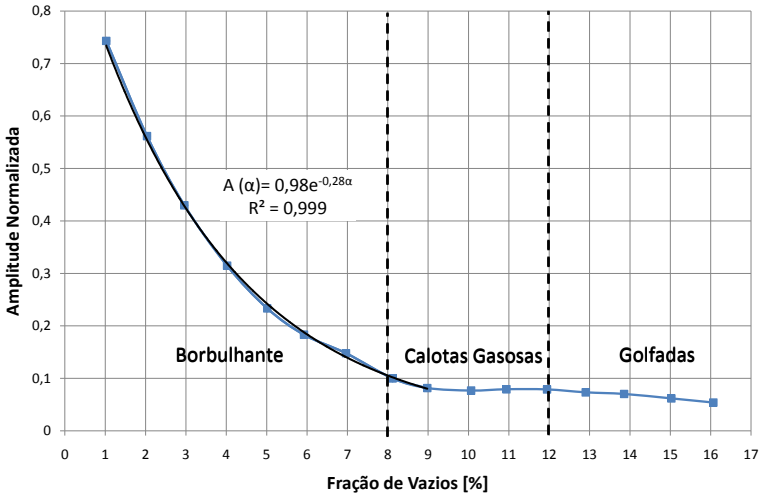


Figura 41: Amplitude Máxima Normalizada Média do Sinal de Ultra-Som

Fonte: Autoria própria

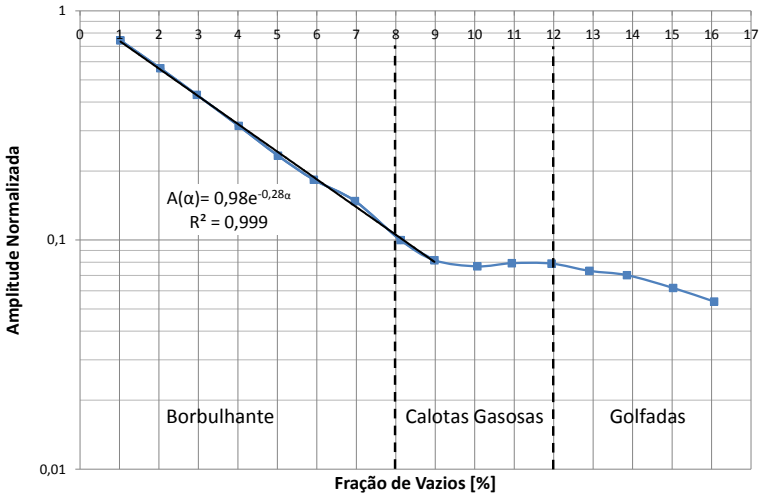


Figura 42: Amplitude Máxima Normalizada Média do Sinal de Ultra-Som - Escala Logarítmica

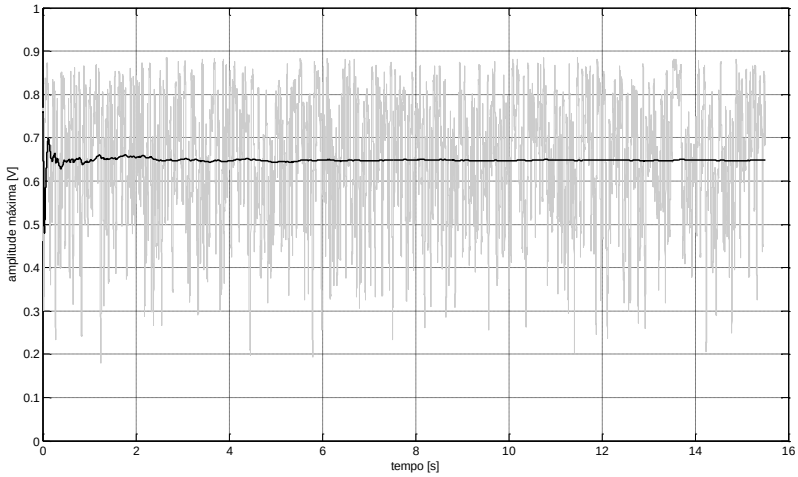
Fonte: Autoria própria

$$A(\alpha) = 0,98\exp(-0,28\alpha) \tag{43}$$

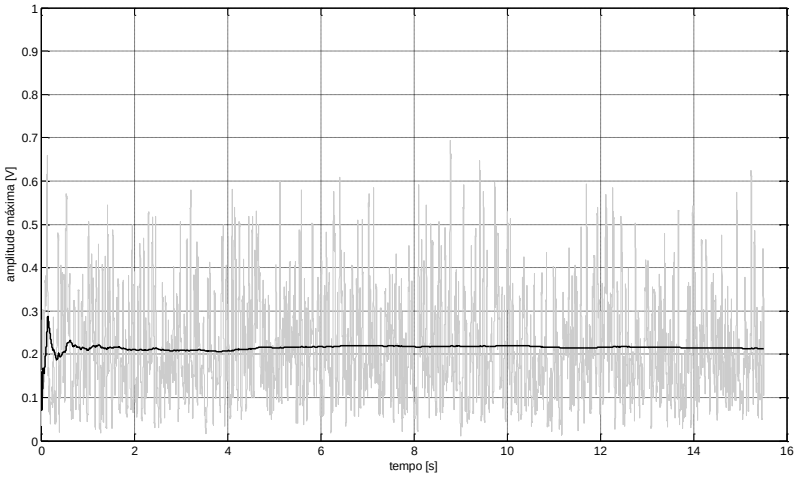
A Equação 43, assim como a Equação 42, demonstra uma boa correlação entre a energia

e a fração de vazios até 9%, sendo que acima deste valor a amplitude máxima do sinal não é significativamente alterada pelo escoamento bifásico. Este comportamento pode ser observado na Figura 42, onde se verifica um joelho em 9% da fração de vazios na curva.

Os gráficos das Figuras 43 apresentam a amplitude máxima do sinal de ultra-som em cada aquisição (Equação 33) para uma única amostra com duração de 15,51 s de aquisição (131.068 sinais).



(a)



(b)

Figura 43: Amplitude Máxima e Média Móvel de Experimentos com (a) 1% e (b) 5% de fração de vazios

Fonte: Autoria própria

Estes gráficos demonstram que o cálculo da média móvel estabilizou depois de aproximadamente 1.5 s de aquisição. Os experimentos foram divididos em cinco partes de 3,1 s cada,

garantido que as médias utilizados na análise representam de fato o padrão de escoamento.

Também verifica-se que apesar do caráter aleatório do sinal, a média rapidamente tendeu a um valor aproximadamente constante. Esta dispersão dos valores ocorre pois a fração de vazios média não é constante para todos os instantes de tempo em que o sinal é adquirido, mas há uma grande variação na amplitude máxima do sinal. Na realidade é medido a fração de vazios médio do escoamento.

A análise da amplitude normalizada está de acordo com o trabalho de XU; LEONARD; GREEN (1985), no qual se verificou uma relação exponencial da fração de vazios com a amplitude máxima do sinal. Verifica-se que a energia tem o mesmo comportamento da amplitude, sendo que a determinação de amplitude não exige o cálculo da integral do sinal.

5.3 NORMALIZAÇÃO DO SINAL DE ULTRA-SOM

O sinal de ultra-som que atravessa o escoamento bifásico não sofre uma atenuação uniforme; o que se observa é que o sinal recebido não é apenas uma versão em escala reduzida do sinal que foi recebido sem escoamento bifásico, mas sim um sinal deformado em relação a água líquida monofásica.

Esta alteração pode ser atribuída ao multi-percurso e interferências construtivas e destrutivas (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1996) que o sinal sofre ao ter seu caminho alterado devido às múltiplas reflexões com as estruturas gasosas, somando-se a estas a perda de energia devido à ampliação do caminho seguido na fase líquida.

Na Seção 4.3.4 foi apresentada uma proposta de normalização pelo primeiro pico negativo (primeiro vale), pois este é o menos afetado pelas interferências construtivas e destrutivas causadas pelo escoamento água-ar. A Figura 44 mostra a média dos sinais normalizados pelo primeiro vale para diversa frações de vazios. Esta proposta evita o uso de uma referência para a normalização do parâmetro da fração de vazios, e utiliza, em vez disso, a propriedade do escoamento bifásico alterar a forma sinal de ultra-som.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos utilizado esta técnica, onde a freqüência de amostragem foi elevada em dez vezes, passando de 20 Msps para 200 Msps, através da interpolação de pontos no sinal original. Foi optado em utilizar a interpolação ao invés de elevar a freqüência de amostragem, devido a complexidade e custo de se atingir 200 Msps em um sistema de aquisição. Este processamento adicional auxilia na determinação da localização do primeiro mínimo. Para a análise da correlação, utiliza-se a diferença entre o valor máximo e mínimo do sinal normalizado (Equação 38).

Tabela 9: Normalização do Sinal de Ultra-Som

	FRAÇÃO DE VAZIOS [%]								
	0,00	**1,03**	**2,04**	**2,96**	**4,02**	**5,02**	**5,93**	**6,97**	**8,12**
Média	5,52756	6,29525	6,94651	7,58116	8,45388	9,20881	9,94075	10,40398	11,53507
Variância	0,00004	0,00299	0,01319	0,02689	0,05250	0,08769	0,12365	0,25199	0,43892
Intervalo de Confiança	0,00171	0,01516	0,03183	0,04545	0,06351	0,08208	0,09747	0,13914	0,18363
	FRAÇÃO DE VAZIOS [%]								
	8,98	**10,07**	**10,94**	**11,95**	**12,91**	**13,86**	**15,03**	**16,07**	
Média	12,05272	12,27088	12,62252	13,28332	13,97998	14,01744	15,28638	16,29342	
Variância	0,92052	0,75498	0,88874	0,97973	1,09552	1,64362	1,76995	0,00000	
Intervalo de Confiança	0,17682	0,26594	0,24084	0,26131	0,27436	0,29012	0,35536	0,36876	

Fonte: Autoria própria

Na Figura 44, observa-se que quanto maior a fração de vazios maior esticamento no eixo y do sinal normalizado. Caso não ocorresse esta deformação, independente do ponto utilizado na normalização seriam obtidos sinais iguais depois de normalizados. Esta normalização demonstra a distorção que o escoamento bifásico exerce sobre a onda de ultra-som.

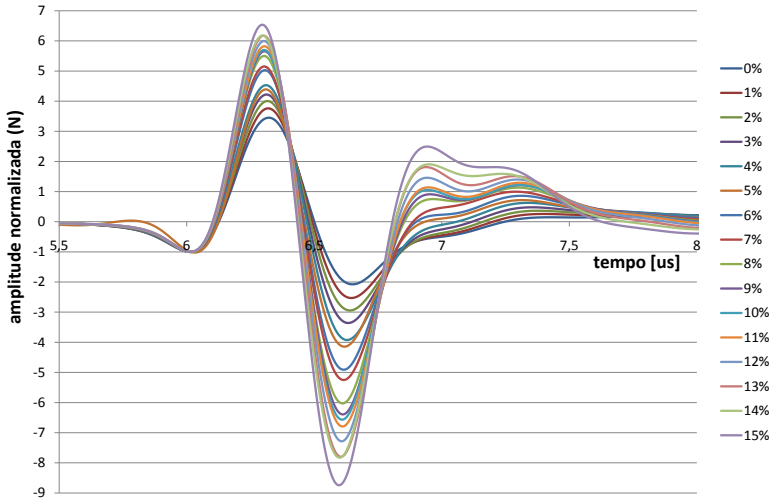


Figura 44: Sinais de ultra-som normalizados pelo primeiro pico negativo

Fonte: Autoria própria

A Figura 45 apresenta os resultados referentes à tabela 9. Verificou-se que esta análise apresenta uma relação linear com a fração de vazios. Esta curva foi ajustada através de uma curva linear com coeficiente de determinação $R^2 = 0,991$ de acordo com a Equação 44.

$$N(\alpha) = 0,64\alpha + 5,83 \tag{44}$$

Esta nova proposta de normalização que utiliza a deformação da onda como princípio apre-

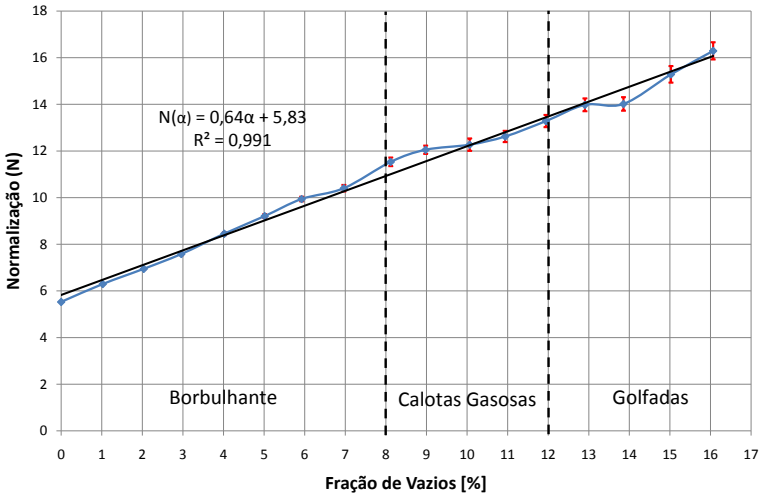


Figura 45: Normalização do Sinal de Ultra-Som

Fonte: Autoria própria

senta grande potencial para a análise de escoamentos bifásicos, pois para toda a faixa estudada apresentou uma tendência linear. A vantagem deste método é que o parâmetro para a normalização do sinal está no próprio sinal.

5.4 ATENUAÇÃO DE ULTRA-SOM EM BANDA LARGA - BUA

Como apresentado na Seção 4.3.5, propõe-se utilizar a mesma técnica aplicada no diagnóstico de osteoporose para avaliar o escoamento bifásico. O princípio básico desta técnica é que a atenuação varia de acordo com a freqüência devido à redução da Densiometria Mineral Óssea (DMO).

A faixa de freqüência utilizada para o cálculo da atenuação em banda larga teve como freqüência inferior $f_{lo} = 625$ kHz e freqüência superior $f_{hi} = 2,265$ MHz, totalizando uma banda de passagem de $BW = 1,65$ MHz. Esta faixa foi escolhida, pois apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2) para as diversas frações de vazios e apresenta uma tendência linear de atenuação no gráfico de BUA. O métodos para determinar o maior coeficiente de determinação foi através de tentativa e erro, utilizando como métrica a média dos R^2 do ajuste linear do BUA.

A Figura 46 apresenta o espectro de freqüências e o BUA para algumas frações de vazios, onde verifica-se que as altas freqüências sofrem uma maior atenuação pelo escoamento bifásico,

ou seja, o escoamento água-ar se comporta com um filtro passa-baixas.

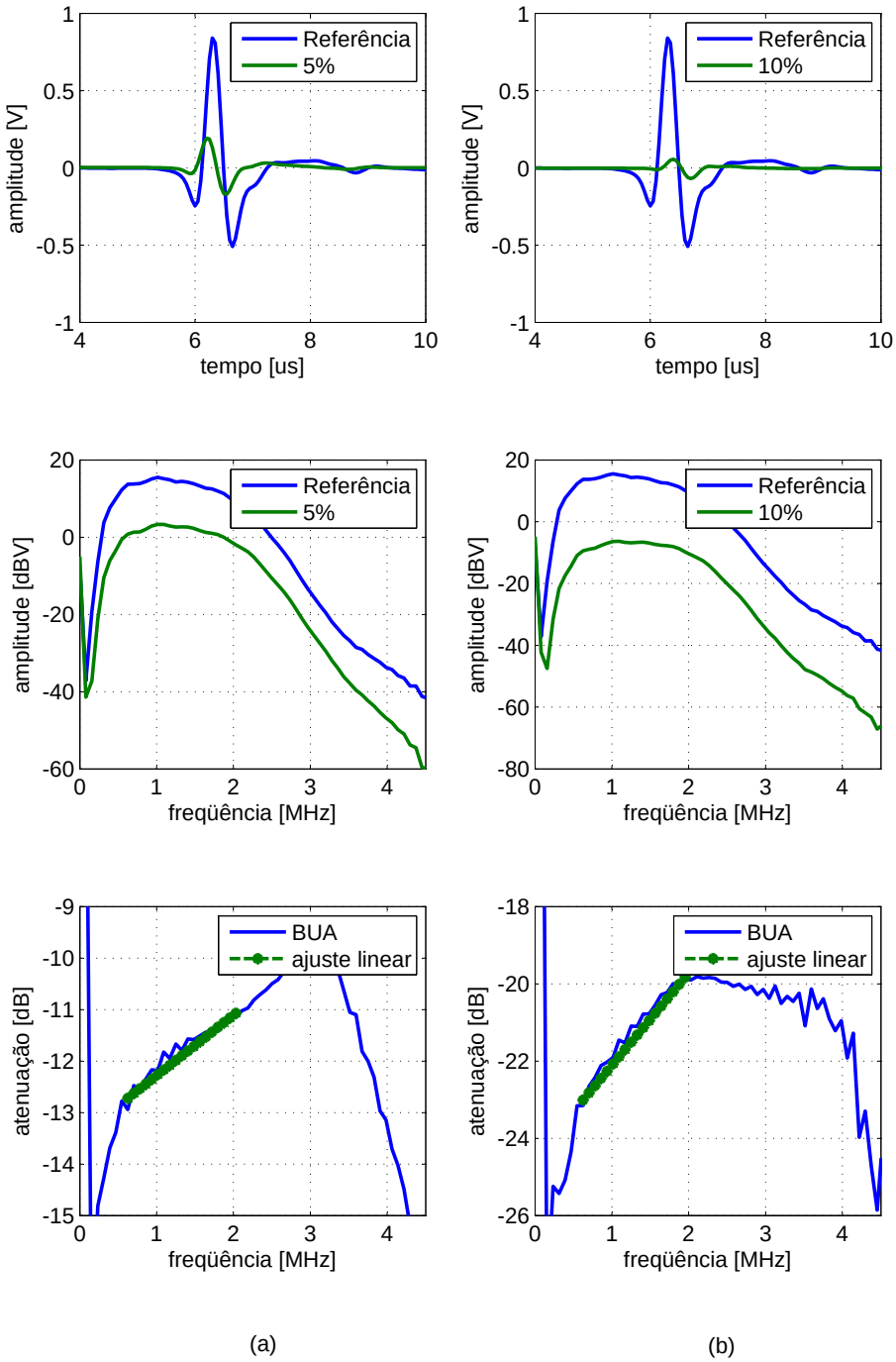


Figura 46: Atenuação em Banda Larga - BUA (a) 5% de fração de vazios (b) 10% de fração de vazios

Fonte: Autoria própria

Esta técnica foi aplicada ao sinal pró-mediado para a faixa de fração de vazios de 1% a 16% e os resultados processados são apresentados na Tabela 10 onde foi calculado o parâmetro de nBUA (*Normalized Broadband Ultrasonic Attenuation*) em dB/(MHz.cm), assim como seus respectivos valores médios, variância e intervalo de confiança (95 %).

Tabela 10: Atenuação em Banda Larga Normalizado - nBUA

	FRAÇÃO DE VAZIOS [%]							
	1,03	**2,04**	**2,96**	**4,02**	**5,02**	**5,93**	**6,97**	**8,12**
Média	0,02997	0,06182	0,10741	0,13985	0,23457	0,27450	0,25052	0,34561
Variância	0,00015	0,00026	0,00040	0,00057	0,00089	0,00213	0,00152	0,00219
Intervalo de Confiança	0,00340	0,00445	0,00551	0,00663	0,00828	0,01280	0,01080	0,01296
	FRAÇÃO DE VAZIOS [%]							
	8,98	**10,07**	**10,94**	**11,95**	**12,91**	**13,86**	**15,03**	**16,07**
Média	0,36484	0,40838	0,39323	0,41678	0,43744	0,40030	0,40894	0,44758
Variância	0,00267	0,00210	0,00239	0,00122	0,00119	0,00279	0,00281	0,00227
Intervalo de Confiança	0,01433	0,01271	0,01355	0,00969	0,00956	0,01463	0,01470	0,01320

Fonte: Autoria própria

O gráfico da Figura 47 apresenta os resultados da tabela 10. O ajuste linear da curva (Equação 45) apresenta um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,882$ para relação entre o nBUA [dB/(MHz.cm)] e a fração de vazios [%]. Este gráfico apresenta a tendência de que com o aumento da fração de vazios há a elevação da nBUA, mas uma baixa correlação com um ajuste linear.

Os dados apresentam maior espalhamento para fração de vazios elevadas, isto se deve ao escoamento não ser apenas borbulhante, mas já está ocorrendo coalescência das bolhas e formação de estruturas gasosas maiores. Esta coalescência cria um padrão de escoamento onde a distribuição das bolhas não é uniforme, diferente do que ocorre no escoamento borbulhante.

$$nBUA(\alpha) = 0,028\alpha + 0,057 \tag{45}$$

Ajustando o gráfico da Figura 47 em 3 partes (Figura 48), pode-se obter um melhor resultado para o cálculo da fração de vazios para o escoamento borbulhante e calotas gasosas. Para o escoamento em golfadas há poucos pontos para se realizar uma análise criteriosa. Este comportamento por partes pode ser devido a mudanças do padrão de escoamento.

Durante o escoamento borbulhante, a elevação da fração de vazios pode ser analisada como uma redução da uniforme densidade do fluido escoando, assim como na Densiometria Mineral Óssea. Para frações de vazios maiores, como não há uniformidade desta redução, ocorre um espalhamento maior nos valores médios, observado pela variância do valor médio.

O nBUA indica que a atenuação varia com a freqüência, sendo mais um indício de que o

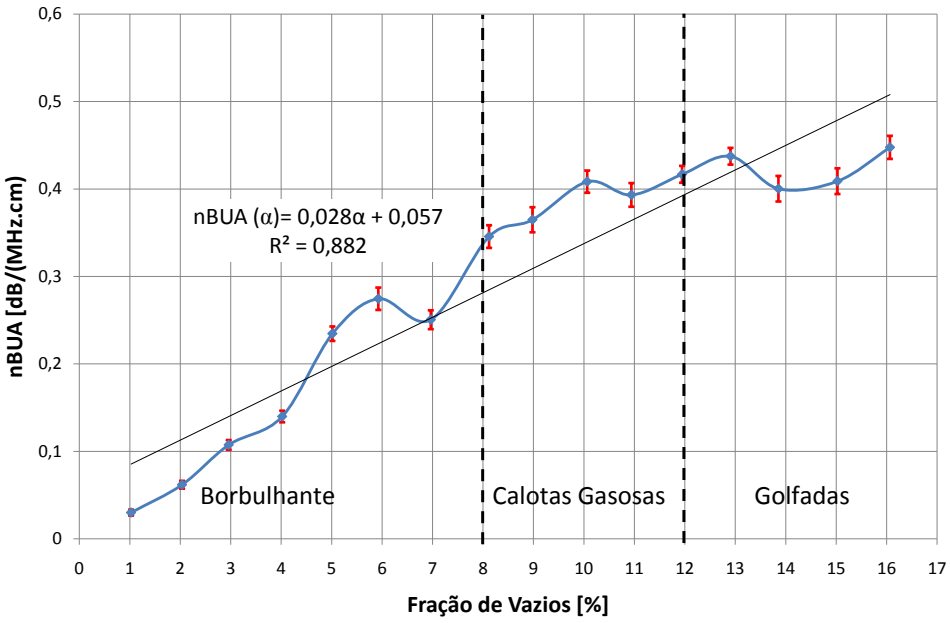


Figura 47: Atenuação em Banda Larga Normalizado - nBUA

Fonte: Autoria própria

escoamento bifásico altera o sinal de ultra-som e que esta alteração pode ser utilizada como parâmetro de análise do escoamento bifásico, tanto para a determinação do padrão de escoamento como para a determinação de fração de vazios.

A aplicação desta técnica a escoamentos bifásicos é uma novidade, apesar de ser uma técnica com 25 anos e amplamente divulgada no diagnóstico médico. Esta técnica demonstra potencial no auxílio na caracterização de escoamentos bifásicos.

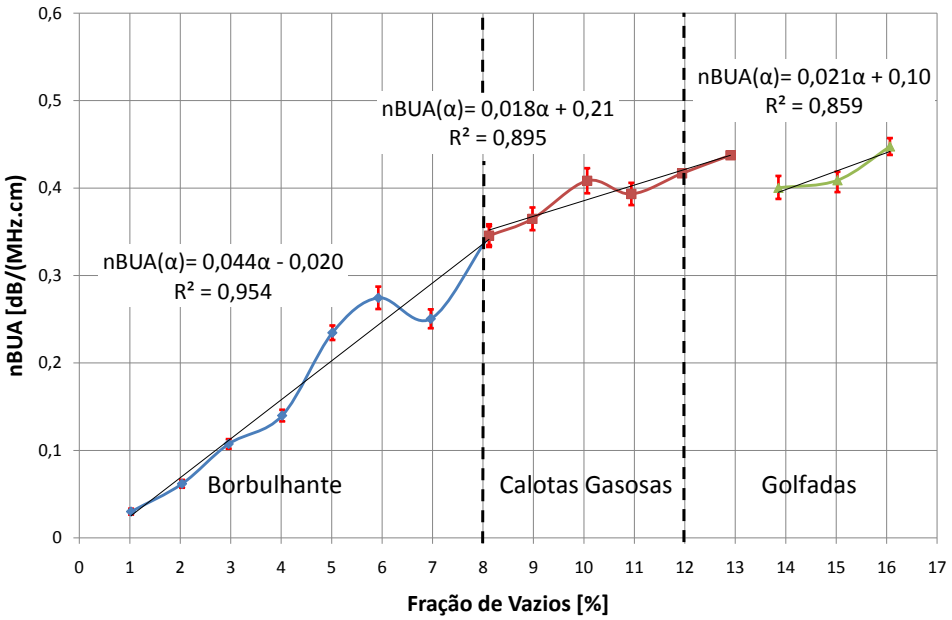


Figura 48: Atenuação em Banda Larga Normalizado - nBUA, ajuste por partes

Fonte: Autoria própria

6 CONCLUSÕES

Foi realizado um estudo experimental e teórico de alguns parâmetros do sinal de ultra-som que são afetados pelo escoamento bifásico água-ar. Além dos parâmetros utilizados comumente na bibliografia, neste trabalho foram propostos dois novos métodos de análise.

O uso do ultra-som possui diversas vantagens, entre elas a robustez e ser não invasivo ao processo, não alterando o padrão de escoamento, além de não ser um elemento de perda de carga.

Para a aquisição do sinal, o *hardware* e *firmware* utilizados, que foram desenvolvidos no LASCA/UTFPR, demonstraram desempenho compatível com as condições dinâmicas do experimento. Em relação ao processamento do sinal em tempo real, este não foi implementado no sistema, mas foi realizado de maneira *offline* através do *software* MATLAB.

Na análise da velocidade do som, foi verificado que até 16 % de vazios este parâmetro é de difícil correlação com a fração de vazios no escoamento líquido-gás. Observou-se que o método de medição da velocidade através de um limiar se comportou como a medição da energia e amplitude do sinal, possuindo uma tendência até 9% de fração de vazios. Para os outros métodos de medida de velocidade do som não foi possível verificar alguma tendência, pois a temperatura possui a mesma ordem de grandeza na alteração da velocidade do som que o escoamento bifásico.

Apesar de a velocidade não ser significamente alterada pelo escoamento bifásico, um estudo futuro detalhado da velocidade de fase em diversas freqüências pode ser utilizado como um indicador da dispersão causada pelas bolhas de ar, pois há alteração no formato da onda e algumas componentes de freqüências podem estar se deslocando a uma velocidade diferente da velocidade que atravessava a água líquida monofásica.

A amplitude máxima normalizada está de acordo com o trabalho de XU; LEONARD; GREEN (1985), e verificou-se que a energia também possui o mesmo comportamento exponencial.

Para este aparato experimental, a amplitude máxima e energia normalizada apresentaram correlação com a fração de vazios até o valor de 9%. Também verificou-se que para a vazão utilizada de água e ar, a média móvel se estabilizou em 1,5 s, e a janela utilizada para o cálculo da média coerente foi de 3,1. O período escolhido para o cálculo da média coerente é mais do que suficiente para representar o padrão de escoamento bifásico deste trabalho.

A atenuação em banda larga do ultra-som (BUA), que já é amplamente utilizada no diagnóstico de osteoporoses e foi apresentada pela primeira vez em 1984, também apresenta potencial para ser utilizado como técnica no auxílio da determinação da fração de vazios. Esta técnica foi aplicada, utilizando o mesmo princípio da densiometria mineral óssea, onde a redução da densidade do osso gera alteração no formato da onda. No caso do escoamento bifásico, a densidade também é alterada pelo aparecimento de vazios no meio contínuo, que é o líquido.

A proposta de normalização apresentou forte correlação linear para toda faixa estudada ($R^2 = 0,991$ - Figura 45). É uma nova proposta que demonstra potencial, pois utiliza o fato da deformação da onda que também é utilizado no BUA. Outra vantagem é que o parâmetro para normalização está contido no próprio sinal de ultra-som, dispensando a necessidade de aferição com um meio de referência. Estudo aprofundados e em outros circuitos multifásicos deverão ser aplicados, para validar completamente esta técnica.

A análise utilizando o BUA não apresentou uma grande correlação linear por toda a faixa testada, mas verificou-se uma tendência do aumento do nBUA com o aumento da fração de vazios.

O comportamento não linear pode-se ser explicado devido aos diversos padrões que podem ocorrer no escoamento. Verificou-se que a curva pode ser linearizado por partes de acordo com o padrão de escoamento, elevando o coeficiente de determinação para cada ajuste.

As duas técnicas propostas aproveitaram-se das características do escoamento bifásico distorcer o formato dele. Esta alteração do sinal de ultra-som pode ser utilizada como parâmetro de análise do escoamento bifásico.

Obviamente a interação do sinal de ultra-som com o escoamento bifásico é complexa, não linear e aleatória, por isso, a determinação de parâmetros simples para análise desta interação é de grande utilidade para construção de sistemas de inferências, podendo até ser embarcado em um sensor virtual (*Soft Sensor*).

O uso do ultra-som como técnica de determinação da fração de vazios e/ou do padrão de escoamento demonstra ser muito promissor e viável.

A aplicação deste trabalho pode ser útil para a ampliação do entendimento dos fenômenos acústicos em situações mais complexas, voltadas para as necessidades das aplicações reais, como escoamentos de líquido com sólido particulado, de água com óleo disperso e de água com óleo e sólido particulado disperso, e ainda escoamentos líquido-sólido-gás.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro, devem-se continuar e aprofundar os estudos apresentados nesta dissertação, para que haja um melhor entendimento dos mecanismos de interação entre a escoamento bifásico e a onda de ultra-som.

Estas propostas visam aumentar a precisão da medição da fração de vazios, contribuindo para obtenção de um método de estimação confiável que possa ser aplicado para medição multifásica e caracterização de escoamentos em situações reais da indústria petrolífera e indústria em geral.

- Desenvolvimento de uma rede neural com os diversos parâmetros analisados neste trabalho para determinação da fração de vazios ou padrão de escoamento.
- Aplicar o processo de normalização e BUA em outras seções de testes com diferentes diâmetros e diferentes tipos de líquidos como fase contínua, para verificar a influência destes parâmetros.
- Verificar qual é a correlação do processo de normalização proposto e da BUA em escoamentos com líquidos-sólidos e líquidos-sólidos-gás, se aproximando cada vez mais das condições operacionais da indústria.
- Aplicar o novo processo de normalização e BUA no modo pulso-eco para verificar as correlações existentes.
- Utilizar transdutores com freqüências diferentes para analisar a atenuação em função da freqüência.
- Estimar a velocidade de fase do sinal de ultra-som, pois como verificado, a onda é distorcida no domínio do tempo. Para isto recomenda-se o estudo de análises no tempo-freqüência, como por exemplo o uso de *wavelets*.
- Aplicar as técnicas apresentadas neste trabalho em escoamento líquido-sólido e líquido-sólido-gás.

- Implementar as técnicas propostas em tempo real no sistema de aquisição e processamento desenvolvido no LASCA/UTFPR.

REFERÊNCIAS

ASSEF, A. A. **Sistema de Aquisição e Processamento de Sinais de Ultra-Som para Caracterização de Meios Biológicos e Não Biológicos**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica e Informática Industrial - UTFPR, Curitiba-PR-Brasil, 2006.

BARBOSA, P. R. B. **Efeitos da Ponderação da Média Coerente e da Filtragem Detecção de Potenciais Tardios Ventriculares no Eletrocardiograma de Alta Resolução**. Tese (Doutorado) — COPPE/UFRJ, 2003.

BELOGOL'SKII, V. A.; SEKOYAN, S. S.; SAMORUKOVA, L. M.; STEFANOV, S. R.; LEVTSOV, V. I. Pressure dependence of the sound velocity in distilled water. **Acoustical Measurements**, Kluwer AcademicPublishers,, v. 42, p. 66–69, 1999.

BRENNEN, C. E. **Fundamentals of Multiphase Flows**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521848040.

CAI, S.; TORAL, H.; QIU, J.; ARCHER, S. Neural network based objective flow regime identification in air-water. **Can. J. Chem. Eng.**, v. 72, p. 440–445, march 1994.

CANTELLI, L.; FICHERA, A.; GUGLIELMINO, I. D.; PAGANO, A. Nonlinear dynamics of air-water mixtures in vertical pipes: experimental trends. **International Journal of Bifurcation and Chaos**, v. 16, p. 2749–2760, 2005.

CARVALHO, R. D. M.; VENTURI, O. J.; NEVES, F.; FRANçA, F. A. Analysis of ultrasonic signal used for the carachterization of bubbly air-water two-phase flow. **IV Congresso Rio Automação**, p. 1–8, May 2007.

CARVALHO, R. D. M.; VENTURI, O. J.; NEVES, F.; ARRUDA, L. V. R.; FRANçA, F. A. Experimental study of ultrasonic signal characteristics in air-water bubbly flows. 5th **International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodinamics**, v. 1, p. 42–47, May 2007.

CARVALHO, R. D. M.; VENTURINI, O. J.; TANAHASHI, E. I.; NEVES, F.; FRANçA, F. A. 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. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 33, n. 7, p. 1065–1086, 2009.

CHANG, J. S.; ICHIKAWA, Y.; IRONS, G. A. Flow regime characterization and liquid film thickness measurement in horizontal gás-liquid two-phase flow by an ultrasonic method. **AIAA/ASME Join Plasma Thermophysics HTC**, Elsevier, v. 2, p. 12–17, 1982.

CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves**. [S.l.]: CRCPress LLC, 2002.

DIAS, S.; FRANçA, F.; ROSA, E. S. Statistical method to calculate local interfacial variables in two-phase bubbly flows using intrusive crossing probes. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 26, p. 1797–1830, 2000.

DONG, F.; XU, Y.; HUA, L.; WANG, H. Two methods for measurement of gás-liquid flows in vertical upward pipe using dual-plane ERT system. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, IEEE, v. 55, p. 1576–1585, 2006.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. [S.l.]: LTC, 1996.

HAYKIN, S.; VEEN, B. V. **Signal and Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 1999.

HE, P. Simulation of ultrasound pulse propagation in lossy media obeying a frequency power law. **IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroeletrics, and Frequency Control**, v. 45, p. 114–125, 1998.

HERNáNDEZ, L.; JULIá, J. E.; CHIVA, S.; PARANJAPE, S.; ISHII, M. Fast classification of two-phase flow regimes based on conductivity signals and artificial neural networks. **Measurement Science and Technology**, Institute of Physics Publishing, v. 17, p. 1511–1521, 2006.

HOPPE, N.; SCHöNFELDER, G.; PüTTMER, A.; HAUPTMANN, P. Ultrasonic density sensor - higher accuracy by minimizing error influences. **IEEE Ultrasonics Symposium**, IEEE, v. 1, p. 361–364, 2001.

HUANG, Z.; WANG, B.; LI, H. Application of electrical capacitance tomography to the void fraction measurement of two-phase flow. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 52, p. 7–12, 2003.

JONES, O. C.; DELHAYE, J. M. Transient and statistical measurement techniques for two-phase flows: a critical review. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 3, p. 89–116, 1976.

JONES, O. C.; ZUBER, N. The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 2, p. 273–306, 1975.

JONES, S. W.; AMBLARD, A.; FAVREU, C. Interaction of an ultrasonic wave with a bubbly misture. **Experimental in Fluids**, Elsevier, v. 4, p. 341–349, May 1986.

JULIá, J. E.; LIU, Y.; PARANJAPE, S.; ISHII, M. Upward vertical two-phase flow local flow regime identification using neural networks techniques. **Nuclear Engineeringn and Design**, v. 238, p. 156–169, 2007.

KHISMATTULIN, D. B.; AKHATOV, I. S. Sound-ultrasound interaction in bubbly fluids: Theory and possible applications. **American Institute of Physics**, v. 13, p. 3582–3599, 2001.

LANGTON, C. M.; NJEH, C. The measurement of broadband ultrasonic attenuation in cancellous bone: A review of the science and technology. **IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroeletrics, and Frequency Control**, v. 55, p. 1546–1554, 2008.

LYNNWORTH, L. C. Industrial applications of ultrasound - a review ii: Measurements, tests, and process control using low-intensity ultrasound. **IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics**, v. 22, p. 71–101, 1975.

MACCHI, A.; GRACE, J. R.; BI, H. Use of ultrasound for phase holdup measurements in multiphase systems. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 79, p. 570–578, 2001.

MAIA, J. M. **Sistema Ultra-Sônico para Auxílio ao Diagnóstico da Osteoporose**. Tese (Doutorado) — UNICAMP, Campinas-PR-Brasil, 2001.

MI, Y.; ISHII, M.; TSOUKALAS, L. Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models. **Nucl. Eng. Des.**, v. 204, p. 87–100, 2001.

MURAKAWA, H.; KIKURA, H.; ARITOMI, A. Application of ultrasonic doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Elsevier, v. 29, p. 843–850, 2005.

NEVES, F.; MASSIGNAN, J. P. D.; NISHIDA, M. Y.; DACIUK, R. J. Sistema ultra-sônico para análise de líquidos em linha. **ISA SHOW SOUTH AMERICA 2006**, 2006.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. **Signals and Systems**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1996. 957 p.

PANAMETRICS. **Technical Notes**. [S.l.], 2005.

SBALQUEIRO, O. **Caracterização de líquidos através de ondas ultra-sônicas**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétricae Informática Industrial - UTFPR, Curitiba-PR-Brasil, 2006.

SILVA, C. B. da Costa e; FILHO, M. J. B.; PINHEIRO, J. A. **Medição de vazão e propriedades em escoamento multifásico: solução econômica para diferentes atividades industriais**. [S.l.], 2000. v. 43, 45-61 p.

SOONG, Y.; BLACKELL, A. G.; SCHEHL, R. R.; ZAROCHAK, M. F.; RAYNE, J. A. Ultrasonic characterization of three-phase slurries. **Chemical Engineering Communications**, v. 138, p. 213–224, 1995.

SUPARDAN, M. D.; MASUDA, Y.; MAEZAWA, A.; UCHIDA, S. The investigation of gás holdup distribution in a two-phase bubble column using ultrasonic computed tomography. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 10, p. 1016–1025, 2006.

VASCONCELOS, A. M.; CARVALHO, R. D. M.; VENTURI, O. J.; FRANçA, F. A. The use of ultrasonic technique for void fraction measurement in air-water bubly flows. **Proceedings of the** 11th **Brazilian Congress of Thermal Sciences and Egineering**, p. 1–14, Dec 2006.

VATANAKUL, M.; ZHENG, Y.; COUTURIER, M. Application of ultrasonic technique in multiphase flow. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 43, p. 5681–5691, 2004.

VIAL, C.; CAMARASA, C.; PONCIN, S.; WILD, G.; MIDOUX, N.; BOUILLARD, J. Study of hydrodynamic behaviour in bubble columns and external loop airlift reactors through analysis of pressure fluctuations. **Chem. Engin. Sci.**, v. 55, p. 2957–2973, 2000.

WARSITO, W.; OHKAWA, M.; MAEZAWA, A.; UCHIDA, S. Flow structure and phase distributions in a slurry bubble column. **Chem. Eng. Sci.**, v. 52, p. 3941–3947, 1997.

WEAR, K. A. The effects of frequency-dependent attenuation and dispersion on sound speed measurements:applications in human trabecular bone. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, IEEE, v. 47, p. 265–273, 2000.

WEBSTER, J. G. **The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook**. [S.l.]: CRCPress LLC, 1999.

WYLIE, S. R.; SHAW, A.; AL-SHAMMA'A, A. I. Rf sensor for multiphase flow measurement through an oil pipeline. **Measurement Science and Technology**, IOP, v. 17, p. 2141–2149, 2006.

XU, L. A.; GREEN, R. G.; PLASKOWSKI, A.; BECK, M. S. The pulsed ultrasonic cross-correlation flowmeter for two-phase flow measurement. **Journal of Physics and Scientific Instrumentation**, 1988, v. 21, p. 496–414, 1988.

XU, L. A.; LEONARD, D.; GREEN, R. G. A pulsed ultrasound transduscer system for two component flow. **Journal of Physics and Scientific Instrumentation**, 1985, v. 18, p. 609–613, 1985.

ZHENGH, Y. Ultrasonic measurement for two/three-phase flow detection. **Chemical Engineering Science**, v. 81, p. 268–270, 2003.

ZHENGH, Y.; ZHANG, Q. Simultaneous measurement of gas and solid holdups in multiphase systems using ultrasonic technique. **Chemical Engineering Science**, v. 59, p. 3505–3514, 2004.