



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

Faculdade de Engenharia Química

**Cáio César Silva Araújo**

**Sistema ultrassônico para determinação do perfil de  
velocidade, da fração de vazio e da vazão da fase  
dispersa em coluna de bolhas**

CAMPINAS-SP

2021

**Cáio César Silva Araújo**

**Sistema ultrassônico para determinação do perfil de  
velocidade, da fração de vazio e da vazão da fase  
dispersa em coluna de bolhas**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Dra. Ana Maria Frattini Fileti

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À  
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DE-  
FENDIDA PELO ALUNO CÁIO CÉSAR  
SILVA ARAÚJO, E ORIENTADO PELA  
DRA. ANA MARIA FRATTINI FILETI.

CAMPINAS-SP

2021

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Ar15s Araújo, Cáo César Silva, 1993-  
Sistema ultrassônico para determinação do perfil de velocidade, da fração de vazio e da vazão da fase dispersa em coluna de bolhas / Cáo César Silva Araújo. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Ana Maria Frattini Fileti.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Análise no domínio do tempo. 2. Ultrassom. 3. Escoamento multifásico. 4. Fração de vazio. 5. Ultrassom. 6. Vazão. I. Fileti, Ana Maria Frattini, 1965-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Ultrasonic system for determination of the velocity profile, of the void fraction and of the dispersion of the dispersed phase in bubble column

**Palavras-chave em inglês:**

Time domain analysis

Ultrasound

Multiphase flow

Void fraction

Flow

**Área de concentração:** Engenharia Química

**Titulação:** Mestre em Engenharia Química

**Banca examinadora:**

Ana Maria Frattini Fileti [Orientador]

Renato da Rocha Lopes

Oscar Maurício Hernandez Rodriguez

**Data de defesa:** 09-03-2021

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Química

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-5628-9219>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/3084200946559423>

Esta dissertação de mestrado foi defendida por Cáo César Silva Araújo no dia 09 de março de 2021 e aprovada na mesma data pela seguinte comissão examinadora:

Profa. Dra. Ana Maria Frattini Fileti  
Presidente e orientadora  
FEQ/UNICAMP  
Videoconferência

Prof. Dr. Renato da Rocha Lopes  
FEEC/UNICAMP  
Videoconferência

Prof. Dr. Oscar Maurício Hernandez Rodriguez  
EESC/USP  
Videoconferência

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

## **Dedicatória**

Esta dissertação é dedicada à minha família.

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais Romeu Leite de Araújo e Maria José Silva Araújo pelo respeito, carinho e apoio durante toda a minha formação acadêmica.

À minha esposa Fabricia da Silva Araújo pelo amor, incentivo e apoio que sempre me direcionou.

A minha orientadora Professora Dra. Ana Maria Frattini Fileti pela orientação, apoio e paciência. Agradeço também os valiosos conselhos, incentivos e sugestões que de certo foram fundamentais para que os resultados fossem alcançados.

Ao Professor Dr. Flávio Vasconcelos da Silva por todo o apoio técnico-científico durante o mestrado.

Ao engenheiro Msc. Tiago Ferreira Souza pelas ricas discussões e análises que desenvolvemos. Agradeço também pela disponibilidade e vontade em ajudar nas atividades experimentais.

Ao engenheiro Dr. Maurício de Melo Freire Figueiredo pelos valiosos ensinamentos em programação, processamento de sinais, e técnicas de pesquisa e escrita que me conferiu ao longo do mestrado.

Ao Marcos Vinícius Ramos Estevom e aos técnicos da FEQ (Faculdade de Engenharia Química) pela infraestrutura disponibilizada, a qual foi fundamental para a execução da montagem experimental.

Aos técnicos Luís Gustavo Silva e Cláudio Varani e aos pesquisadores Dr. William Monte Verde e Dr. Jorge Luiz Biazussi do grupo de pesquisa ALFA do Centro de Estudos de Petróleo da Universidade Estadual de Campinas pelo apoio durante a construção da montagem experimental.

À PETROBRAS e a ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) pelo auxílio financeiro fornecido.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A mente que se abre para alguma coisa  
nova, nunca mais será a mesma.

---

Albert Einstein

## Resumo

A necessidade de medidores multifásicos de vazão na indústria de óleo e gás surgiu a partir da demanda por monitorar escoamentos multifásicos sem a necessidade de prévia separação das fases presentes no escoamento. Deste modo, estes medidores permitem o monitoramento contínuo do escoamento, além de apresentar custo reduzido de instalação e manutenção em relação aos separadores multifásicos. Em relação aos medidores multifásicos existentes, o ultrassom apresenta vantagens devido ao baixo custo, resposta rápida, caráter não intrusivo e não invasivo, e adequação de uso em meios opacos o que confere versatilidade quanto a aplicação. Embora diversos tipos de medidores multifásicos tenham sido propostos, nota-se ausência de trabalhos efetuando o cálculo da vazão da fase dispersa utilizando somente o ultrassom. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo propor um procedimento para determinar a vazão da fase dispersa em escoamento bolhas utilizando uma montagem experimental coluna de bolhas. A coluna foi instrumentada com sensores de pressão, temperatura e vazão para determinar as propriedades de ambos os fluidos e uma câmera de filmagem rápida para caracterizar o escoamento bolhas. Os experimentos foram realizados variando a vazão de ar na faixa de 0 a 4 litros por minuto, com a fase líquida estagnada. Cada medição foi repetida 5 vezes em 9 experimentos, resultando em 405 medições. Foram utilizados: água como fase contínua e ar como fase dispersa. O sistema de aquisição utilizado operou no modo pulso-eco parametrizado com a taxa de amostragem de 50 MHz, taxa de pulsação de 2 kHz e transdutor único inclinado. Foram testados transdutores com frequência central de 1, 2,25 e 5 MHz. Além disto, os transdutores foram posicionados nas inclinações de 5, 10 e 15° em relação ao escoamento. A partir dos sinais ultrassônicos de um único transdutor inclinado, foi utilizada a técnica de correlação cruzada para mensurar a velocidade das bolhas e o coeficiente de variação para estimar as frações de vazão da fase dispersa. Além disto, foi utilizado a técnica de casamento de modelo para determinar a velocidade da fase dispersa a partir das imagens obtidas do escoamento. Foi proposto um procedimento para a determinação da vazão utilizando apenas sinais ultrassônicos. Os melhores resultados de vazão foram obtidos com o transdutor inclinado 10° e frequência central de 1 ou 2,25 MHz, apresentando desvios máximos da referência de 35%.

**Palavras-chave:** Coluna de bolhas, correlação cruzada no domínio do tempo, escoamento bolhas, vazão, ultrassom.

## Abstract

The need for multiphase flow meters in the oil and gas industry arose from the demand for monitoring multiphase flows without prior separation of the phases present in the flow. In this way, these meters allow continuous flow monitoring, in addition to having reduced installation and maintenance costs in relation to the multiphase separators. In relation to the existing multiphase meters, ultrasound has advantages due to its low cost, quick response, non-intrusive and non-invasive character, and suitability for use in opaque media, which provides versatility in terms of an application. Although several types of multiphase meters have been proposed, there is an absence of papers calculating the flow rate of the dispersed phase using only ultrasound. Therefore, this work aims to propose a procedure to determine the flow rate of the dispersed phase in the flow of bubbles using an experimental bubble column. The bubble column was instrumented with pressure, temperature and flow sensors to determine the properties of both fluids and a high-speed camera to characterize the flow of bubbles. The experiments were carried out by varying the air flow in the range of 0 to 4 liters per minute, with stagnant liquid phase. Each measurement was repeated 5 times in 9 experiments, resulting in 405 measurements. The two-phase mixture was composed by water as continuous phase and air as dispersed phase. The acquisition system operated in parameterized pulse-echo mode with a sampling rate of 50 MHz, a pulse rate of 2 kHz and a single inclined transducer. Transducers were tested with a central frequency of 1, 2.25 and 5 MHz. In addition, the transducers were inclined by 5, 10 and 15° in relation to the flow. From the ultrasonic signals of a single inclined transducer, the cross correlation technique was used to measure the velocity of the bubbles and the coefficient of variation to estimate the void fractions of the dispersed phase. In addition, the model matching technique was used to determine the velocity of the dispersed phase from the flow images. A procedure for determining the flow rate using only ultrasonic signals has been proposed. The best flow results were obtained with the inclined transducer 10° and central frequency of 1 or 2.25 MHz, with maximum deviations from the reference of 35 %.

**Keywords:** Bubble column, ultrasound time-domain cross-correlation (UTDC), bubble flow, flow rate, ultrasound.

## Lista de Figuras

1.1	Exemplo de planta de exploração de petróleo. . . . .	17
3.1	Padrões de escoamento água-ar vertical ascendente em coluna de bolhas. . . . .	25
3.2	Mapa de padrão de escoamento água-ar em coluna de bolhas. . . . .	26
3.3	Mapa de regimes de formas de bolhas em escoamento bolhas. . . . .	28
3.4	Deslocamento das bolhas ao longo da faixa de medição ultrassônica (esq.) e os respectivos sinais eco ultrassônico. . . . .	30
3.5	Função correlação cruzada entre sinais eco ultrassônico. Atraso entre sinais em destaque. . . . .	30
3.6	Janelas com maior casamento entre dois frames consecutivos. . . . .	32
3.7	Principais mecanismos de dissipação de onda acústica. . . . .	33
3.8	Fenômenos de reflexão e refração de onda acústica com incidência oblíqua em interface plana. . . . .	35
4.1	Diagrama P&ID (esq.) e imagem real da montagem experimental (dir.) . . . . .	37
4.2	Componentes do sistema de medição ultrassônico. . . . .	38
4.3	Região de transição do padrão de escoamento bolhas. . . . .	40
4.4	Regimes de escoamento bolhas (esq.) e de transição (centro e dir.). . . . .	41
4.5	Fluxograma para coleta de dados. . . . .	42
4.6	Fluxograma para determinação da velocidade das bolhas via análise de imagens. . . . .	43
5.1	Imagens do escoamento com vazões de 0,5 (esq.), 2,5 (centro) e 4,0 (dir.) LPM. . . . .	45
5.2	Ecograma com vazões de 0,5 (esq.), 1,5 (centro) e 2,5 (dir.) LPM. . . . .	46
5.3	Movimento oscilatório de ascensão das bolhas. . . . .	47
5.4	Fluxograma para a determinação do perfil de velocidade das bolhas via correlação cruzada utilizando sinais ultrassônicos. . . . .	48
5.5	Comparativo de velocidades médias de ascensão das bolhas na coluna de bolhas. . . . .	50
5.6	Influência do ângulo de emissão acústica para estimar o deslocamento da interface das bolhas ao longo da linha de medição do ultrassom. . . . .	51
5.7	Ajuste das frações de vazio obtidas pelo sistema de diferença de pressão em função do coeficiente de variação obtido pelo ultrassom. . . . .	52
5.8	Procedimento para obter a vazão da fase dispersa utilizando sinais ultrassônicos. . . . .	53
5.9	Vazão da fase dispersa estimada pelo ultrassom versus rotâmetro. . . . .	54
5.10	Desvio percentual da vazão da fase dispersa estimada pelo ultrassom em relação ao rotâmetro. . . . .	55
6.1	Especificação do transdutor ultrassônico de 1 MHz. . . . .	65
6.2	Especificação do transdutor ultrassônico de 2,25 MHz. . . . .	66
6.3	Especificação do transdutor ultrassônico de 5 MHz. . . . .	67
6.4	Perfis de velocidade mensurados com o ultrassom a 5° e 1 MHz. . . . .	68
6.5	Perfis de velocidade mensurados com o ultrassom a 5° e 2,25 MHz. . . . .	69

6.6	Perfis de velocidade mensurados com o ultrassom a 5° e 5 MHz. . . . .	69
6.7	Perfis de velocidade mensurados com o ultrassom a 10° e 1 MHz. . . . .	70
6.8	Perfis de velocidade mensurados com o ultrassom a 10° e 2,25 MHz. . . . .	70
6.9	Perfis de velocidade mensurados com o ultrassom a 10° e 5 MHz. . . . .	71
6.10	Perfis de velocidade mensurados com o ultrassom a 15° e 1 MHz. . . . .	71
6.11	Perfis de velocidade mensurados com o ultrassom a 15° e 2,25 MHz. . . . .	72
6.12	Perfis de velocidade mensurados com o ultrassom a 15° e 5 MHz. . . . .	72

## **Lista de Tabelas**

4.1	Especificações dos instrumentos de medição. . . . .	38
4.2	Especificação do dispositivo de aquisição e valores utilizados no sistema de aquisição de sinais ultrassônicos. . . . .	39
4.3	Matriz de testes. . . . .	41
5.1	Diâmetro médio das bolhas mensurados por análise de imagens. . . . .	45

## Glossário

### *Letras Latinas*

$A$	- Área da seção transversal	$[m^2]$
$d_m$	- Diâmetro médio das bolhas	$[mm]$
$g$	- Aceleração da gravidade local	$[m/s^2]$
$Q_g$	- Vazão volumétrica de gás obtida pelo rotâmetro	$[LPM]$
$Q_{US}$	- Vazão volumétrica de gás obtida pelo ultrassom	$[LPM]$
$c$	- Velocidade de propagação do som no meio	$[m/s]$
$c_p$	- Calor específico a pressão constante	$[kJ/(Kg.K)]$
$Z$	- Impedância acústica	$[kg/(s.m^2)]$
$K$	- Número de onda	$[1/m]$
$a$	- Comprimento característico médio da partícula	$[m]$
$e(k,n)$	- Sinal eco com k pulsos e n seções	$[V]$
$Ka$	- Numero de onda linear admiesional	$[-]$
$t$	- Tempo	$[s]$
$t_d$	- Atraso	$[s]$
$v_g$	- Velocidade real de gás	$[m/s]$
$v_{sg}$	- Velocidade superficial de gás	$[m/s]$
$v$	- Velocidade real de gás mensurada pelo ultrassom	$[m/s]$
$\bar{v}$	- Velocidade real de gás média mensurada pelo ultrassom	$[m/s]$
$v_{pm}$	- Velocidade real de gás medida pelo rotâmetro no ponto de medição ultrassônica	$[m/s]$
$v_{HSC}$	- Velocidade real de gás medida pela câmera	$[m/s]$
$fr$	- Frame	$[-]$
$R$	- Coeficiente de reflexão	$[-]$
$T$	- Coeficiente de transmissão	$[-]$
$E$	- Vetor de energia	$[V^2]$
$f_{PRF}$	- Taxa de pulsação	$[Hz]$
$\Delta_{US}$	- Deslocamento mensurado pelo ultrassom	$[^\circ]$
$\bar{E}$	- Média do sinal de energia	$[V^2]$
$s_E$	- Desvio padrão do sinal de energia	$[V^2]$
$E_o$	- Número de Eötvös	$[-]$
$M$	- Número de Morton	$[-]$
$Re$	- Número de Reynolds	$[-]$

### **Letras Gregas**

$\mu_l$	- Viscosidade dinâmica do fluido	[V <sup>2</sup> ]
$\rho_l$	- Massa específica do meio contínuo	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	- Massa específica do gás	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\beta$	- Coeficiente de Absorção	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	- Fração de vazio da fase dispersa	[%]
$\sigma_l$	- Tensão superficial do líquido	[N/m]
$\theta$	- Ângulo formado entre a direção normal à tubulação e a linha de medição ultrassônica	[°]
$\theta_c$	- Ângulo crítico	[°]
$\omega$	- Frequência angular	[rad/s]
$\kappa$	- coeficiente de difusão térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\eta$	- coeficiente de viscosidade do fluido	[ ]
$\gamma$	- razão dos calores específicos	[-]
$\lambda$	- Comprimento de onda	[m]
$f$	- Frequência da onda acústica	[-]

### **Abreviaturas e Siglas**

LCAP	- Laboratório de controle e automação de processos
FEQ	- Faculdade de Engenharia Química
UNICAMP	- Universidade Estadual de Campinas
CLP	- Controlador lógico programável
LPM	- Litros por minuto
LPF	- Low Pass Filter
CV	- Coeficiente de Variação
HSC	- Câmera de filmagem rápida
TT	- Temperatura
PT	- Pressão
UT	- Estação ultrassônica
FI	- Medidor de vazão

# Sumário

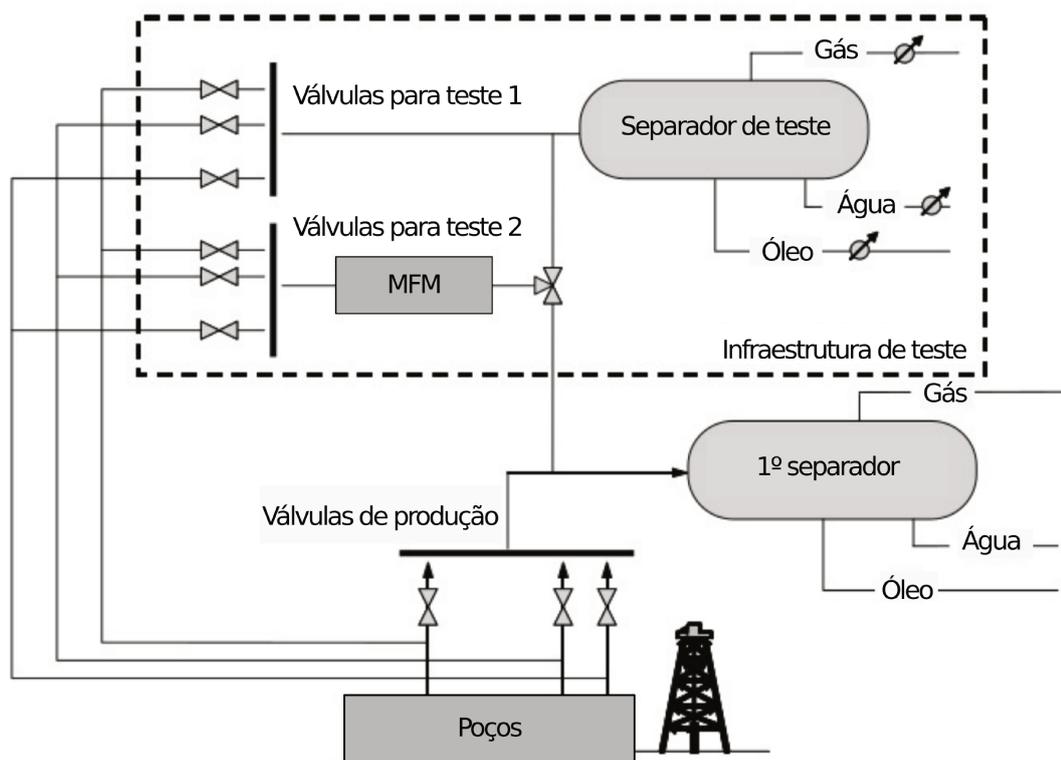
<b>Lista de Figuras</b>	<b>10</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>11</b>
<b>Glossário</b>	<b>12</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>17</b>
1.1 Objetivos . . . . .	19
<b>2 Revisão bibliográfica</b>	<b>21</b>
<b>3 Fundamentação teórica</b>	<b>25</b>
3.1 Hidrodinâmica da coluna de bolhas . . . . .	25
3.1.1 Padrão de escoamento . . . . .	25
3.1.2 Formato das bolhas em meio infinito . . . . .	27
3.1.3 Velocidade terminal . . . . .	28
3.2 Processamento de sinais ultrassônicos ou imagem . . . . .	29
3.2.1 Correlação cruzada no domínio do tempo . . . . .	29
3.2.2 Coeficiente de variação . . . . .	31
3.2.3 Casamento de modelo . . . . .	31
3.3 Fundamentos acústicos . . . . .	32
3.3.1 Ultrassom . . . . .	32
3.3.2 Mecanismos de dissipação . . . . .	32
3.3.3 Número de onda linear adimensional . . . . .	36
<b>4 Dispositivos experimentais e procedimentos de teste</b>	<b>37</b>
4.1 Montagem experimental do tipo coluna de bolhas . . . . .	37
4.2 Sistema de medição ultrassônico . . . . .	38
4.3 Planejamento experimental . . . . .	40
4.4 Procedimento experimental . . . . .	42
4.5 Procedimento para determinação da velocidade utilizando câmera . . . . .	43
4.6 Medição da fração de vazio utilizando diferença de pressão . . . . .	44
<b>5 Resultados e discussões</b>	<b>45</b>
5.1 Diâmetro e forma das bolhas . . . . .	45
5.2 Análise do movimento de ascensão das bolhas . . . . .	46
5.3 Procedimento para o cálculo da velocidade . . . . .	47
5.4 Velocidade de ascensão das bolhas . . . . .	49
5.5 Fração de vazio . . . . .	52

5.6	Procedimento para o cálculo da vazão . . . . .	53
5.7	Vazão da fase dispersa . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>56</b>
6.1	Conclusões gerais . . . . .	56
6.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	56
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>58</b>
	<b>Apêndice A - Especificação dos transdutores</b>	<b>65</b>
	<b>Apêndice B - Perfis de velocidade</b>	<b>68</b>

## 1 Introdução

Encontra-se representado na Figura 1.1 um recorte do processo de extração do petróleo offshore. Durante a extração do petróleo diversas fases estão presentes como óleo, água, gás natural. Um grande desafio presente na indústria do petróleo é a determinação das vazões com que cada fase escoa nas tubulações provenientes de cada poço. A mensuração das vazões é realizada, predominantemente, através de separadores de teste (Figura 1.1). Para que as fases possam ser separadas nos separadores de teste, o escoamento da linha de produção é desviado utilizando um conjunto de válvulas [1]. A vazão de cada fase é então mensurada através de medidores monofásicos. Neste contexto, os medidores multifásicos de vazão (MFM) permitem mensurar continuamente as vazões de cada fase presente no escoamento sem necessidade de separá-las.

Figura 1.1: Exemplo de planta de exploração de petróleo.



Fonte: Falcone et al. [2]

Deste modo, é possível otimizar espaço das plataformas, reduzir custos de instalação e manutenção das tubulações utilizadas no desvio do escoamento e possibilitar o monitoramento e controle da produção de cada poço individualmente [3]. Por fim, destaca-se a possibilidade de realizar a gestão dos reservatórios e alocação da produção, uma vez que é possível realizar o acompanhamento do estado de maturação de poços, através do monitoramento da proporção de vazão das fases.

Visando a caracterização de escoamentos multifásicos, no presente trabalho foi utilizada

uma montagem experimental simplificada denominada coluna de bolhas. Colunas de bolhas são dispositivos cilíndricos dentro dos quais se injeta ar pela base [4], com a fase contínua estacionária ou em movimento. Embora apresente particularidades em relação a dinâmica do escoamento, colunas de bolhas têm sido utilizadas como modelo simplificado para estudar escoamentos multifásicos. Utilizando a razão de energia de sinais ultrassônicos, Figueiredo [5] empregou uma coluna de bolhas para analisar a formação de microbolhas em escoamentos com fluidos mais viscosos que a água. Empregando a mesma montagem que Figueiredo [5], Nakashima [6] determinou padrões de escoamento e frações de vazio através de redes neurais utilizando sinais ultrassônicos.

Diferentes técnicas e instrumentos vem sendo aplicados na medição multifásica [7] [8]. Hansen et al. [1] apresenta uma revisão a cerca da caracterização de escoamentos multifásicos utilizando técnicas baseadas em tomografia. As técnicas de densitometria por raios gama, impedância, microondas, pressão diferencial e correlação cruzada tem sido aplicadas na determinação da velocidade e da fração de vazio das fases presentes nos escoamentos multifásicos [3]. As medições realizadas pela técnica de densitometria por raios gama são baseadas na atenuação da intensidade dos raios gama transmitidos através da tubulação. Apesar de ser um técnica comum no âmbito industrial, devido à alta penetração dos fótons no escoamento, apresenta desvantagens relativas ao alto custo, problemas regulatórios e de apresentar risco na operação e manutenção devido ao conteúdo radioativo [3].

A técnica de microondas opera através da emissão e recepção de ondas eletromagnéticas através da tubulação. As perturbações induzidas nas ondas são associadas à diferença de permissividade entre as fases presentes no escoamento. Embora não necessite de contato mecânico com o objeto e penetre em uma grande variedade de fluidos, é limitada em relação a resolução espacial e necessita de calibração específica para diferentes fluidos [9]. Os métodos baseados em impedância elétrica aplicam corrente elétrica em eletrodos instalados na tubulação com o objetivo de explorar a diferença de impedância entre as fases presentes na malha de eletrodos [1]. A técnica de impedância *wire-mesh* tem sido utilizada para determinação da velocidade e da fração de vazio ao longo da seção transversal. Esta técnica é intrusiva, invasiva, dependente do padrão de escoamento e suscetível a problemas de inversão de fase [10], no entanto, apresenta alta resolução espacial e temporal, e baixo custo [7].

A partir da diferença de pressão entre dois pontos no interior da tubulação, transmissores de pressão são empregados para determinar a velocidade do escoamento através do princípio de Bernoulli. Os medidores mais encontrados utilizam tubos de venturi ou placas de orifício [1]. As principais limitações desta técnica dizem respeito à intrusividade, dependente do padrão de escoamento e da condição do escoamento a montante, a necessidade de calibração prévia e da viscosidade efetiva do líquido [3][11]. A técnica de correlação cruzada é aplicada em geral para correlacionar um sinal obtido por sensores em duas posições distintas ao longo do comprimento da tubulação. A correlação cruzada tem sido empregada com diferentes instrumentos: i) Pressão diferencial [12], temperatura diferencial [13], impedância elétrica [14] e emissão acústica [15].

Uma vez determinado o atraso existente entre os sinais e conhecida a distância entre os sensores, a velocidade pode ser determinada. No entanto, esta técnica necessita que os sinais apresentem traços proeminentes e característicos do escoamento a ser mensurado [3].

Neste contexto, o ultrassom vem se destacando pelas características de resposta rápida, alta precisão, não ser intrusivo e nem invasivo, fácil instalação, relativo baixo custo e operação mais segura em relação as técnicas nucleares [16]. Além disto, confere a possibilidade de ser aplicado para fluidos opacos [17] e em escoamentos com temperaturas e pressões elevadas [18]. A técnica, no entanto, é limitada em meios com grande atenuação acústica [19].

Neste trabalho é proposto um sistema para medição de vazão utilizando o ultrassom em conjunto com a técnica de correlação cruzada no domínio do tempo de sinais ultrassônicos (UTDC). O sistema é composto de apenas um transdutor ultrassônico, operando em modo pulso/eco, e um dispositivo integrado de pulsador e sistema para aquisição de dados. Para realizar a aquisição dos dados, foi projetada e construída uma montagem experimental para reproduzir escoamento vertical no padrão bolhas em um meio infinito. A montagem constituiu-se de uma linha vertical de 2,5 m, a qual foi instrumentada com sensores de temperatura, pressão e vazão para estimar as propriedades do ar e da mistura bifásica, mensurar a fração e a vazão da fase dispersa no ponto de medição ultrassônica. Além disto, foi utilizada uma câmera de filmagem rápida para monitorar a estrutura do escoamento e mensurar a velocidade das bolhas. Utilizando apenas o ultrassom, foi possível determinar a vazão das bolhas a partir da estimativa individual da velocidade e a fração de vazão da fase dispersa.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é contribuir com o desenvolvimento da técnica ultrassônica visando estimar a velocidade, a fração de vazão e a vazão da fase dispersa em escoamento bolhas. Para tal, determinou-se trabalhar com escoamento bolhas, em meio estacionário, propondo-se os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e construir uma montagem experimental do tipo coluna de bolhas para realizar medições ultrassônicas de modo não invasivo e não intrusivo;
- Desenvolver uma rotina computacional para determinar o perfil de velocidade de ascensão da fase dispersa em escoamento bolhas utilizando a técnica de correlação cruzada no domínio do tempo de sinais ultrassônicos, provenientes de transdutor único inclinado;
- Avaliar as estimativas de velocidade pela técnica de correlação cruzada no domínio do tempo para diferentes inclinações do transdutor em relação ao escoamento e diferentes frequências centrais dos transdutores ultrassônicos;
- Desenvolver uma rotina computacional para determinar a velocidade das bolhas utili-

zando técnicas de processamento de imagens, com a finalidade de ter uma medição independente para comparação;

- Determinar a fração de vazão experimental por modelo analítico baseado na diferença de pressão entre duas estações verticalmente espaçadas;
- Estimar a fração de vazão da fase dispersa utilizando sinais ultrassônicos;
- Determinar as vazões da fase dispersa utilizando ultrassom.

## 2 Revisão bibliográfica

Sistemas ultrassônicos para medição de velocidade vêm sendo empregados desde a década de 50 em aplicações médicas [20], utilizando, inicialmente, sistemas de ondas contínuas para diagnósticos do sistema circulatório humano. Estudos envolvendo fluidodinâmica de escoamentos têm o início marcado pelos trabalhos de Takeda [21], nos quais se determinou os perfis de velocidades em escoamentos monofásicos do tipo vortex de Taylor e Poissulle através da análise do sinal ultrassônico no domínio da frequência. Desde então diferentes técnicas ultrassônicas vêm sendo estudadas e desenvolvidas.

Os medidores ultrassônicos podem ser classificados de acordo com o caminho percorrido pela onda acústica no meio. As técnicas de tempo de trânsito e correlação cruzada com duas estações ultrassônicas axialmente espaçadas utilizam o modo de transmissão de ondas através da tubulação. As técnicas Doppler, *velocity matched spectrum* (VMS) e correlação cruzada com apenas uma estação ultrassônica, no entanto, são baseadas nos mecanismos de dissipação acústica por interface de ondas a partir das bolhas presentes no escoamento.

A técnica ultrassônica tempo de trânsito determina a velocidade do fluido a partir do atraso existente entre os pulsos ultrassônicos propagados a favor e contra a direção do fluido [22]. Na ausência de escoamento o atraso é nulo. Lynnworth and Liu [16] apresentaram uma revisão dos principais conceitos técnicos, características e aplicações dos medidores de vazão por tempo de trânsito desenvolvidos. Esta técnica é empregada na determinação da velocidade média de escoamentos monofásicos, além disto é necessário que a tubulação esteja completamente preenchida com a fase contínua.

A técnica de correlação cruzada com duas estações tem sido empregada na caracterização de escoamentos multifásicos. Coulthard [15] descreveu o sistema de medição baseado na técnica de correlação cruzada de sinais eco com um sistema de transmissão de ondas contínuas em ambas as estações. Utilizando ondas pulsadas, Figueiredo [19] propôs um sistema de medição baseado na correlação cruzada de sinais de energia associado aos sinais eco. Foi possível mensurar as velocidades e as frações de vazão presentes nos escoamentos verticais pistonado e bolhas dispersas. Combinando as técnicas de correlação cruzada com o modelo de *drift flux* e o modelo da onda cinemática, Shi et al. [23] estabeleceram um modelo para cálculo de velocidade das fases. Embora a medição utilizando duas estações ultrassônicas não dependa explicitamente da velocidade de propagação do som no meio, este medidor não efetua o cálculo do perfil de velocidades na seção transversal [24] e apresenta um eletrônica mais sofisticada que os medidores baseados na utilização de apenas uma estação ultrassônica.

Dentre as técnicas baseadas nas dissipações acústicas de interface, os medidores ultrassônicos baseados no efeito Doppler podem ser divididos entre sistemas de ondas contínuas e ondas pulsadas [25]. A principal diferença reside na eletrônica utilizada. O sistema que opera com ondas contínuas dispõem de um transdutor dedicado para a transmissão e outro para a detecção contínua de ondas acústicas. O sistema pulsado, no entanto, opera com um transdu-

tor alternando entre emissão e recepção de sinais eco provenientes da reflexão dos pulsos ultrassônicos nas interfaces.

Utilizando sistema de ondas contínuas baseados no Doppler ultrassônico, Dong et al. [25] propuseram um sistema combinando sensores condutivos e ultrassônicos para medição de velocidade e frações de vazio nos padrões de escoamentos horizontais bifásicos líquido-gás bolhas dispersas, bolhas alongadas e pistonado. Shi et al. [26] propuseram um modelo para a caracterização da célula unitária em escoamentos pistonados baseado na decomposição do sinal Doppler em funções de modo intrínseco. Aplicando o ultrassom em escoamentos trifásicos óleo-água-ar, Tan et al. [27] desenvolveram um modelo para estimar a velocidade das fases a partir das equações de momento e do modelo de dois fluidos. Apesar das aplicações encontradas, esta técnica possui a desvantagem de não determinar o perfil de velocidade e necessitar de mais de um transdutor ultrassônico ou um transdutor com duplo elemento.

A técnica ultrassônica Doppler pulsado estima a frequência Doppler ( $f_d$ ) a partir da diferença de fase das ondas entre sinais acústicos. Utilizando partículas em um escoamento bifásico líquido-gás ascendente, Wongsaroj et al. [28] propuseram um método para separar a velocidade das fases baseando-se na análise de amplitude do sinal eco. Aplicando o ultrassom em conjunto com um sistema de monitoramento por vídeo em escoamento vertical bifásico líquido-gás contracorrente, Aritomi et al. [29] propuseram um sistema para mensurar simultaneamente os perfis de velocidade e frações de vazio de ambas as fases para frações da fase dispersa abaixo de 7%. Murakawa et al. [30] empregaram um transdutor de dupla frequência em escoamento verticais monofásicos ou bifásicos com baixas frações da fase dispersa. Os autores concluíram que em escoamentos contendo partículas de diferentes ordens de grandeza é necessário realizar a adequação tanto da frequência quanto do diâmetro do transdutor. Em comparação com o sistema de ondas contínuas, este sistema apresenta a vantagem de discretizar a velocidade ao longo da seção transversal, embora apresente limitação de velocidade devido ao princípio de medição baseado na defasagem entre ondas acústicas. Uma vez que esta técnica é sensível ao conteúdo de frequência do sinal eco, este método é limitado com relação a atenuação acústica do meio no qual as ondas se propagam.

Proposto inicialmente por Torp and Kristoffersen [31], a técnica *Velocity Matched Spectrum* (VMS) se diferencia dos estimadores baseados no efeito Doppler, pois calcula o espectro de velocidades. A partir deste espectro se obtém a velocidade da fase dispersa e uma medida energia associada ao sinal eco [17]. Coutinho et al. [17] aplicaram este método na detecção de interface de bolhas ascendentes em movimento livre em um meio infinito. Embora demande uma maior carga computacional e apresente dificuldade de determinar com precisão a posição das interfaces para indexar a velocidade calculada, a informação adicional de amplitude confere a possibilidade de aplicar a técnica na separação das velocidades das fases presentes em escoamentos multifásicos.

A técnica UTDC utilizando apenas uma estação ultrassônica foi descrita analiticamente por Bonnefous and Pesqué [32]. Hein and O'Brien [33] reportaram que, em relação ao Doppler

pulsado, a técnica UTDC apresenta menor variância nas medições de velocidade, é independente da atenuação das componentes de frequência no sinal eco e da frequência central dos pulsos ultrassônicos e determina a direção do escoamento de forma direta. Uma vez que a velocidade máxima estimada pela técnica UTDC está relacionada com a ocorrência de falsos picos na função correlação cruzada, Wada et al. [34] estudaram e demonstraram que utilizando pulsos com inversão parcial é possível mitigar a incidência de falsas detecções e, assim, mensurar velocidade maiores. Com vistas à utilização do ultrassom em estudos envolvendo turbulência, Sato et al. [35] e Ozaki et al. [36] demonstraram a viabilidade de aplicação da técnica para estudos que necessitem de resposta temporal na ordem de microssegundos. Pan and Chiang [37] compararam as técnicas de correlação cruzada, decorrelação e Doppler pulsado em escoamentos variando a inclinação de 50° a 90° com relação a direção do escoamento em relação ao desvio entre a velocidade mensurada pelo ultrassom e pela referência. Embora apresente um custo computacional mais elevado que as técnicas convencionais Doppler, a técnica UTDC além de apresentar melhor resolução temporal e espacial em relação ao Doppler Pulsado combina as vantagens de ser capaz de detectar, sem ambiguidade, elevadas velocidades discretizadas ao longo da seção transversal, pois, em teoria, é necessário que a mesma partícula seja detectada pelo menos por dois pulsos consecutivos. A limitação no cálculo da velocidade está relacionado com a detecção e tratamento de falsos picos que possam estar presentes na função correlação cruzada [38][39][40]. De modo geral, a velocidade máxima mensurável está relacionada com a largura do feixe ultrassônico e da taxa de pulsação [41].

Além do cálculo da velocidade, a técnica ultrassônica também vem sendo aplicada para mensurar frações de vazio. Empregando o ultrassom em uma mistura trifásica sólido-líquido-gás, Soong et al. [42] determinaram a concentração da fase sólida utilizando a análise dos pulsos ultrassônicos que trafegam através da seção transversal da tubulação. Os autores encontraram uma relação entre a variação da amplitude e do tempo de trânsito do sinal eco com a fração da fase sólida. Empregando apenas um transdutor operando no modo pulso eco em um escoamento bifásico líquido-gás, Chakraborty et al. [43] mensuraram a frações de vazio da fase dispersa utilizando análise via técnicas de computação simbólica do sinal refletido da parede oposta da tubulação. Carvalho et al. [44] investigaram a relação entre a razão de energia e o tempo de trânsito dos sinais ultrassônicos provenientes de quatro transdutores dispostos ao longo da seção transversal com a fração de vazio em escoamentos verticais bifásicos líquido-gás. Empregando a mesma disposição dos transdutores ultrassônicos que Carvalho et al. [44], Figueiredo et al. [7] utilizaram a razão de energia dos sinais ultrassônicos como dados de entradas para as redes neurais artificiais. Foram mensuradas as frações de vazio e a classificação dos padrões de escoamento bolhas dispersas, pistonado, agitante e anular. Utilizando sinais transmitidos através da tubulação, Zheng and Zhang [45] determinaram as frações de sólido e de gás através da variação de amplitude e atenuação do pulso ultrassônico transmitido através da tubulação.

Diversos trabalhos envolvendo cálculo de velocidade encontrados na literatura utilizam-se de um acoplamento acústico aquoso utilizando uma estrutura adicional no entorno da tubulação.

Deste modo, deixando-se de detalhar o efeito da inclinação do transdutor fixado em estruturas sólidas da parede da tubulação na medição de velocidade. Na medição de fração de vazio, a maior parte dos trabalhos apresentados na literatura correlacionam a fração de vazio a partir de sinais transmitidos através da mistura multifásica. Além disto, são apresentadas teorias complexas para processamento e análise dos sinais ultrassônicos.

Deste modo, o presente trabalho apresenta um estudo acerca da aplicação do ultrassom para mensurar vazão em escoamento bolhas a partir da mensuração individual da velocidade e da fração de vazio da fase dispersa. A velocidade e a fração de vazio foram determinadas com o auxílio da correlação cruzada e do o coeficiente de variação, respectivamente.

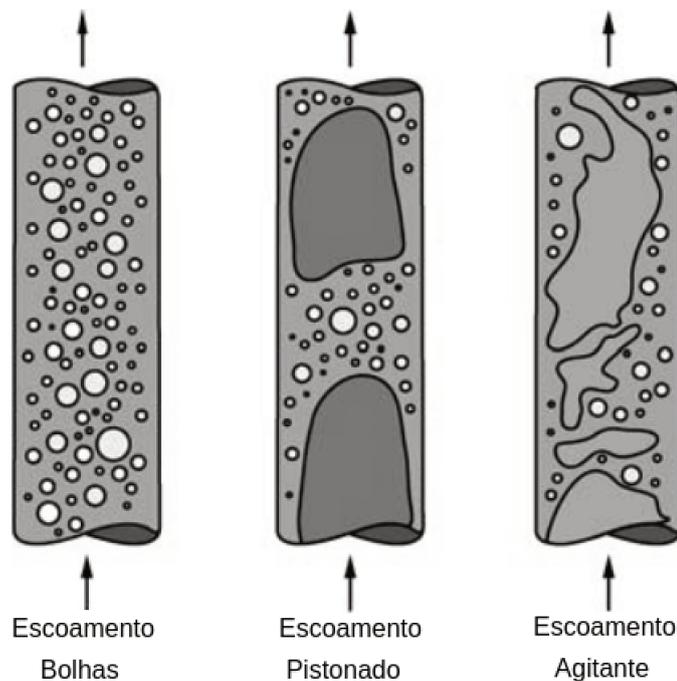
### 3 Fundamentação teórica

#### 3.1 Hidrodinâmica da coluna de bolhas

##### 3.1.1 Padrão de escoamento

No presente trabalho, uma coluna de bolhas é empregada para simular o escoamento de petróleo e gás em dutos. Usualmente as colunas de bolhas são construídas a partir de estruturas cilíndricas, na qual a injeção da fase gasosa é realizada pela base [46]. Os padrões de escoamentos em colunas de bolhas são classificados com base na distribuição espacial da interface formada entre as fases. As principais variáveis que influenciam nestes padrões são: i) características operacionais dos escoamentos, ii) propriedades dos fluidos e iii) características geométricas da tubulação [4]. Shah et al. [47] classificaram os padrões de escoamentos verticais em colunas de bolhas como bolhas, pistonado e agitante (Figura 3.1).

Figura 3.1: Padrões de escoamento água-ar vertical ascendente em coluna de bolhas.



Adaptado de Mudde [48].

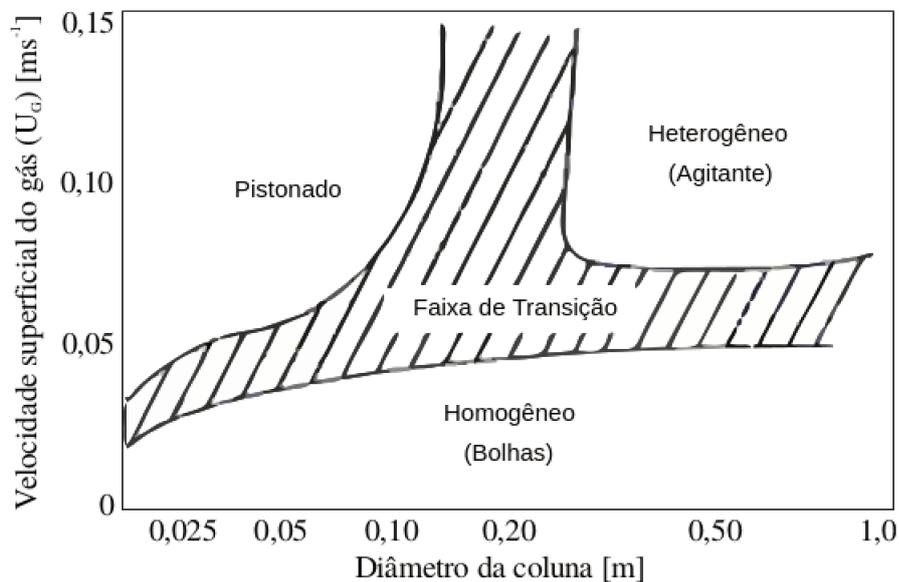
No regime de escoamento bolhas, observa-se o movimento ascendente das bolhas com poucas interações entre as bolhas da fase dispersa. Hills [49] demonstrou a homogeneidade de concentração da fase dispersa ao longo da seção transversal, o autor sugere que o perfil de velocidade deste padrão deve acompanhar uma distribuição aproximadamente uniforme na seção transversal com ausência de regiões de recirculação. Aumentando-se a vazão da fase dispersa, atinge-se a região de transição bolhas-pistonado-agitante (Figura 3.2). Esta região é caracterizada pela intensificação do processo de coalescência de bolhas sendo que o diâmetro das bolhas coalescidas é fortemente influenciado pelas características contrutivas do sistema de

injeção de gás e pelas propriedades físicas do meio líquido [50].

O padrão de escoamento pistonado é caracterizado por um arranjo alternado entre bolhas alongadas e pistões aerados de líquido. A existência deste padrão é condicionada ao diâmetro da coluna, conforme pode ser visualizado na Figura 3.2. O padrão agitante, não apresenta um arranjo geométrico definido. No entanto, regiões de recirculação próximas a parede e uma distribuição com forte variação no gradiente de concentração da fase dispersa marcam esse padrão [48].

O mapa de fluxo para escoamentos verticais ascendentes em montagens do tipo coluna de bolhas está ilustrado na Figura 3.2. Utilizando água ou sistemas diluídos como fase contínua, este mapa foi elaborado a partir da operação da coluna de bolhas em condições atmosféricas com vazões nulas e não nulas da fase contínua. A injeção de ar foi realizada com injetores cujas dimensões dos orifícios foram inferiores a 1 mm. As regiões de transição dependem do modo de injeção de ar e das propriedades físico-químicas dos fluidos [51]. A transição do padrão de escoamento bolhas, por exemplo, tende a ocorrer com velocidades superficiais de gás inferiores com a utilização de injetores com orifícios de maiores dimensões e fluidos com viscosidades mais elevadas [47]. Nota-se que os padrões de escoamentos são delimitados em função do diâmetro da tubulação e da velocidade superficial de gás (Figura 3.2).

Figura 3.2: Mapa de padrão de escoamento água-ar em coluna de bolhas.



A determinação qualitativa da transição entre os padrões de escoamento é realizada através das técnicas de: i) Análise visual; ii) evolução de parâmetros hidrodinâmicos globais; e iii) análise de sinais temporais relacionados a hidrodinâmica [50]. Embora o método de análise visual apresente limitação devido à subjetividade da avaliação, devido a dificuldade em se reconhecer os padrões próximos ou dentro da região de transição, é utilizado quando se dispõe de regiões transparentes no escoamento. A segunda técnica baseia-se na observação que cada

padrão de escoamento manifesta parâmetros globais de escoamento em patamares bem definidos, por exemplo, relação entre velocidade superficial de gás e fração de vazio. Em contraponto, a técnica de análise de sinais temporais trabalha com as assinaturas das flutuação de sinais relacionados aos parâmetros hidrodinâmicos.

### 3.1.2 Formato das bolhas em meio infinito

Determinar a forma da bolha é importante para delimitar a aplicação da técnica utilizada, uma vez que diferentes técnicas podem ser empregadas para caracterizar diferentes tipos de interface [18]. Como exemplo, a medição de vazão da fase dispersa em escoamento bolhas utilizando a técnica de correlação cruzada entre pulsos ultrassônicos necessita que a interface apresente superfície regular, isto é, sem a presença de reentrâncias ao longo da superfície.

Bolhas escoando em movimento livre em meio infinito podem ser classificadas segunda a forma como esféricas, elipsoidais e calotas esféricas [52]. O formato de bolhas esféricas ocorre quando as forças viscosas, de tensão superficial ou ambas prevalecem sobre as forças inerciais. O formato elipsoidal se refere ao formato oblato com interface convexa, o qual comumente apresenta movimento oscilante na ascensão das bolhas no escoamento. O formato de capas esféricas pode ser definido como aquele decorrente do processo de coalescência no qual apresenta uma base plana e formato de meia esfera. A dimensão das bolhas deste formato é inferior ao diâmetro da tubulação.

De forma a generalizar as faixas que delimitam as categorias de formatos de bolhas, Clift et al. [52] elaboraram um gráfico (Figura 3.3) no qual correlacionam os números adimensionais de Eötvös (Eq. 3.1), Morton (Eq. 3.2) e Reynolds (Eq. 3.3) com os formatos de bolhas. São apresentadas também o regime distorcido, subcategoria do regime elipsoidal, e capa contornada e capa elipsoide com covas, subcategorias da capa esférica. Na Figura 3.3, a forma das bolhas é obtida a partir da intersecção de quaisquer dois dos três números adimensionais apresentados. As linhas inclinadas refletem valores constantes do número de Morton.

$$E_o = \frac{(\rho_l - \rho_g) g d_m^2}{\sigma_l} \quad (3.1)$$

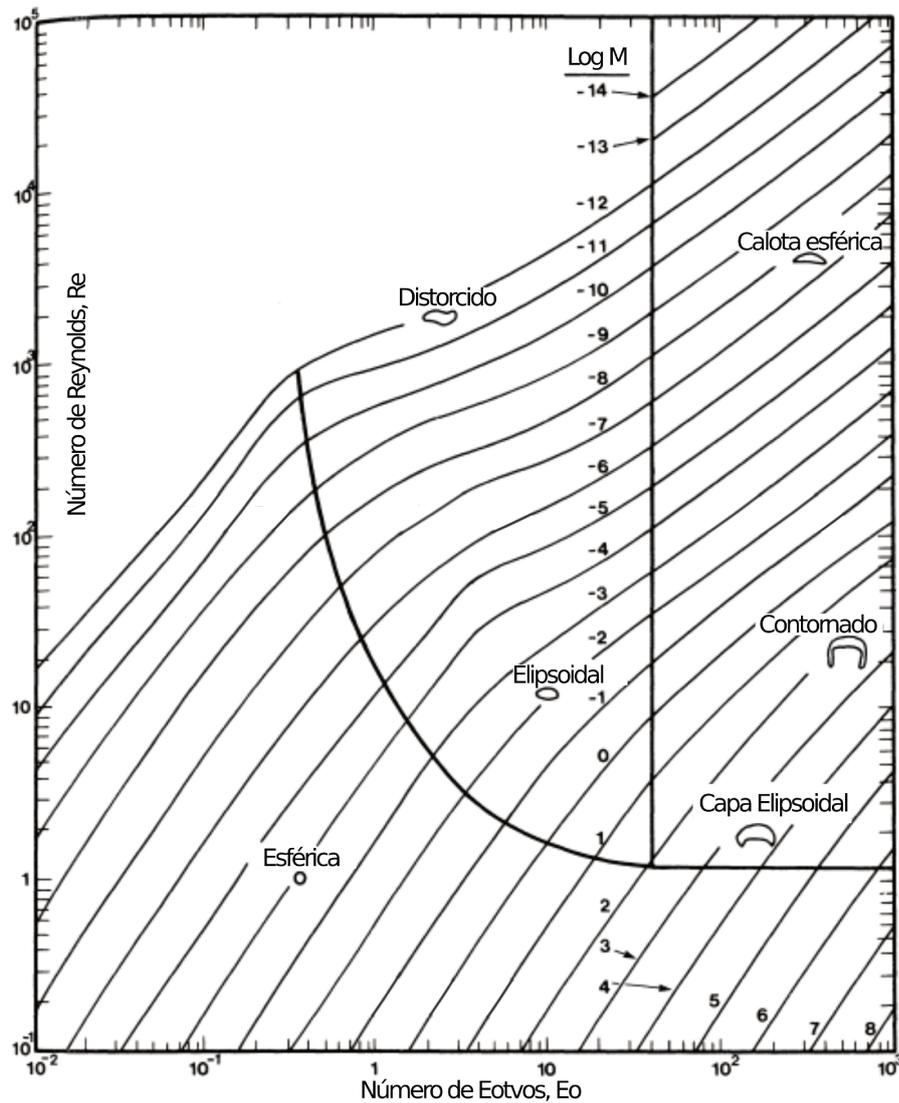
$$M = \frac{(\rho_l - \rho_g) g \mu_l^4}{\rho_l^2 \sigma_l^3} \quad (3.2)$$

$$Re = \frac{\rho_l d_m^2 v_g}{\mu_l} \quad (3.3)$$

Em que:  $\mu_l$  é a viscosidade dinâmica do líquido,  $d_m$  diâmetro médio das bolhas,  $\rho_l$  massa específica do líquido,  $\rho_g$  massa específica do gás,  $\sigma_l$  a tensão superficial do líquido,  $g$  a aceleração da gravidade e  $v_g$  velocidade real do gás.

A partir da Figura 3.3, observa-se que na região delimitada por  $Re < 1$  apenas o for-

Figura 3.3: Mapa de regimes de formas de bolhas em escoamento bolhas.



Adaptado de Clift et al. [52].

mato esférico é obtido. Para valores de  $E_o > 40$  e  $\log M < 2$  o formato esperado é o de capas esféricas e subdivisões. Deste modo, o regime elipsoidal situa-se em faixas intermédias de  $Re$ ,  $\log M$  e  $E_o$ . Nota-se também que a velocidade terminal pode ser obtida através deste gráfico, uma vez que somente o número de  $Re$  contém esta variável [52].

### 3.1.3 Velocidade terminal

A correlação para velocidade terminal foi definida com base no modelo de escorregamento [53]. Para meios no qual o meio infinito está estagnado, assume-se que a velocidade de escorregamento  $v_{slip}$  é igual a velocidade de ascensão da bolha [54]. De acordo com Zuber e Hench (1962, apud Shoham, 2006), a velocidade de bolhas num meio infinito é dada pela Equação 3.4.

$$v_{slip} = 1,53 \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_g)\sigma_l}{\rho_l^2} \right]^{0,25} (1 - \alpha)^{0,5} \quad (3.4)$$

Em que:  $\rho_l$  é a massa específica do líquido,  $\rho_g$  a massa específica do gás,  $\sigma$  a tensão superficial do líquido e  $\alpha$  a fração de vazio da fase dispersa obtida pelo método apresentado na seção Seção 4.6.

A velocidade da fase dispersa estimada pelo rotâmetro ( $v_{rot}$ ), foi realizada através da Equação 3.5, em que  $A$  é a área da seção transversal. A velocidade foi mensurada corrigindo-se a vazão volumétrica mensurada pelo rotâmetro ( $Q_g$ ) para o ponto de medição ultrassônica pela razão das massas específicas medidas logo após o rotâmetro ( $\rho_{rot}$ ) e no ponto de medição ultrassônica ( $\rho_{pm}$ ). As massas específicas foram calculadas com o auxílio da lei dos gases ideais com as respectivas medições de temperatura e pressão,  $\rho = f$  (pressão, temperatura).

$$v_{rot} = \left( \frac{\rho_{rot}}{\rho_{pm}} \right) \frac{Q_g}{A \cdot \alpha} \quad (3.5)$$

## 3.2 Processamento de sinais ultrassônicos ou imagem

### 3.2.1 Correlação cruzada no domínio do tempo

Considerando dois sinais reais  $x(n)$  e  $y(n)$  os quais possuem energia finita, a função correlação cruzada  $r_{xy}(l)$  entre  $x(n)$  e  $y(n)$  é definida como [55]:

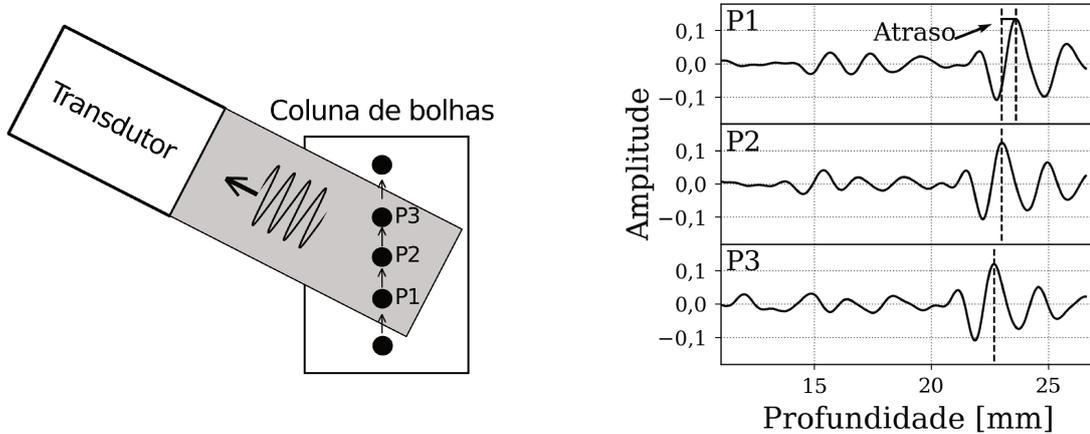
$$r_{xy}(l) = \sum_{n=1}^N x(n)y(n-l), \quad \text{sendo: } l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, N \quad (3.6)$$

Em que  $l$  é a variável de atraso entre os sinais e  $N$  é o número de pontos dos sinais. Com base nesta definição, o sinal  $y(n)$  é deslocado sobre o  $x(n)$  de modo que para cada valor de  $l$  obtém-se um valor de correlação entre os sinais. Uma vez que a correlação cruzada é uma operação matemática que tem como objetivo mensurar o grau de semelhança entre dois sinais, obtém-se a função correlação cruzada a partir de todos os valores de  $l$ . O valor máximo do módulo desta função é tomado como sendo o melhor alinhamento entre os sinais e, consequentemente, este é o valor do atraso ( $t_d$ ) entre os sinais.

A Figura 3.4 ilustra o significado físico de  $t_d$  entre sinais eco ultrassônico e a respectiva relação com o movimento de ascensão das bolhas. Durante o movimento de ascensão das bolhas em frente a linha de medição do ultrassom, as bolhas ascendem de P1 a P3 (Figura 3.4 - esq.), de modo a exibir um deslocamento no sinal digitalizado (Figura 3.4 - dir.).

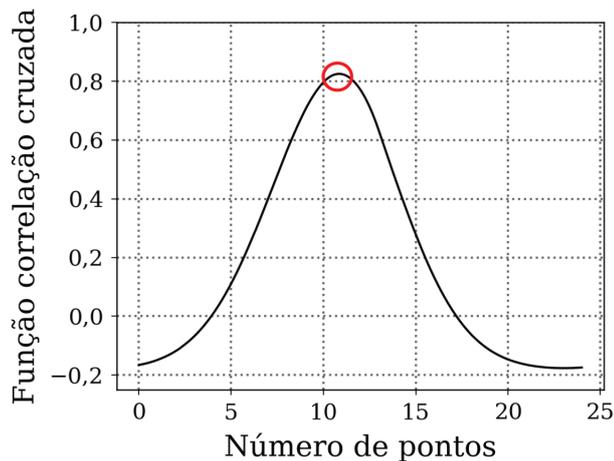
As formas de onda apresentadas nos três pulsos simbolizam o movimento relativo entre uma bolha e o transdutor. O deslocamento do ponto máximo de quaisquer dois sinais eco consecutivos com a presença de reflexões de bolhas representa o atraso entre pulsos. Deste modo, a correlação cruzada pode ser interpretada como uma medida do deslocamento das formas de

Figura 3.4: Deslocamento das bolhas ao longo da faixa de medição ultrassônica (esq.) e os respectivos sinais eco ultrassônico.



ondas entre os pulsos ao longo da linha de medição ultrassônica. Uma vez que a forma de onda representa a posição relativa da interface da bolha, decorre que a partir do atraso pode-se estimar o deslocamento da interface ao longo dos pulsos e, em conjunto com o tempo entre pulsos, calcular a velocidade com que a interface da bolha se desloca. A Figura 3.5 ilustra a função correlação cruzada resultante da correlação entre sinais eco ultrassônico consecutivos.

Figura 3.5: Função correlação cruzada entre sinais eco ultrassônico. Atraso entre sinais em destaque.



Fracionando cada sinal eco em diversos segmentos ( $i_{seg}$ ) de comprimentos  $N_s$  e normalizando pela raiz do somatório dos quadrados das amplitudes [56], obtém-se a equação da correlação cruzada utilizada na forma como foi utilizada neste trabalho (Eq. 3.7).

$$r(l, i_{seg}) = \frac{\sum_{n=0}^{N_s-1} x[n + i_{seg}N_s]y[n + i_{seg}N_s - l]}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N_s-1} (x[n + i_{seg}N_s])^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{N_s-1} (y[n + i_{seg}N_s - l])^2}} \quad (3.7)$$

### 3.2.2 Coeficiente de variação

O coeficiente de variação (CV) é determinado a partir do vetor de energia ( $E$ ). O vetor  $E$  é obtido a partir dos sinais eco ultrassônicos refletidos do escoamento ( $e$ ). O sinal  $e$  é adquirido a partir da digitalização de  $k$  pulsos ultrassônicos, sendo que cada sinal eco contém  $n$  amostras ao longo da linha de medição do ultrassom. O vetor de energia  $E$  (Equação 3.9) é obtido a partir da concatenação de todos os valores de energia ( $E_i$ ) associados a cada sinal eco ultrassônico (Equação 3.8). Deste modo, a matriz dos sinais  $e$  com  $k$  linhas e  $n$  colunas torna-se um vetor de energia com  $k$  pontos, a partir do qual se realiza o cálculo da média (Eq. 3.10) e do desvio padrão (Eq. 3.11).

$$E_i = \sum_{j=1}^n [e(i,j)]^2 \quad (3.8)$$

$$E = [E_1, E_2, \dots, E_k] \quad (3.9)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k E(i) \quad (3.10)$$

$$s_E = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (E(i) - \bar{E})^2} \quad (3.11)$$

A partir dos valores de média e desvio padrão, obtém-se o coeficiente de variação (CV) pela Equação 3.12. O CV é uma medida de dispersão, isto é, está relacionado com a variabilidade de um conjunto de dados.

$$CV = \frac{s_E}{\bar{E}} \quad (3.12)$$

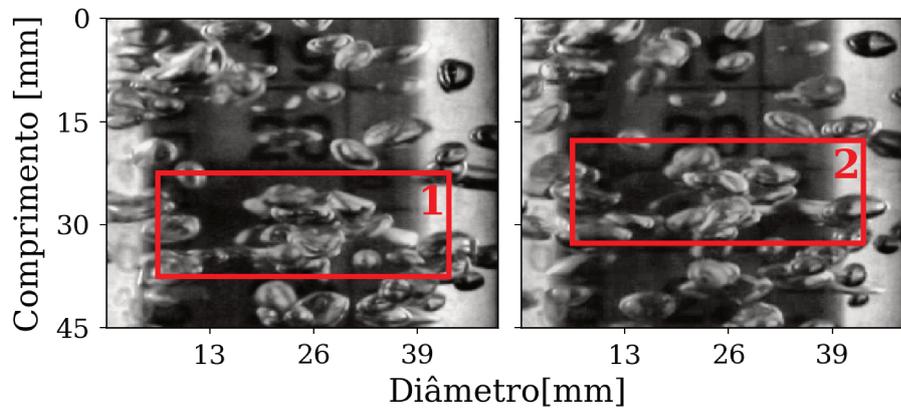
### 3.2.3 Casamento de modelo

A técnica de casamento de modelo consiste na varredura de um padrão em uma região de interesse. O padrão é a imagem utilizada para realizar a busca por um elemento correspondente em uma região de interesse, o melhor casamento é obtido quando se encontra o local com a maior semelhança com o padrão [57]. Esta técnica é utilizada para o cálculo da velocidade das bolhas através da determinação do deslocamento das bolhas entre duas imagens consecutivas.

Uma vez que as imagens são formadas com base na distribuição planar da intensidade da luz, estas podem ser representadas como matrizes bidimensionais. Na Figura 3.6, o padrão ( $\mathbf{x}$ ) é representado pela janela 1 e a região de interesse ( $\mathbf{y}$ ) por toda a imagem a direita. Para determinar a região de maior casamento entre as imagens, emprega-se a Equação  $d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 1/N \left( \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 \right)$ . Na Figura 3.6, a janela 2 apresenta o maior casamento,

ou menor distância ( $d(\mathbf{x},\mathbf{y})$ ), com a janela 1. O deslocamento das bolhas é obtido através da distância vertical entre as duas janelas.

Figura 3.6: Janelas com maior casamento entre dois frames consecutivos.



Fonte: Brunelli [57].

### 3.3 Fundamentos acústicos

#### 3.3.1 Ultrassom

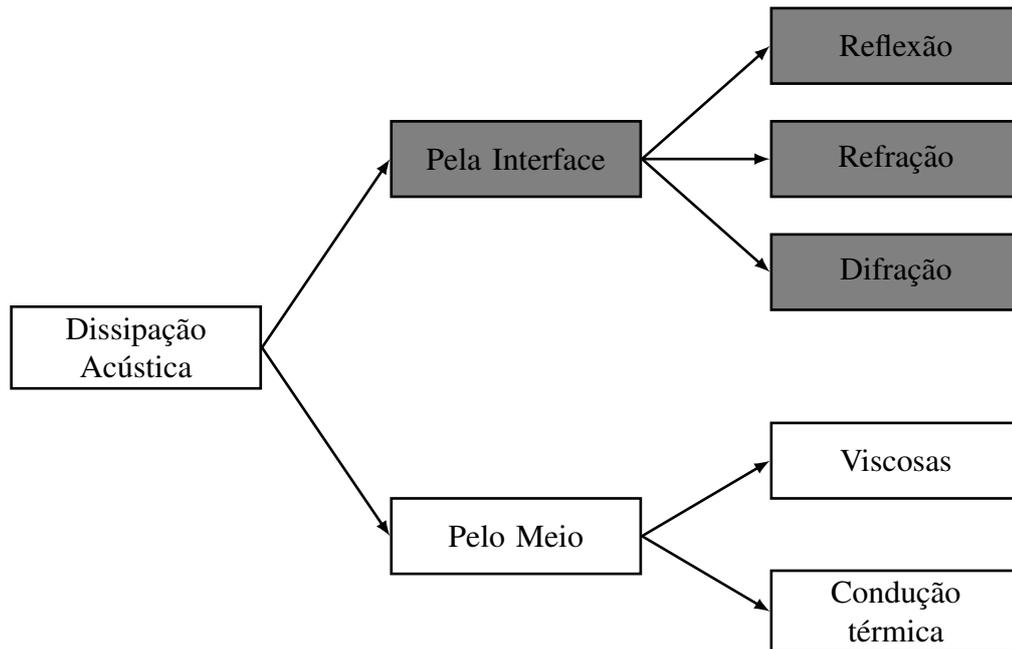
O Ultrassom é caracterizado por ondas acústicas que se propagam em meios materiais com frequências superiores a 20 kHz, sendo assim definido como um segmento da acústica. Os tipos de ondas acústicas mais citadas na literatura são longitudinais, transversais, superficiais e de placa.

#### 3.3.2 Mecanismos de dissipação

Devido à atenuação acústica, as ondas mecânicas estão sujeitas a redução de energia à medida que se propagam por meios contínuos ou por interfaces existentes entre meios contínuos. Kinsler et al. [58] elaboraram uma subdivisão para explicar o mecanismo de dissipação acústica, conforme apresentado na Figura 3.7.

Os tipos de dissipação de acústica mais relevantes que ocorrem durante a propagação de uma onda mecânica por um meio contínuo são devidos à viscosidade e condução térmica [58]. As perdas viscosas ocorrem devido ao movimento relativo entre as moléculas de fluido durante a passagem da onda. Considerando-se a viscosidade do fluido, este movimento implica em consumo de energia, deste modo o termo de viscosidade passa a representar uma parcela extra de dissipação energética na equação da onda. Durante a propagação de uma onda acústica longitudinal pelo fluido observam-se zonas de compressão e rarefação, resultando em regiões de temperaturas ligeiramente superiores nas zonas de compressão em relação a de rarefação.

Figura 3.7: Principais mecanismos de dissipação de onda acústica.



A amplitude das flutuações de temperatura está relacionada com a amplitude de pressão entre as zonas. Deste modo, estabelece-se uma direção de fluxo de energia das regiões de maior para menor temperatura através do mecanismo de difusão térmica. Correlacionando-se a taxa com que a densidade de energia acústica varia, para obter a taxa com que a energia da onda é transferida para o meio, com o coeficiente de absorção ( $\beta$ ) nota-se que o coeficiente de absorção é proporcional ao coeficiente de difusão térmica no fluido ( $\kappa$ ) e com o quadrado da frequência angular da onda acústica ( $\omega$ ) e que o efeito térmico para fluidos não metálicos geralmente é desprezível em comparação com a perda viscosa. O efeito combinado da dissipação viscosa em conjunto com a térmica é dado pela Equação 3.13.

$$\beta = \frac{\omega^2}{2\rho_l c^3} \left( \frac{4}{3}\eta + \frac{(\gamma - 1)\kappa}{c_p} \right) \quad (3.13)$$

Em que:  $\rho_l$  é a massa específica do meio,  $c$  é a velocidade do som no meio,  $\eta$  é o coeficiente de viscosidade do fluido,  $\gamma$  é a razão dos calores específicos a pressão e a volume constante e  $c_p$  é o calor específico a pressão constante.

Ao se propagar uma onda mecânica pela interface de dois meios com diferentes impedâncias acústicas, observam-se os fenômenos de reflexão, refração e difração [58]. O fenômeno de reflexão ocorre quando uma onda acústica encontra uma interface e é refletida para o meio incidente. A refração, ocorre devido à diferença de velocidade de propagação da onda acústica entre os meios, implicando na alteração do comprimento de onda do feixe acústico de maneira que a frequência permaneça inalterada. Deste modo, o ângulo de propagação da onda é alterado conforme previsto pela lei de Snell. O fenômeno da difração é definido, pela teoria clássica, através do princípio de Huygens-Fresnel o qual estabelece que todos os pontos de

uma frente de onda se comportam como fontes secundárias pontuais de ondas esféricas com o mesmo conteúdo de frequência da onda primária. Sendo que a amplitude da onda primária após a passagem por um dado obstáculo é dada pela superposição das amplitudes das fontes pontuais presentes na mesma frente de onda, resultado da interferência das ondas considerando-se as fases relativas.

Os fenômenos de interface estão relacionados com o grau de diferença das propriedades acústicas dos meios de incidência e de transmissão, ou seja, das respectivas impedâncias acústicas ( $Z$ ) [59]. Uma vez que a impedância acústica está relacionada com a pressão necessária para gerar uma unidade de velocidade em uma dada partícula material, esta grandeza representa uma medida de resistência à propagação da onda em um dado meio. A quantificação desta grandeza envolve a determinação do campo de pressão e de velocidade das ondas. Em virtude do conceito apresentado de difração, é razoável construir o entendimento da propagação das ondas acústicas através de fontes pontuais, uma vez que considera-se as frentes de onda como sendo o resultado da interação entre as diversas fontes de onda esféricas pontuais. Deste modo, determinar o campo de pressão ( $p(r,t)$ - Equação 3.14) envolve a resolução da equação da onda em coordenadas esféricas [59]. A partir do campo de pressão determina-se a distribuição de velocidade (Equação 3.15) com o auxílio da equação de Euler.

$$p(r,t) = \frac{A}{r} e^{-j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (3.14)$$

$$u(r,t) = \frac{A}{r} \cdot \frac{1}{\rho_l c} \left( 1 + \frac{j}{kr} \right) e^{-j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (3.15)$$

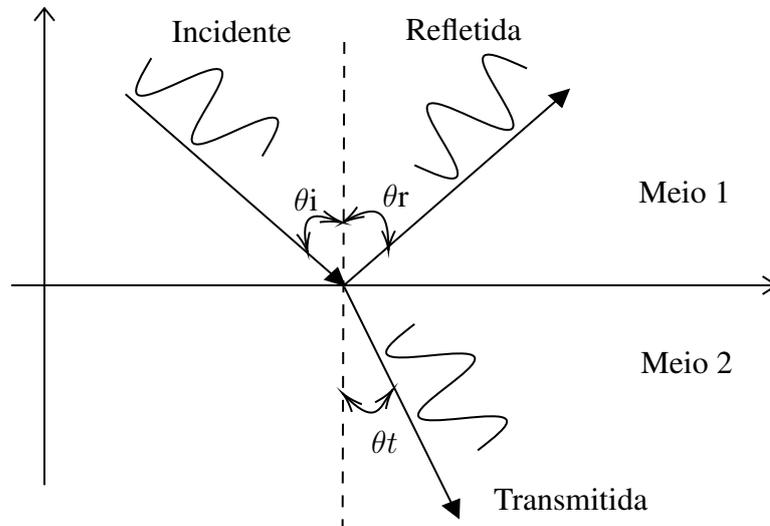
Em que:  $A$  é a amplitude complexa do campo,  $r$  é a distância relativa a fonte pontual,  $\omega$  é a frequência de pulsação da fonte e  $\vec{k}$  é o vetor número de onda,  $kr$  é a distância a jusante da fonte pontual,  $j$  é o número complexo que representa  $\sqrt{-1}$ ,  $\rho_l$  é a massa específica do meio e  $c$  é a velocidade de propagação do som no meio.

A impedância acústica ( $Z$ ) é definida como a razão entre os campos de pressão e velocidade (Equação 3.16). Nota-se que para fontes pontuais esféricas é necessário que o parâmetro adimensional  $kr$  seja suficientemente grande em relação comprimento de onda associado a frequência emitida ( $kr \gg 1$ ) de modo que a parcela complexa tenda ao valor 0. Trabalhar com valores desprezíveis da parcela complexa da Equação 3.16 significa lidar com impedância acústicas próximas da onda plana [59]. Neste caso a impedância da onda acústica torna-se a mesma do meio ( $Z = \rho_l c$ ).

$$Z = \frac{p}{u} = \rho_l c \left[ \frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2} - j \frac{kr}{1 + (kr)^2} \right] \quad (3.16)$$

O efeito decorrente da incidência oblíqua da onda acústica nas interfaces implica tanto na variação do ângulo de transmissão com relação ao ângulo de incidência quanto na fração de energia que é efetivamente transmitida para o meio contínuo do escoamento, ou seja, a

Figura 3.8: Fenômenos de reflexão e refração de onda acústica com incidência oblíqua em interface plana.



inclinação altera o modo como o feixe acústico é transmitido para a região de interesse. Inicialmente será descrito o modo como este feixe é refratado e posteriormente os efeitos da inclinação sobre a transmissão da energia dos pulsos. A lei de Snell, representada na Figura 3.8, descreve a refração em fenômenos ondulatórios quando ocorre a mudança de impedância acústica entre o meio incidente (subscrito 1) e o meio no qual a onda é refratada (subscrito 2). Esta refração também é dependente do ângulo no qual a onda incide na interface, conforme Equação 3.17). A Equação 3.17 utiliza as hipóteses: i) ambos os meios são não dispersivos, isto é, obedecem a relação de dispersão linear  $k = \frac{\omega}{c}$  e ii) acústica linear, ou seja, a onda proveniente do meio 1 possui a mesma frequência daquela transmitida ao meio 2 [59].

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{c_1} = \frac{\text{sen } \theta_t}{c_2} \quad (3.17)$$

Como referência para se estabelecer a inclinação do transdutor em relação ao escoamento utiliza-se o conceito de ângulo crítico ( $\theta_c$ ), ou seja, ângulo máximo de incidência da onda mecânica tal que nenhum feixe acústico transpõe a interface ( $\theta_t = 90^\circ$ ). Nota-se que a existência do ângulo crítico está ligada a propagação de ondas provenientes de meios com menores velocidades de propagação de onda longitudinal. A partir da Equação 3.18 é possível mensurar a inclinação máxima do transdutor em relação ao escoamento inserindo-se somente a velocidade de propagação do som em ambos os meios.

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left( \frac{c_1}{c_2} \right) \quad (3.18)$$

Considerando-se a incidência oblíqua de uma dada onda placa em uma dada interface entre dois meios contínuos, é possível obter os coeficientes de intensidade de reflexão -  $R$  - (Equação 3.19) e transmissão -  $T$  - (Equação 3.20) através da continuidade de pressão e velocidade através da interface [58]. Por convenção os ângulos expressos nas equações são mensura-

dos com relação à direção ortogonal à parede da tubulação.

$$R = \left( \frac{Z_2/Z_1 - \cos\theta_t/\cos\theta_i}{Z_2/Z_1 + \cos\theta_t/\cos\theta_i} \right)^2 \quad (3.19)$$

$$T = \frac{Z_1}{Z_2} \left( 1 + \frac{Z_2/Z_1 - \cos\theta_t/\cos\theta_i}{Z_2/Z_1 + \cos\theta_t/\cos\theta_i} \right)^2 \quad (3.20)$$

### 3.3.3 Número de onda linear adimensional

O número de onda linear adimensional ( $K_a$ ) é definido como o produto do número de onda  $K$  com um comprimento característico de uma bolha ( $a$ ). Apresentado na Equação 3.21, o  $K_a$  é um parâmetro quantitativo que fornece a magnitude da razão entre os comprimentos da partícula e da onda. A interpretação desta grandeza é apresentada abaixo.

$$K_a = K * a = \frac{1}{\lambda} * a = \frac{f}{c} * a \quad (3.21)$$

Em que  $f$  é a frequência associada à onda acústica,  $c$  é a velocidade de propagação da onda longitudinal no meio e  $\lambda$  é o comprimento de onda relativo a frequência da onda acústica.

- $K_a \ll 1$ : Insana and Hall [60] afirmaram que, neste caso, muitos ruídos aparecem devidos a pequenos espalhamentos. Richter et al. [61] atribuíram a este regime de dissipação perdas viscosas e térmicas, ou seja, processos intrínsecos ao meio. McClements [62] afirmou que os principais mecanismos de atenuação acústica estão associados à atenuação acústica do meio, e à pulsação e oscilação das partículas devido à passagem da onda acústica. Murai et al. [63] afirmaram que as bolhas agem como pequenos refletores com relação às ondas incidentes - produzindo um efeito de espalhamento da onda incidente aproximadamente homogêneo - porquanto as bolhas começam a pulsar com frequências diferentes do sinal emitido pela onda;
- $K_a \approx 1$ : Insana and Hall [60] afirmaram que o fenômeno dominante neste regime é o espalhamento das ondas acústicas de modo heterogêneo em torno das partículas. Deste modo, destacam-se os efeitos de interface em relação aos ocorridos no meio. Sendo assim, os principais mecanismos de dissipação acústica ocorrem nas interfaces.
- $K_a \gg 1$ : Murai et al. [63] afirmaram que nesta faixa de  $K_a$  as bolhas agem como grandes refletores e produzem a reflexão de toda a onda incidente. Sendo assim, não há frequência Doppler no sinal eco devido a camada de ondas estacionárias que se forma no entorno da partícula.

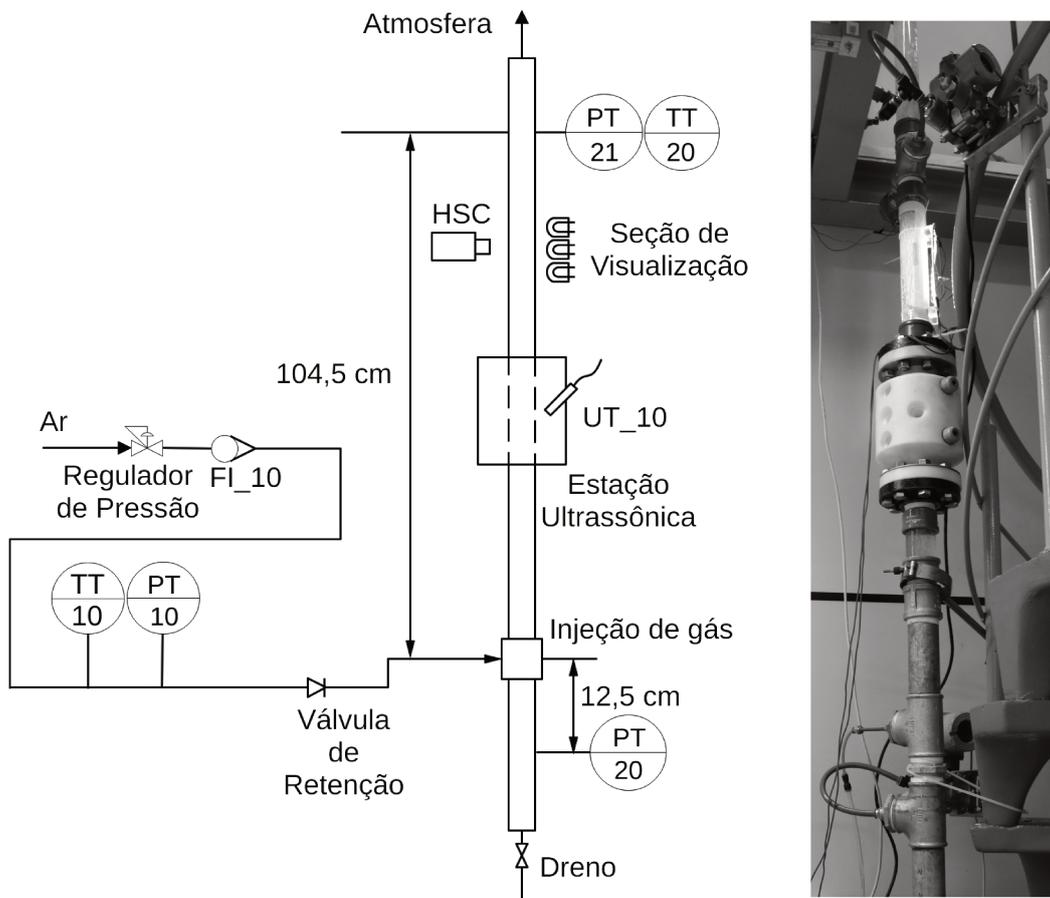
Em todos os experimentos do presente trabalho, o regime de dissipação de ondas acústicas permaneceu na faixa de  $K_a \approx 1$ . Esta faixa é considerada adequada para estudos baseados em medições de velocidade com o auxílio de técnicas ultrassônicas [63].

## 4 Dispositivos experimentais e procedimentos de teste

### 4.1 Montagem experimental do tipo coluna de bolhas

A montagem experimental construída no Laboratório de Engenharia de Sistemas Químicos (LESQ/FEQ) consiste em uma tubulação com diâmetro interno de 52,5 mm e comprimento de 2 m disposta na vertical (Figura 4.1). A linha bifásica foi instrumentada com dois sensores de pressão (PT\_20 e PT\_21) para medição da fração de vazio da fase dispersa (Seção 4.6) e um sensor de temperatura (TT\_20) para obter as propriedades físicas da mistura bifásica. Foi instalada uma câmera de filmagem rápida (HSC) juntamente com um sistema de iluminação a jusante da estação ultrassônica para monitorar o escoamento e permitir análises quantitativas com o intuito de corroborar as medições ultrassônicas (UT\_10). As medições ultrassônicas foram realizadas com transdutor único inclinado em cada experimento. A linha de ar comprimido contém um regulador de pressão, um rotâmetro (FI\_10), uma válvula de retenção, um sensor de pressão (PT\_10) e um sensor de temperatura (TT\_10).

Figura 4.1: Diagrama P&ID (esq.) e imagem real da montagem experimental (dir.)



A injeção de gás foi realizada através de uma estrutura porosa posicionada na base da coluna de bolhas. Testes foram realizados com água como fase contínua e ar comprimido como

fase dispersa. As especificações dos instrumentos utilizados estão apresentadas na Tabela 4.1, todos os instrumentos possuem saída 4 - 20 mA.

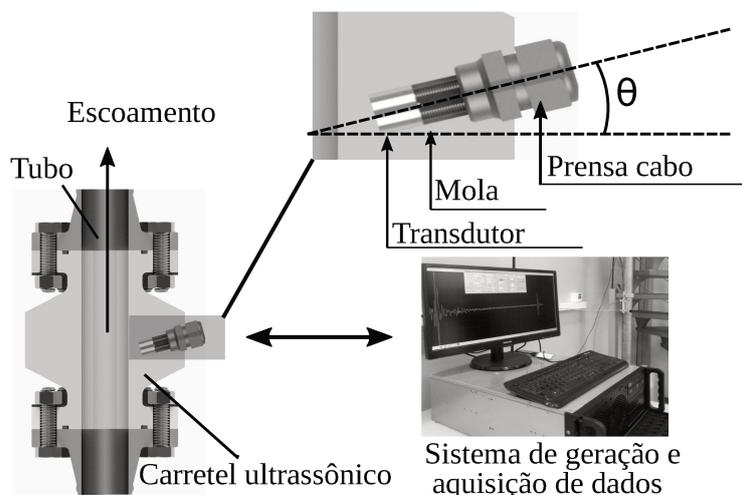
Tabela 4.1: Especificações dos instrumentos de medição.

Nome	Fabricante	Componente	Faixa	Precisão
PT_10	Cole Parmer (07356-51)	Trans. de pressão manométrico	0 a 2 bar	$\pm 0,25\%$
PT_20	Smar (LD 300)	Trans. de pressão manométrico	0 a 0,5 bar	$\pm 0,04\%$
PT_21	Smar (LD 301)	Trans. de pressão manométrico	0 a 0,22 bar	$\pm 0,04\%$
TT_10	Novus (TxBlock-USB)	Transmissor de temperatura	0 a 50 °C	$\pm 0,05^{\circ}\text{C}$
TT_20	Novus (TxBlock-USB)	Transmissor de temperatura	0 a 50 °C	$\pm 0,05^{\circ}\text{C}$
FI_10	LZT (M-6)	Transmissor de vazão	0,5 a 5 LPM	$\pm 0,2 \text{ LPM}$

## 4.2 Sistema de medição ultrassônico

A Figura 4.2 ilustra a composição do sistema de medição ultrassônico. O sistema é composto basicamente por um transdutor ultrassônico e um sistema para geração, recepção e digitalização de sinais ultrassônicos. Em todos os experimentos, o transdutor permaneceu confinado entre o carretel ultrassônico e uma mola, a qual é pressionada por um prensa cabo. Empregou-se vaselina industrial para realizar o acoplamento acústico entre o transdutor e o carretel ultrassônico. Foram utilizados os transdutores do fabricante *Panametrics* com frequência central de 1 (V103-SM), 2,25 (M106-SM) ou 5 MHz (M109-SM) com diâmetro nominal de 1/2". A especificação completa dos transdutores encontra-se no Apêndice A. Durante os experimentos o transdutor foi instalado com inclinação  $\theta$ , conforme representado na Figura 4.2.

Figura 4.2: Componentes do sistema de medição ultrassônico.



O carretel ultrassônico, confeccionado com material polimérico Delrin, foi instalado 60 cm acima do ponto de injeção de ar. O furo do carretel possui diâmetro de 52,5 mm. A distância entre o ponto de injeção de ar e o carretel ultrassônico foi definida experimentalmente de modo a

instalar o sensor ultrassônico em um local no qual o escoamento apresentasse, daquele ponto em diante, distribuição homogênea das bolhas ao longo da seção transversal. Detalhes construtivos do carretel podem ser encontrados em Figueiredo et al. [64].

Foram realizados experimentos preliminares posicionando o transdutor com os ângulos  $\theta$  de 5, 10, 15 e 30°. As inclinações foram definidas com base na intensidade do sinal eco e na precisão teórica de medidores de vazão ultrassônicos. Inclinações  $\theta$  maiores tendem a conferir menores erros de estimação da velocidade [65], no entanto, a intensidade dos sinais eco se torna cada vez menor. A máxima inclinação teórica, para o presente trabalho, é de 34° (ângulo crítico). O ângulo de 30° foi definido com base no ângulo crítico. Observou-se que a intensidade do sinal eco de 30° não era suficiente para distinguir o sinal das interfaces das bolhas com o ruído, inviabilizando a obtenção de resultados.

O cálculo da impedância acústica foi realizado tomando-se como base os seguintes valores à 20°C: Massa específica e velocidade de propagação do som de 1000 kg/m<sup>3</sup> e 1480 m/s [66] para água e 1420 kg/m<sup>3</sup> e 2620 m/s para o Delrin, respectivamente. A velocidade de propagação do som no Delrin foi mensurada experimentalmente. O material Delrin foi selecionado por apresentar bom acoplamento acústico com a água e possuir resistência mecânica compatível com aquelas utilizadas na prática industrial da engenharia.

O dispositivo *DSPUT5000 – Ultratek* foi utilizado para geração, recepção e digitalização de sinais ultrassônicos. Este dispositivo encontra-se instalado em um computador industrial. As principais especificações do dispositivo e os valores dos parâmetros utilizados estão apresentadas na Tabela 4.2. Foram definidos os seguintes parâmetros em todos os experimentos: Frequência de amostragem de 50 MHz; amortecimento de 620  $\Omega$ ; frequência de pulsação de 2 kHz; pulso emitido na forma de um ciclo de onda quadrada; e tensão do pulsador de -300 V. Foram utilizados ganhos na faixa de 55 a 70 dB e largura do pulso na faixa de 222 e 484 ns, dependendo da frequência central do transdutor e da inclinação  $\theta$ .

Tabela 4.2: Especificação do dispositivo de aquisição e valores utilizados no sistema de aquisição de sinais ultrassônicos.

Parâmetros	Valor utilizado	Faixa do dispositivo
Frequência de amostragem	50 MHz	1,5 a 100 MHz
Largura do pulso	222 a 484 ns	50 a 484 ns
Amortecimento	620 $\Omega$	47 a 620 $\Omega$
Ganho no receptor	55 a 70 dB	0 a 80 dB
Frequência de pulsação	2 kHz	0,001 a 5 kHz
Tensão de Pulsação	-300 V	-40 a -300 V
Resolução	8 bits	8 bits

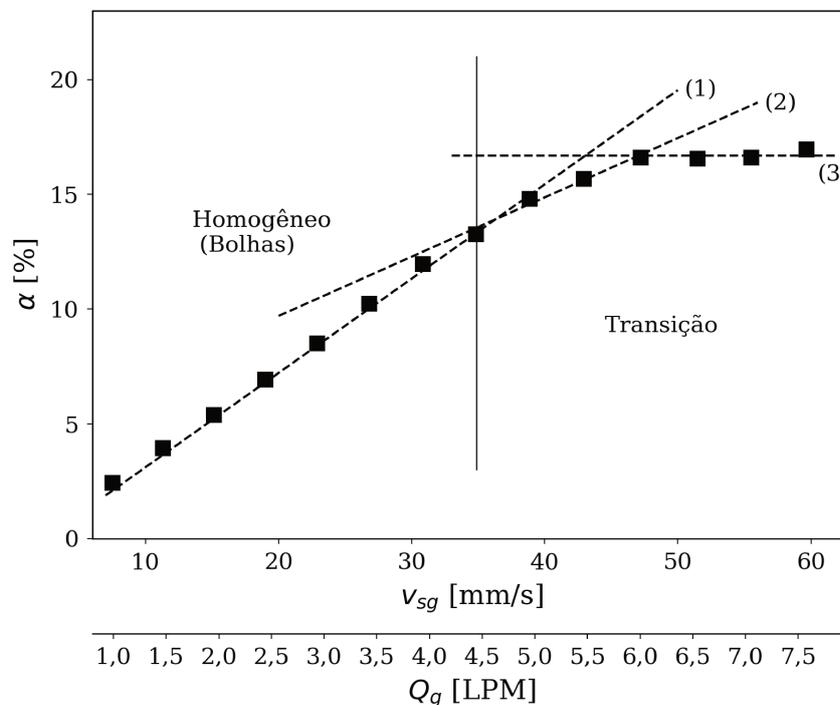
A frequência de amostragem foi definida de modo a respeitar o teorema de Nyquist, o qual define a frequência mínima como sendo o dobro da maior frequência do sinal original. O amortecimento, juntamente com o ganho, foram definidos experimentalmente de modo a retornar os maiores valores de amplitude sem que a amplitude das amostras do sinal eco fosse

superior ao limite de leitura do sistema de aquisição. A frequência de pulsação foi definida com base na capacidade do sistema em detectar e acompanhar interfaces líquido-gás no escoamento, ou seja, esta frequência está associada com a velocidade máxima que é possível determinar com a técnica proposta [67]. A largura do pulso foi definida com base no manual do fabricante, a faixa utilizada situou-se entre 222 e 484 ns, de acordo com a frequência central do transdutor.

### 4.3 Planejamento experimental

Testes foram realizados para delimitar a região que separa o regime bolhas do regime transição, com o objetivo de estabelecer uma matriz de testes na qual fosse possível assegurar uma região de escoamento bolhas. Considerando que os parâmetros hidrodinâmicos refletem as características gerais dos padrões de escoamento, Shaikh and Al-Dahhan [50] apresentaram um método para delimitar a região de transição com base na mudança de inclinação na curva  $v_{sg}$  versus  $\alpha$ . Deste modo, foi calculada a curva de fração de vazio ( $\alpha$ ) em função da velocidade superficial de ar ( $v_{sg}$ ) no ponto de medição ultrassônica (Figura 4.3). Nota-se na Figura 4.3 uma região na qual ocorre o aumento linear de  $\alpha$  em relação à  $v_{sg}$  seguido de uma região com mudança na proporcionalidade de incremento de  $v_{sg}$ , sugerindo a delimitação do padrão de escoamento homogêneo [50]. Assim, foi definido o limiar com base na mudança de proporcionalidade entre  $v_{sg}$  e  $\alpha$  através das retas (1) - (3).

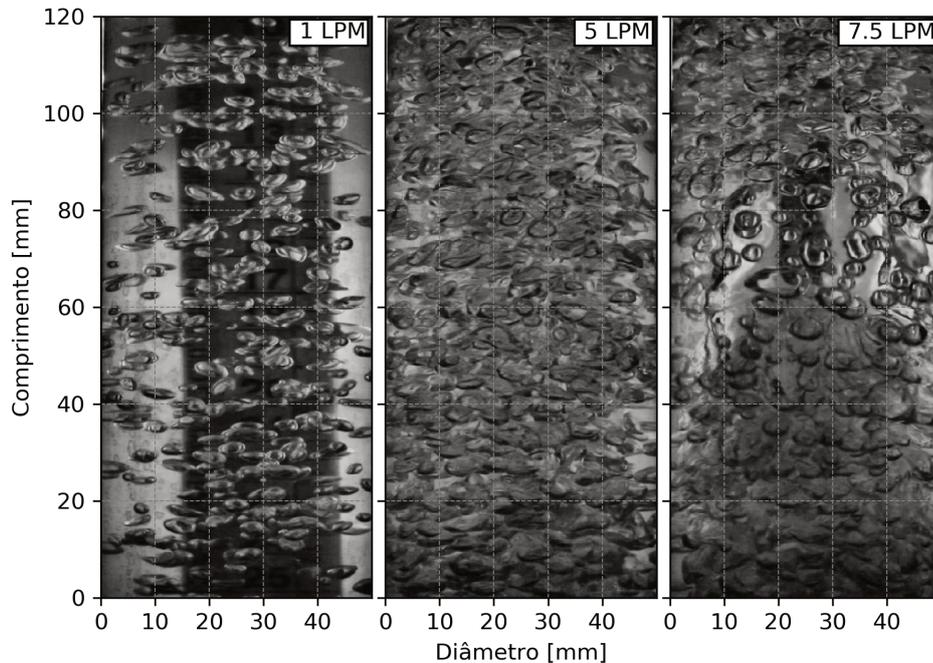
Figura 4.3: Região de transição do padrão de escoamento bolhas.



Como segundo critério para delimitar a região do padrão de escoamento bolhas, foi utilizada a técnica visual com o auxílio de uma câmera de filmagem rápida. Pode-se observar pela

Figura 4.4 que no padrão de escoamento bolhas (esq.) as bolhas são distinguíveis, isto é, são partículas discretas. No regime de transição (centro e dir.) observa-se a existência simultânea entre bolhas discretas e regiões com coalescência de bolhas. Sendo assim, foi possível confirmar a região de transição do padrão bolhas apresentada na Figura 4.3.

Figura 4.4: Regimes de escoamento bolhas (esq.) e de transição (centro e dir.).



Com resultados semelhantes àqueles apresentados no mapa de padrão de escoamento de Shah et al. [47], foram definidos os limites mínimo e máximo de vazões de gás de 0 a 4 litros por minuto (LPM). Delineado de modo a abranger o padrão de escoamento bolhas, o planejamento experimental encontra-se representado na matriz de testes apresentada na Tabela 4.3. Foram realizados experimentos variando a vazão de 0 a 4 LPM (0 a 32 mm/s) com incrementos de 0,5 LPM, ou seja, 9 medidas. Cada medição foi repetida 5 vezes, ou seja, 45 medidas. Foram 9 experimentos, resultando em 405 medições.

Tabela 4.3: Matriz de testes.

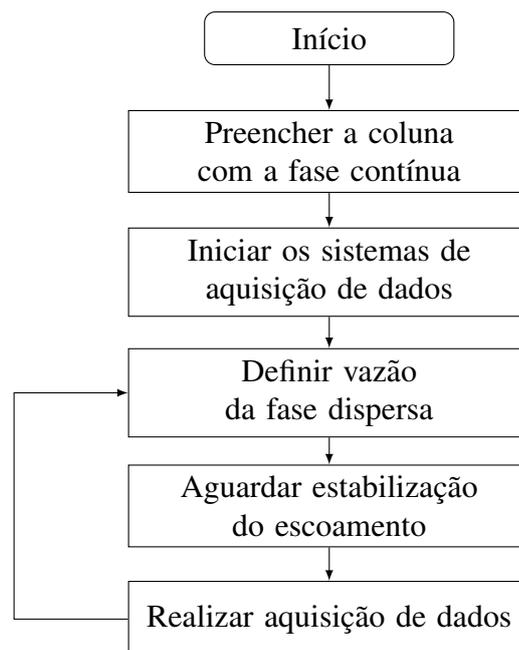
$Q_g$ [LPM]	Frequência Central [MHz]	$\theta$ [°]
0 - 4,0	1,0	5
0 - 4,0	1,0	10
0 - 4,0	1,0	15
0 - 4,0	2,25	5
0 - 4,0	2,25	10
0 - 4,0	2,25	15
0 - 4,0	5	5
0 - 4,0	5	10
0 - 4,0	5	15

#### 4.4 Procedimento experimental

O detalhamento do procedimento experimental proposto (Figura 4.5) encontra-se a seguir:

1. *Preencher a coluna com a fase líquida:* Inicialmente a coluna é preenchida com água até alcançar o nível de 1,2 m acima do ponto de injeção de ar, o nível foi mantido constante em todos os experimentos. Após, é feita a purga do sistema de medição de pressão e a pressurização da linha de ar comprimido.
2. *Iniciar os sistemas de aquisição de dados:* O sistema supervisório e o sistema de aquisição de dados ultrassônicos são inicializados. O sistema supervisório, desenvolvido no ambiente Indusoft, operou com uma taxa de aquisição de 1 Hz durante 120 s. A comunicação do supervisório foi realizada via cabo serial com o controlador lógico programável CLP P7C - HI tecnologia.
3. *Definir vazão da fase dispersa:* A vazão foi estabelecida manualmente para cada ponto operacional. Todos os experimentos foram realizados na ordem crescente de vazão, isto, de 0 a 4 LPM.
4. *Aguardar a estabilização do escoamento:* Após o ajuste da vazão da fase dispersa, aguarda-se 60 s para se obter uma distribuição homogênea ao longo da seção transversal e do comprimento da seção de testes.
5. *Realizar aquisição de dados:* Com o escoamento estabilizado, foram realizadas aquisições de dados de processo, imagens do escoamento e sinais ultrassônicos. Em cada ponto operacional, foram adquiridos 60 mil sinais eco ultrassônicos, divididos igualmente em 30 aquisições.

Figura 4.5: Fluxograma para coleta de dados.

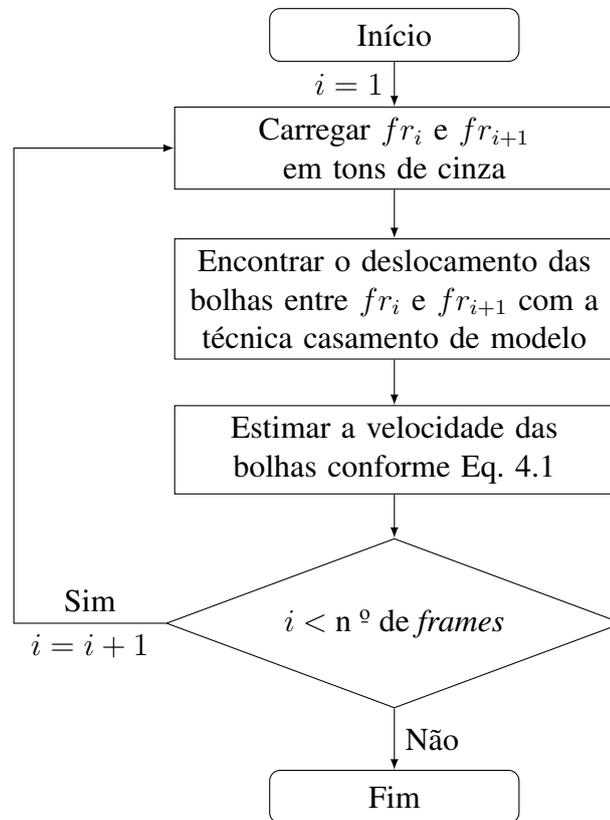


#### 4.5 Procedimento para determinação da velocidade utilizando câmera

O procedimento adotado para estimar a velocidade de ascensão das bolhas utilizando análise de imagens ( $v_{HSC}$ ) está representado na Figura 4.6. Para cada ponto operacional foram selecionados 30 s de aquisição de pares de *frames* ( $fr$ ) consecutivos para a obtenção dos deslocamentos das bolhas com o auxílio da técnica casamento de modelo e da velocidade pela equação Eq. 4.1.

Para realizar a aquisição das imagens foi utilizada a câmera Canon EOS Rebel T6 com resolução HD 1280 x 720 pixels e taxa de aquisição de 60 *frames* por segundo juntamente com um sistema de iluminação no lado oposto da seção de visualização.

Figura 4.6: Fluxograma para determinação da velocidade das bolhas via análise de imagens.



A velocidade  $v_{HSC}$  foi estimada com base na razão entre o diâmetro interno do tubo em milímetros ( $d_m$ ) e o diâmetro interno do tubo em pixels ( $d_p$ ) multiplicada pelo deslocamento das bolhas em pixels ( $\Delta pix$ ) e pelo intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) transcorrido, em segundos, entre os frames [20]. O diâmetro interno  $d_p$  foi obtido computacionalmente após seccionar as imagens nos limites do diâmetro interno da tubulação.

$$v_{HSC} = \frac{d_m}{d_p} \frac{\Delta pix}{\Delta t} \quad (4.1)$$

#### 4.6 Medição da fração de vazio utilizando diferença de pressão

A fração de vazio da fase dispersa ( $\alpha$ ) foi determinada utilizando a relação apresentada por Tang and Heindel [68], representada na Equação 4.2. O cálculo é realizado a partir da diferença de pressão medida na linha bifásica, em que  $\Delta P$  e  $\Delta P_0$  são as diferenças de pressão com e sem a presença de gás no escoamento, respectivamente. Este modelo assume escoamento unidimensional isotérmico, regime permanente, propriedades constantes na seção transversal e no comprimento entre as tomadas de pressão, e o termo aceleracional do gradiente de pressão como desprezível.

$$\alpha [\%] = \left( 1 - \frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right) * 100 \quad (4.2)$$

Os transmissores de pressão instalados na linha bifásica foram espaçados de 117 cm, sendo que o transmissor a montante da estação ultrassônica foi instalado 12,5 cm abaixo do ponto de injeção de gás (Figura 4.1). Foi realizada uma correção na leitura de pressão do sensor PT\_20 de modo a retirar a parcela de líquido estático compreendido entre este sensor e a injeção de gás ( $PT_{20} - 0,125 * g * \rho_l$ ).

## 5 Resultados e discussões

### 5.1 Diâmetro e forma das bolhas

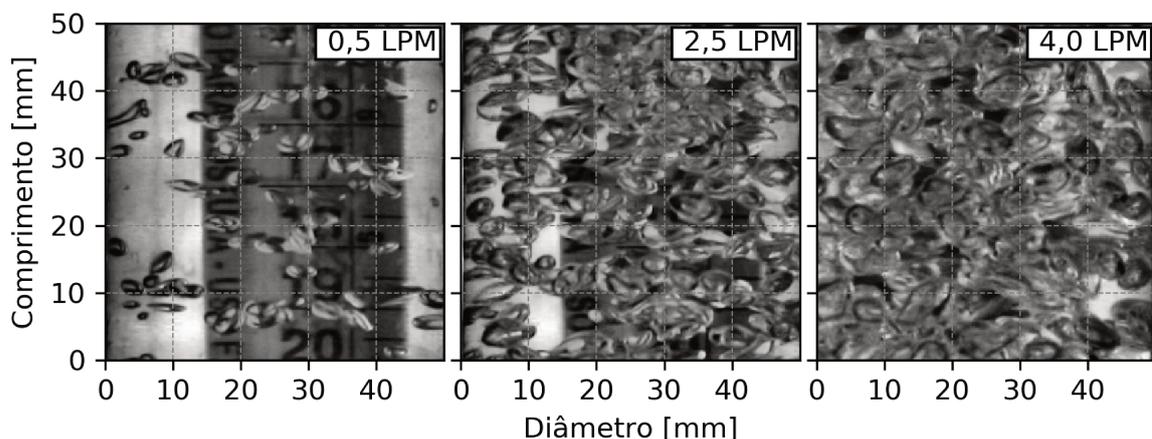
O diâmetro e a forma das bolhas são parâmetros essenciais para compreender o padrão de escoamento e a dinâmica da coluna de bolhas [46]. A forma das bolhas foi classificada através dos diâmetros médios ( $d_m$ ) extraídos por análise visual das imagens obtidas do escoamento. Para cada vazão de gás, o diâmetro médio das bolhas foi calculado através da média dos diâmetros das circunferências inscritas e circunscritas às bolhas [69]. Os resultados para cada ponto experimental estão apresentados na Tabela 5.1, sendo que os números de Eötvös ( $E_o$ ) e Morton ( $M$ ) foram calculados a partir do diâmetro, das propriedades do fluido e da gravidade (Seção 3.1.2).

Tabela 5.1: Diâmetro médio das bolhas mensurados por análise de imagens.

Vazão de gás [LPM]	$d_m$ [mm]	$E_o$ [-]	$M$ [-]
0,5	4	2,4	$6.10^{-6}$
1,0	5	3,8	$6.10^{-6}$
1,5	6,5	6,4	$6.10^{-6}$
2,0	7	7,4	$6.10^{-6}$
2,5	7,5	8,5	$6.10^{-6}$
3,0	8	9,6	$6.10^{-6}$
3,5	8	9,7	$6.10^{-6}$
4,0	8	10,0	$6.10^{-6}$

A partir dos resultados obtidos e conforme seção 3.1.2, a região delimitada pelas faixas de  $2,4 \leq E_o \leq 10,0$  e  $M = 6.10^{-6}$  situa-se no formato de bolhas distorcidas. Através das imagens obtidas (Figura 5.1), é possível verificar, qualitativamente, a presença de bolhas no formato distorcido nos escoamentos na faixa de vazões estudadas, pois nota-se achatamento e distorção no contorno das bolhas na direção do escoamento.

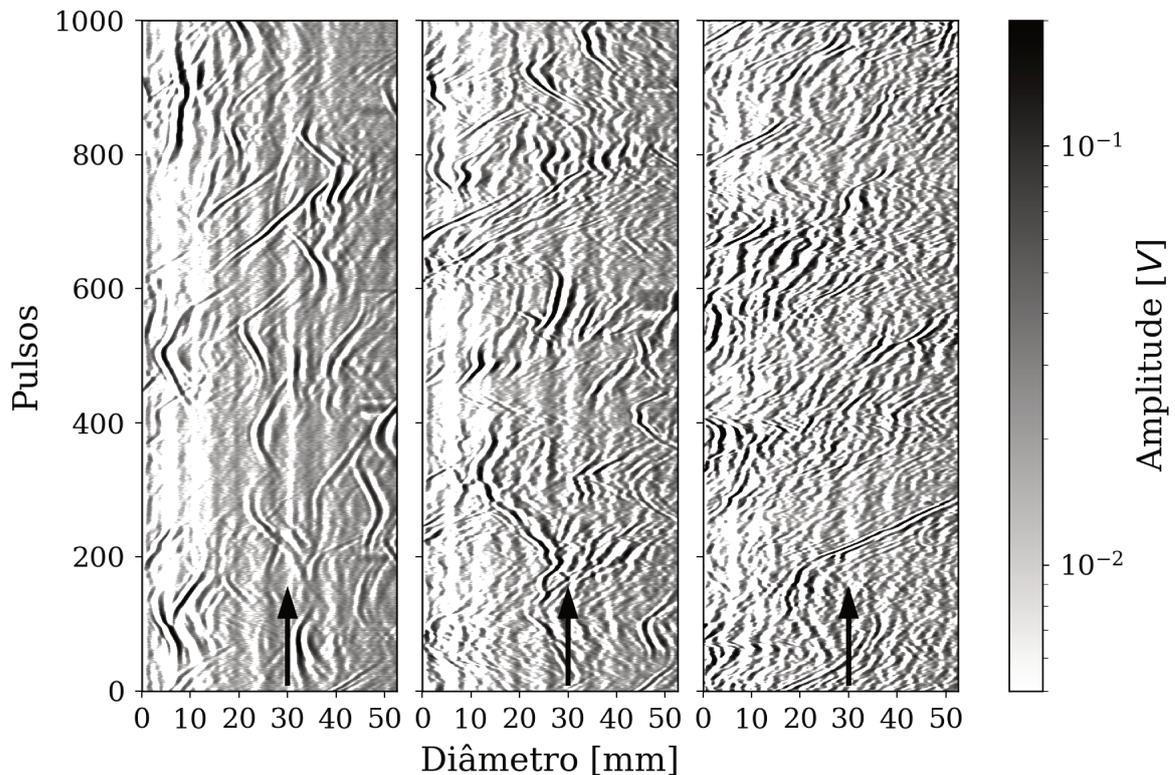
Figura 5.1: Imagens do escoamento com vazões de 0,5 (esq.), 2,5 (centro) e 4,0 (dir.) LPM.



## 5.2 Análise do movimento de ascensão das bolhas

Outro modo de visualizar sinais ultrassônicos é através de um ecograma (Figura 5.2). O ecograma apresenta as amplitudes dos sinais em uma escala de cores, aqui adotada branco para os valores mínimos e preto para valores máximos de amplitude. Cada linha horizontal representa um sinal ultrassônico refletido do escoamento após a propagação da onda através da seção transversal da tubulação. A Figura 5.2 representa 1000 pulsos (0,5 s) consecutivos para as vazões de gás de 0,5, 1,5 e 2,5 litros por minuto (LPM). Deste modo, a Figura 5.2 apresenta o movimento das interfaces das bolhas ao longo da linha de medição do ultrassom que possui uma espessura de  $1/2''$ , tornando possível observar o movimento oscilatório das bolhas durante o movimento de ascensão no meio estacionário. A seta vertical indica a direção de deslocamento das bolhas.

Figura 5.2: Ecograma com vazões de 0,5 (esq.), 1,5 (centro) e 2,5 (dir.) LPM.



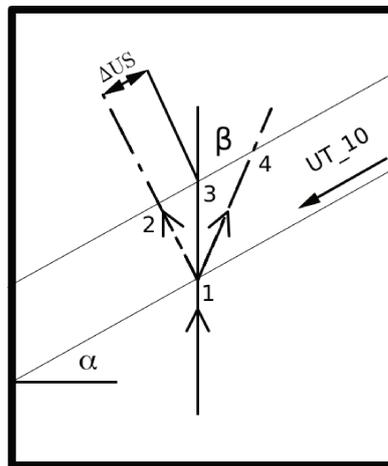
Para a mesma faixa de diâmetros de bolhas encontrados na seção 5.1, tem-se relatado na literatura o movimento oscilatório de ascensão das bolhas [52], o qual está intrinsecamente associado à esteira que se forma na parte traseira das bolhas. Este movimento oscilatório também foi verificado, para toda a faixa de vazões de gás utilizada, com o auxílio das imagens do escoamento.

A ascensão das bolhas em movimento oscilatório pode implicar em diferenças significativas na direção do movimento relativo entre a trajetória da bolha e a direção axial (1  $\rightarrow$  3) da tubulação, conforme pode ser visto na Figura 5.3. Nesta figura, o ângulo  $\alpha$  simboliza o ângulo

formado entre o feixe ultrassônico e a direção ortogonal à tubulação. Este ângulo é utilizado na determinação do deslocamento axial da partícula em relação ao ultrassom ( $\Delta US$ ) através da lei de Snell.

Uma vez que é assumido o movimento de ascensão das bolhas paralelo a tubulação, considera-se que todas as bolhas se movem das posições 1  $\rightarrow$  3 para o cálculo do deslocamento das interfaces na direção do ultrassom (UT\_10) durante a passagem das bolhas a jusante do transdutor. Deste modo, o movimento de 1  $\rightarrow$  2 e 1  $\rightarrow$  4 retorna deslocamentos menores e maiores que 1  $\rightarrow$  3, respectivamente. Os movimentos 1  $\rightarrow$  2 e 1  $\rightarrow$  4 foram representados para evidenciar que desvios no cálculo de  $\Delta US$  são induzidos devido ao movimento oscilatório de ascensão das bolhas. O ângulo  $\beta$  indica desvios angulares no movimento de ascensão das bolhas.

Figura 5.3: Movimento oscilatório de ascensão das bolhas.

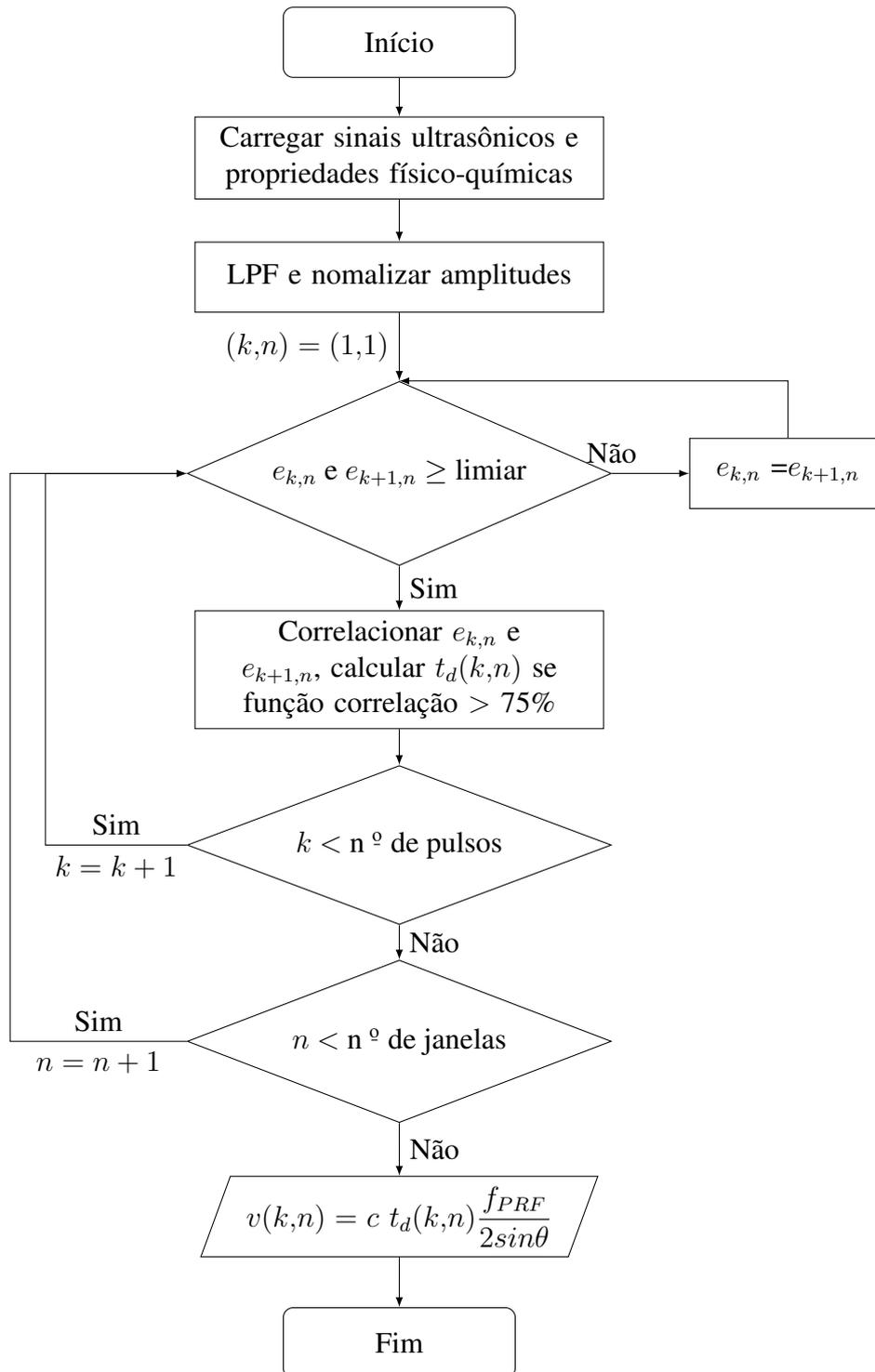


### 5.3 Procedimento para o cálculo da velocidade

Foi utilizado o método da correlação cruzada (Seção 3.2.1) baseado em sinais ultrassônicos obtidos de transdutores únicos em cada experimento para determinar a velocidade de ascensão da fase dispersa ao longo da seção transversal. Este método tem sua origem na detecção e o rastreamento do movimento das bolhas. Para atingir tal objetivo, a correlação cruzada foi executada entre dois pulsos consecutivos, sendo que cada pulso foi dividido em seções (janelas) a fim de tornar possível o rastreamento das bolhas entre os pulsos e a discretização ao longo da seção transversal. Assumindo simetria axial, o perfil de velocidade foi calculado em meia seção. Ao fim deste procedimento é calculada uma matriz de atrasos ( $t_d(k,n)$ ), as quais representam a distância na qual uma dada bolha se deslocou na direção a linha de medição do ultrassom.

Na Figura 5.4 se descreve o procedimento computacional adotado para determinar a velocidade das bolhas. A etapa inicial, pré-tratamento, diz respeito à leitura dos dados de tempera-

Figura 5.4: Fluxograma para a determinação do perfil de velocidade das bolhas via correlação cruzada utilizando sinais ultrassônicos.



tura da linha bifásica provenientes dos dados de processo adquiridos pelo CLP para a obtenção da velocidade de propagação do som no meio líquido. Após a leitura dos dados ultrassônicos, os dados são normalizados no intervalo de -1 a 1 e filtrados. Foi utilizado um filtro de passa baixa (LPF) para eliminar frequências maiores que o dobro da frequência central do transdutor, possuindo as seguintes características: Modelo Parks McClellan (Remez), banda de transição

de  $10^5$  Hz, frequência de corte igual ao dobro da frequência central do transdutor e filtro de 350ª ordem, sendo a taxa de amostragem de 50 MHz. A normalização foi realizada com o objetivo de mitigar os efeitos de acoplamento e possibilitar a aplicação de limiar em amplitudes para diferentes ângulos e frequências.

Após a realização deste pré-processamento, tem-se início o código para o cálculo de velocidades utilizando a correlação cruzada. Foi realizada a correlação entre pares de sinais eco ( $e(k,n)$ ), em que  $k$  significa o número do pulso e  $n$  a indexação da janela. Para cada indexação de janela são avaliados pares de sinais eco sucessivos, avaliando se há amplitudes superiores a um certo limiar. O limiar é definido a partir das médias das máximas amplitudes dos sinais eco ultrassônico sem presença de bolhas no meio contínuo. Deste modo, o limiar é utilizado com o objetivo de não realizar a correlação cruzada entre sinais eco que não contenham bolhas. Caso não ocorra, toma-se os pares de pulsos imediatamente sucessivos e realiza-se o teste novamente. Caso o evento ocorra, são correlacionadas as duas janelas de sinais eco e avaliado o máximo da função correlação cruzada. Caso o máximo da função correlação cruzada seja maior que 75%, o resultado de atraso é considerado para o cálculo da velocidade, caso contrário é descartado. Uma vez que os sinais ultrassônicos são adquiridos de forma discreta, é aplicada interpolação polinomial de segundo grau na função correlação cruzada para descrever com maior exatidão o atraso entre os sinais. Este procedimento segue até que seja percorrido todo o conjunto de sinais eco.

Deste modo, destacam-se os dois critérios de exclusão adotados: i) limiar no sinal em amplitude para assegurar que a correlação será executada com sinais eco de bolhas e ii) limiar na função correlação cruzada a fim de assegurar que os dois sinais apresentem similaridade.

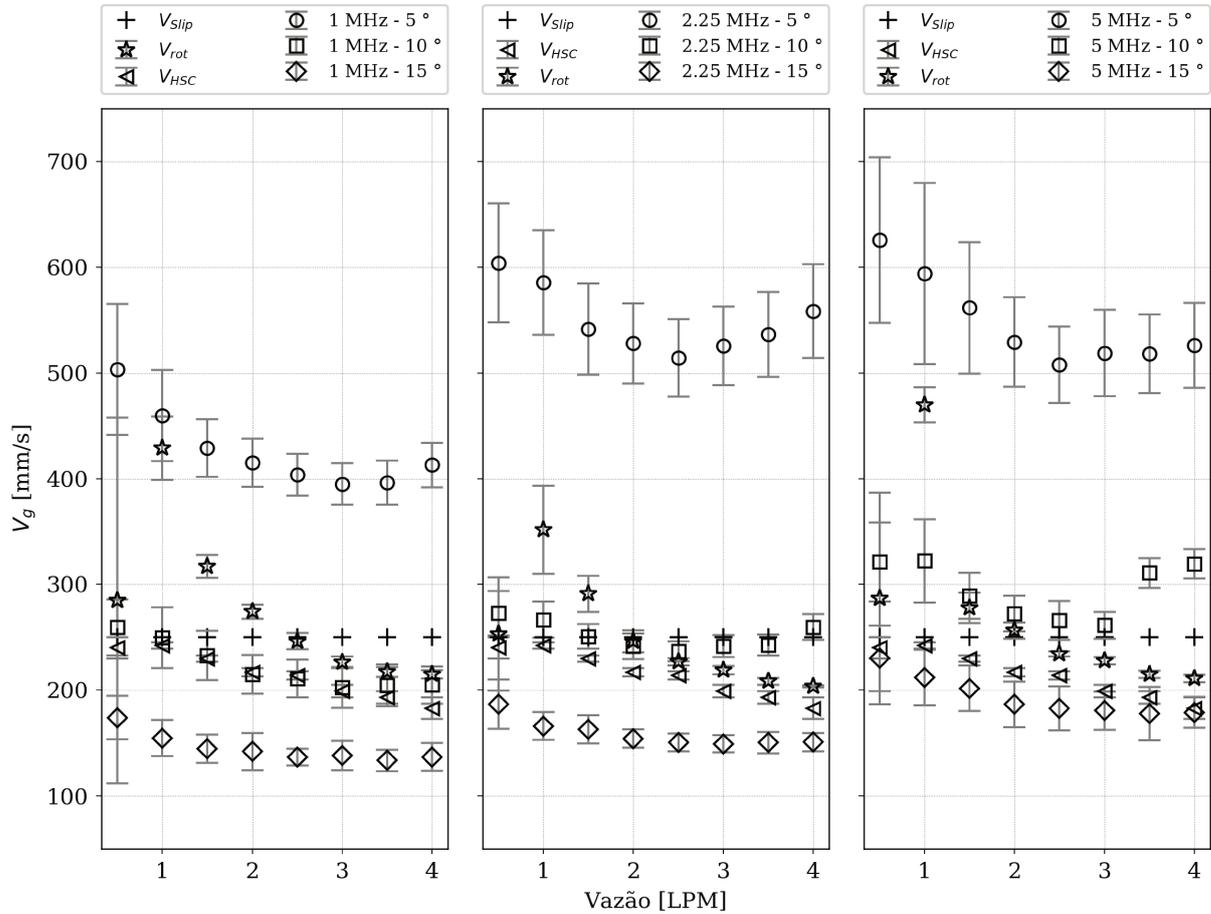
#### 5.4 Velocidade de ascensão das bolhas

Esta seção apresenta os resultados de velocidade obtidos utilizando a técnica de correlação cruzada de sinais ultrassônicos no domínio do tempo, a câmera de filmagem rápida ( $v_{HSC}$ ), o rotâmetro ( $v_{rot}$ ) e a correlação de escorregamento ( $v_{slip}$ ). O valor das velocidades obtidas pelo ultrassom foram calculados a partir das médias dos perfis de velocidades (Apêndice B). Todas as velocidades médias foram expressas com os respectivos intervalos de confiança, utilizando um nível de significância de 5%.

Na Figura 5.5, os resultados de velocidade  $v_{rot}$  e  $v_{slip}$  foram calculados para cada experimento juntamente com o ultrassom. A velocidade  $v_{HSC}$ , no entanto, foi obtida para um único conjunto de experimentos para um par de frequência central e inclinação. Sendo assim, em todas as três colunas da Figura 5.5 estão representadas as mesmas velocidades  $v_{HSC}$ .

Através dos resultados apresentados na Figura 5.5 é possível observar que o ultrassom tende a retornar valores em patamares distintos para diferentes inclinações em relação a linha ortogonal à tubulação ( $\theta$ ) e frequências centrais dos transdutores. Observa-se que frequências mais elevadas tendem a retornar velocidades mais elevadas.

Figura 5.5: Comparativo de velocidades médias de ascensão das bolhas na coluna de bolhas.



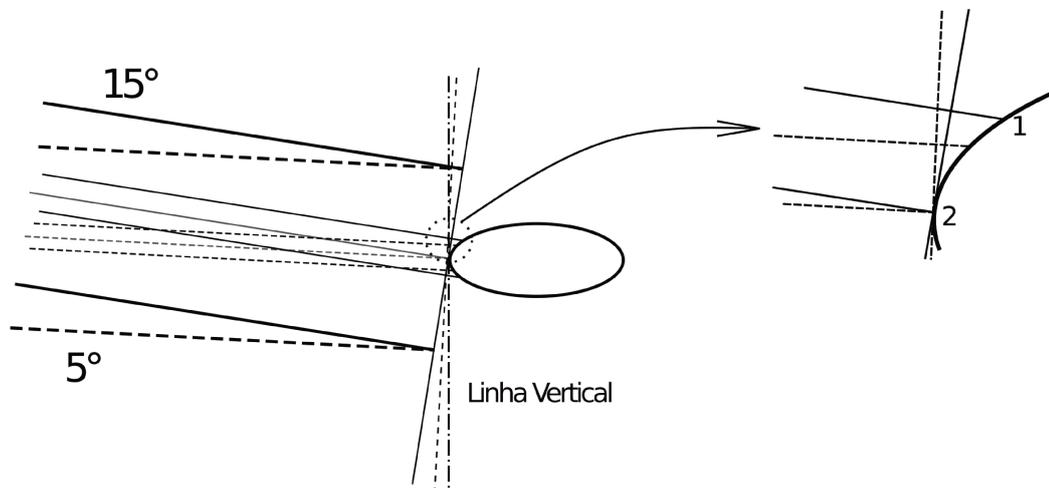
O regime de dissipação  $Ka \approx 1$  é delimitado por  $0,1\lambda < d_m < 100\lambda$  [62]. Todos os experimentos realizados estão dentro deste regime, uma vez que, considerando as diferentes frequências, os diâmetros médios das bolhas devem estar dentro da faixa de 0,15 e 30 mm. Este regime é marcado pela complexa relação entre a velocidade de propagação do som e a frequência central do transdutor. Para emulsões, McClements [62] apresentou uma relação de incremento no valor da velocidade de propagação no meio com o incremento da frequência central do transdutor. Para dispersão de areia em água, Lee et al. [70] também observaram a dependência da velocidade de propagação acústica com a frequência utilizada no ultrassom. Os autores sugeriram que o mecanismo de espalhamento acústico no meio seja o principal fator responsável pela alteração na velocidade de propagação acústica. Diante do exposto, acredita-se que a velocidade de propagação do som nos experimentos tenha sido alterada para as várias frequências utilizadas de modo a incrementar da menor para a maior frequência, sendo assim responsável por parte do desvio sistemático entre os resultados.

Os resultados de velocidades médias demonstram que o cálculo da velocidade também é influenciado pela inclinação entre o feixe ultrassônico e a interface das bolhas. Considerando que a interface da bolha é percebida pelo ultrassom apenas quando o feixe ultrassônico incide com aproximadamente  $90^\circ$  e que a variação de posição da interface é mensurada na direção do

feixe acústico, acredita-se que as distintas velocidades para diferentes inclinações são devidas aos diferentes deslocamentos calculados entre os pulsos ultrassônicos nas interfaces das bolhas e a região da interface na qual as velocidades são calculadas.

Considere a representação das bolhas obtidas nos experimentos como uma elipsoide (Figura 5.6). Em decorrência do achatamento da bolha, nota-se que a interface na região do ponto 1 apresenta uma planicidade superior que na região do ponto 2. Deste modo, a taxa de variação da posição da interface da bolha entre os pulsos ultrassônicos reduz na medida em que a inclinação aumenta de 5 para 15 °. Sendo assim, os deslocamentos entre pulsos e o cálculo do atraso pela correlação cruzada retorna valores menores para 15° do que para 5 °.

Figura 5.6: Influência do ângulo de emissão acústica para estimar o deslocamento da interface das bolhas ao longo da linha de medição do ultrassom.



A precisão do cálculo de velocidade com a inclinação  $\theta$  está relacionada com a variação na área equivalente de reflexão das interfaces, com a deformação contínua da bolha e o movimento oscilatório. A área equivalente está associada à região na qual o feixe ultrassônico detecta a interface da bolha. Através da Figura 5.6, observa-se que a área equivalente para a inclinação de 5° é mais estreita (delimitada pelas linhas tracejadas) do que para a inclinação de 15° (delimitada pelas linhas contínuas).

Nota-se que os maiores intervalos de confiança ocorreram com as vazões de gás ( $Q_g$ ) de 0,5 - 1,5 LPM. Esta variância nos resultados está relacionada com as limitações operacionais, uma vez que 0,5 LPM é o limite inferior da faixa de medição do rotâmetro. A exceção da inclinação de 5°, os resultados apresentam-se circunscritos na faixa de 100 a 350 mm/s. A velocidade  $v_{slip}$  apresenta-se como uma espécie de média dos resultados obtidos pelo rotâmetro ( $v_{rot}$ ). Dentro da faixa de vazão experimentalada, é possível observar uma tendência de redução da velocidade na medida em que a vazão de gás foi sendo incrementada.

A partir de resultados experimentais, Clift et al. [52] apresentam uma relação gráfica entre a velocidade terminal e o diâmetro de bolhas em movimento de ascensão em água. Na faixa de diâmetros encontrada neste trabalho, a velocidade terminal situa-se na região de 230 a 250

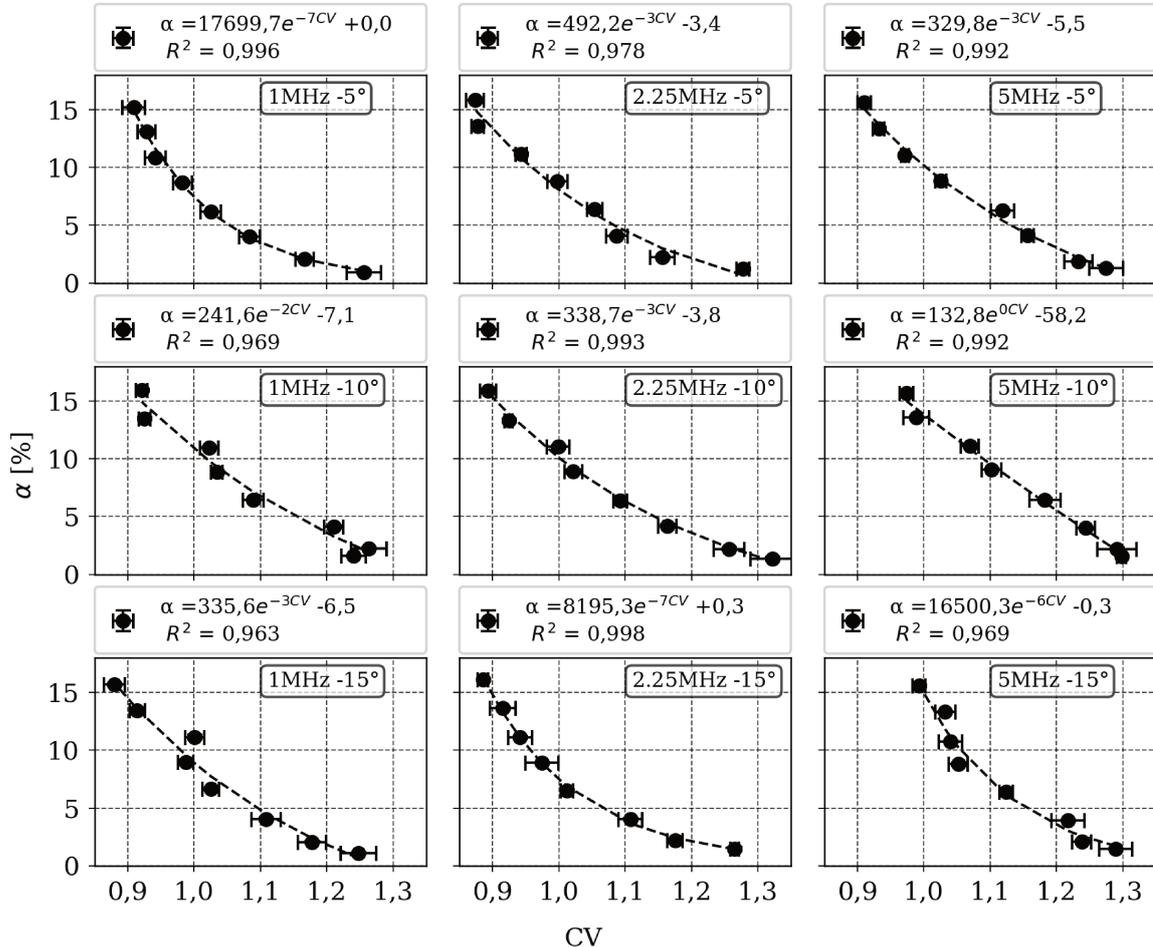
mm/s.

A velocidade mensurada pela câmera ( $v_{HSC}$ ) tende a apresentar maior confiabilidade para as vazões mais baixas, uma vez que o algoritmo é baseado na detecção e acompanhamento das bolhas ao longo dos *frames*. Em contraposição,  $v_{rot}$  converge para a região de velocidades obtidas através das demais técnicas para vazões de gás acima de 1,5 LPM.

## 5.5 Fração de vazio

Com o objetivo de realizar a calibração dos valores de coeficiente de variação (CV), inicialmente foram realizados ajustes das frações de vazio da fase dispersa ( $\alpha$ ) mensurados pelo sistema de diferença de pressão em função do CV utilizando sinais ultrassônicos normalizados. Os resultados dos ajustes obtidos estão representados na Figura 5.7. O CV foi calculado a partir da razão entre desvio padrão e energia média do sinal de energia dos sinais ultrassônicos. Uma vez calibrado, foi possível, em conjunto com o cálculo da velocidade, obter a vazão da fase dispersa sem a necessidade do sistema de diferença de pressão.

Figura 5.7: Ajuste das frações de vazio obtidas pelo sistema de diferença de pressão em função do coeficiente de variação obtido pelo ultrassom.



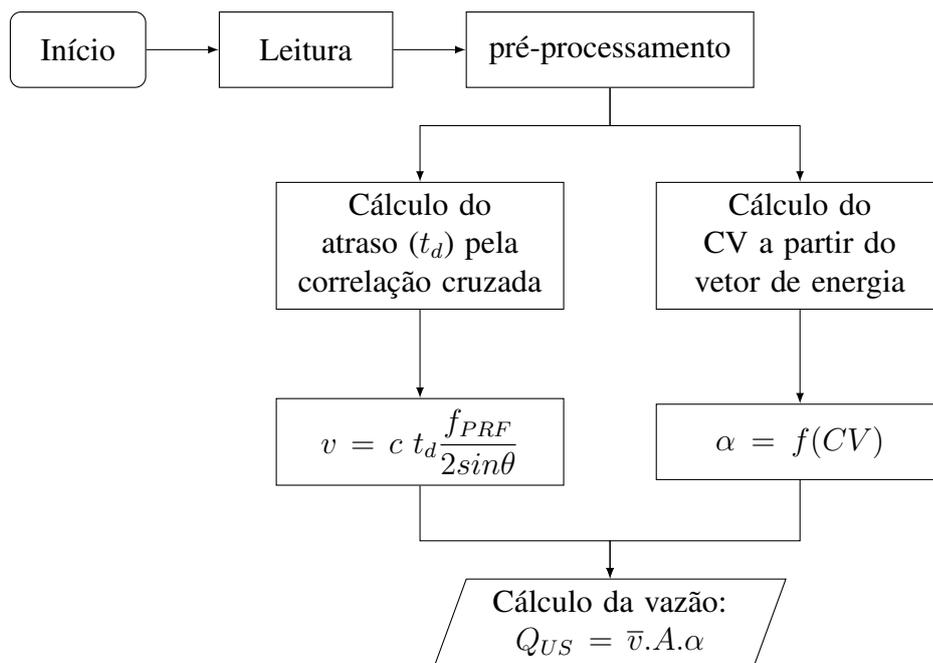
Foi utilizada função exponencial para os ajustes a partir da análise gráfica dos resultados em escala logarítmica, na qual foi possível verificar correspondência linear entre CV e a fração de vazio obtida pelo sistema de diferença de pressão. Os ajustes obtidos apresentaram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 95% e faixa de CV delimitada entre 0,85 e 1,3 para todos os experimentos.

Os resultados indicam uma tendência de redução de CV com o aumento da vazão de gás, ou seja, na medida em que a vazão aumenta a média do sinal de energia tende a dominar a razão com o desvio padrão. Acredita-se que este aumento relativo do sinal de energia seja devido a maior presença de reflexões detectadas no sinal eco. A tendência de diminuição de CV com a vazão também foi observado por Figueiredo [19] em escoamentos bifásicos água-ar bolhas dispersas.

Encontra-se na literatura a utilização da energia do sinal eco para determinação de fração de vazios em escoamentos multifásicos [19] [44]. No entanto, a utilização da energia do sinal admite interferências tanto da intensidade do acoplamento do sinal acústico quanto da configuração dos parâmetros de aquisição, como ganho e tensão aplicada ao transdutor. Sendo assim, este trabalho propõe a utilização de CV com sinais eco normalizados pela primeira parede para correlacionar fração de vazio em padrão de escoamento bolhas com o intuito de conferir generalidade ao método.

## 5.6 Procedimento para o cálculo da vazão

Figura 5.8: Procedimento para obter a vazão da fase dispersa utilizando sinais ultrassônicos.



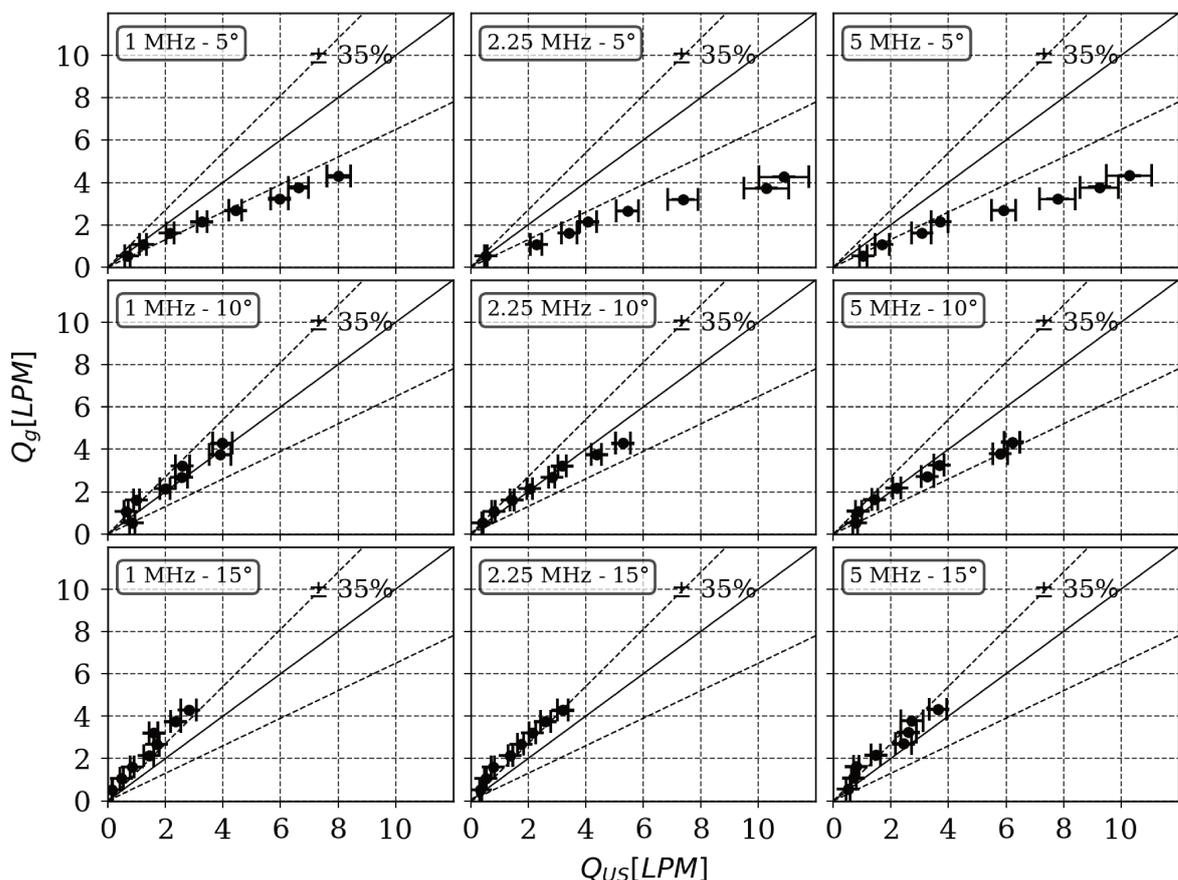
O procedimento para o cálculo da vazão pode ser sintetizado nos seguintes passos (Figura 5.8):

- Realizar a leitura e o pré-processamento dos sinais ultrassônicos descrito na seção 5.3, carregar também os dados de processo;
- Calcular o atraso entre os sinais ultrassônicos de um dado experimento conforme descrito na seção 5.3;
- Obter a velocidade das bolhas a partir dos resultados de atraso e dos dados de processo;
- Obter o CV a partir do cálculo do vetor de energia conforme seção 3.2.2;
- Calcular  $\alpha$  a partir de CV através de um ajuste obtido previamente de CV em função de  $\alpha$ ;
- Por fim, obtém-se a vazão a partir das velocidades, frações de vazio da fase dispersa e da área da seção transversal.

## 5.7 Vazão da fase dispersa

A partir dos resultados de velocidade média (seção 5.4) e frações de vazio (seção 5.5), foi possível obter a vazão da fase dispersa ( $Q_{US}$ ) utilizando somente sinais ultrassônicos. Encontram-se ilustrados na Figura 5.9 um comparativo dos resultados obtidos utilizando o ultrassom e o rotâmetro.

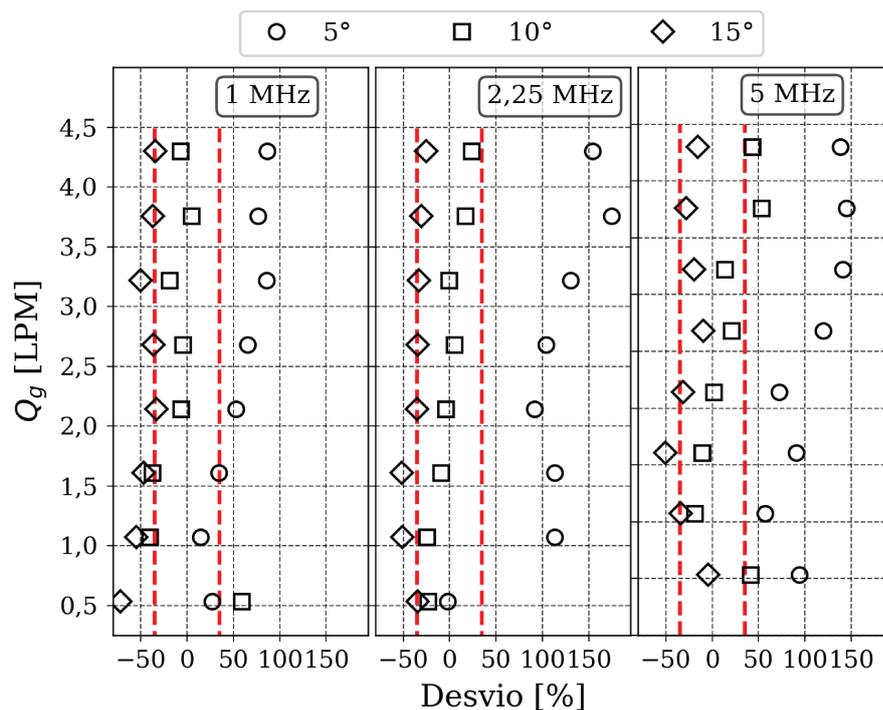
Figura 5.9: Vazão da fase dispersa estimada pelo ultrassom versus rotâmetro.



Os melhores resultados foram obtidos com a inclinação de 10°, pois apresentam os menores desvios em relação aos valores mensurados pelo rotâmetro. Nota-se, no entanto, que a medição realizada pelo ultrassom tende a subestimar os resultados utilizando a inclinação de 15°, apresentando desvios próximos de 35%, e superestimar com 5°, na qual chega a apresentar desvios acima de 100%.

Através da Figura 5.10 é possível visualizar o desvio relativo dos resultados de vazão utilizando o ultrassom em relação ao rotâmetro. O desvio foi calculado através da Equação 5.1. É possível notar que os desvios foram mais acentuados para diferentes inclinações do que para as diferentes frequências. Os resultados que apresentaram os menores desvios foram aqueles obtidos com a inclinação de 10°. Nesta inclinação, 79% dos resultados obtidos de vazão apresentaram desvios inferiores a 35% em relação à referência em toda a faixa experimentada, chegando a 100% dos resultados dentro desta faixa de desvios com a frequência central do transdutor de 2,25 MHz.

Figura 5.10: Desvio percentual da vazão da fase dispersa estimada pelo ultrassom em relação ao rotâmetro.



$$Desvio[\%] = \frac{Q_{US} - Q_g}{Q_g} * 100 \quad (5.1)$$

## 6 Conclusões

### 6.1 Conclusões gerais

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema para medição de vazão da fase dispersa utilizando técnica ultrassônica de forma não invasiva e não intrusiva. Este sistema é baseado na análise de sinais ecos ultrassônicos de um transdutor refletidos pela fase dispersa no escoamento. Embora na prática industrial diversos padrões de escoamento possam ser obtidos, este sistema foi desenvolvido para ser aplicado no padrão de escoamento bolhas sem necessitar de prévia separação das fases presentes no escoamento. Deste modo, o sistema proposto é uma contribuição para o desenvolvimento de um medidor multifásico de vazão com o objetivo de estimar a vazão em escoamentos verticais bifásicos líquido-gás de modo contínuo sem a necessidade de utilizar separadores de teste.

Utilizando as inclinações do transdutor de 10 ou 15°, mais de 98% dos resultados obtidos de vazão apresentam desvios inferiores a 50% em relação à referência. No entanto, nota-se que 79% dos resultados obtidos com a inclinação de 10° apresentaram desvios máximos de 35%.

As principais conclusões obtidas são:

- Acredita-se que os maiores intervalos de confiança obtidos com o uso da inclinação de 5° tenham como causa a menor área superficial na qual o feixe ultrassônico é refletido e o movimento de ascensão oscilatório das bolhas;
- A inclinação exerceu influência mais significativa que a frequência central nos resultados obtidos de velocidade pelo ultrassom;
- Os melhores resultados de vazão obtidos com o ultrassom utilizaram a inclinação de 10°;
- Os resultados obtidos de velocidade através da técnica de análise de imagens casamento de modelo retornaram valores subestimados em relação as medições realizadas pelo rotâmetro, no entanto, observa-se menores desvios padrão nos resultados ao longo da faixa de vazões;
- Utilizando a inclinação de 10° , 79% dos resultados obtidos de vazão da fase dispersa apresentaram desvios inferiores a 35% em relação à referência em toda a faixa experimentada.

### 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Diante dos resultados obtidos, sugere-se para trabalhos futuros:

- Avaliar o comportamento quantitativo da velocidade de propagação do som utilizando diferentes frequências e inclinações dos transdutores;
- Modelar a relação da geometria das bolhas com a inclinação do transdutor;
- Avaliar o procedimento proposto com diferentes fluidos como fase contínua;

- Avaliar a utilização da técnica em meios trifásicos sólido-líquido-gás;
- Avaliar a robustez do CV em outros fluidos, condições operacionais e padrões de escoamentos para correlacionar sinal eco ultrassônico com frações de vazão.

## Referências bibliográficas

- [1] L. S. Hansen, S. Pedersen, and P. Durdevic. Multi-phase flow metering in offshore oil and gas transportation pipelines: Trends and perspectives. *Sensors*, 19, 2019. ISSN 14248220. doi: 10.3390/s19092184.
- [2] G. Falcone, G. F. Hewitt, and C. Alimonti. *Multiphase Flow Metering: Principles and Applications*. Elsevier, 2009. ISBN 978-0-444-52991-6.
- [3] G. Falcone, G. F. Hewitt, C. Alimonti, and B. Harrison. Multiphase Flow Metering: Current Trends and Future Developments. *Annual Technical Conference and Exhibition - SPE*, 2001.
- [4] N Kantarci, F Borak, and K O Ulgen. Bubble column reactors. *Process Biochemistry*, 40: 2263–2283, 2005. doi: 10.1016/j.procbio.2004.10.004.
- [5] M. M. F. Figueiredo. Desenvolvimento de uma técnica baseada em medidas ultrassônicas e redes neurais para a identificação do padrão de escoamento e determinação da fração volumétrica de gás de escoamentos multifásicos da indústria petrolífera, 2016. ISSN 1098-6596.
- [6] A. M. V. Nakashima. Desenvolvimento de redes neurais utilizando técnica ultrassônica e números adimensionais para determinação da fração de vazão e padrões de escoamentos multifásicos representativos da indústria do petróleo, 2015.
- [7] M. M.F. Figueiredo, J. L. Goncalves, A. M.V. Nakashima, A. M.F. Fileti, and R. D.M. Carvalho. The use of an ultrasonic technique and neural networks for identification of the flow pattern and measurement of the gas volume fraction in multiphase flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 70:29–50, 2016. ISSN 08941777. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2015.08.010.
- [8] R. Thorn, G. A. Johansen, and B. T. Hjertaker. Three-phase flow measurement in the petroleum industry. *Measurement Science and Technology*, 24, 2013. doi: 10.1088/0957-0233/24/1/012003.
- [9] E. Nyfors. Industrial Microwave Sensors: A Review. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 1, 2000. doi: 10.1023/A:1010118609079.
- [10] C. Tompkins, H. M. Prasser, and M. Corradini. Wire-mesh sensors: A review of methods and uncertainty in multiphase flows relative to other measurement techniques. *Nuclear Engineering and Design*, 337:205–220, 2018. doi: 10.1016/j.nucengdes.2018.06.005.
- [11] J. L. Gonçalves. *Desenvolvimento de uma Técnica Ultrassônica para Medição da Concentração das Fases Dispersas em Escoamentos Multifásicos Representativos da Indústria de Petróleo e Gás Natural*. PhD thesis, Universidade Federal de Itajubá, 2013.

- [12] P. Y. Lin and T. J. Hanratty. Detection of slug flow from pressure measurements. *International Journal of Multiphase Flow*, 13:13–21, 1987. ISSN 03019322. doi: 10.1016/0301-9322(87)90003-6.
- [13] I. A. Belyaev, N. G. Razuvanov, V. G. Sviridov, and V. S. Zagorsky. Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals. *Flow Measurement and Instrumentation*, 55: 37–43, 2017. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.05.004.
- [14] H. Shaban and S. Tavoularis. On the accuracy of gas flow rate measurements in gas-liquid pipe flows by cross-correlating dual wire-mesh sensor signals. *International Journal of Multiphase Flow*, 78:70–74, 2016.
- [15] J Coulthard. Cross-Correlation Flowmeters. *Ultrasonics*, (November 1972):83–88, 1973.
- [16] L. C. Lynnworth and Y. Liu. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955-2005. *Ultrasonics*, 44(SUPPL.), 2006. doi: 10.1016/j.ultras.2006.05.046.
- [17] F. R. Coutinho, C. Y. Ofuchi, L. V. R. De Arruda, F. Neves, and R. E. M. Rigoberto. A new method for ultrasound detection of interfacial position in gas-liquid two-phase flow. *Sensors*, 14(5):9093–9116, 2014. ISSN 14248220. doi: 10.3390/s140509093.
- [18] F. Liang, H. Zheng, H. Yu, and Y. Sun. Gas-liquid two-phase flow pattern identification by ultrasonic echoes reflected from the inner wall of a pipe. *Measurement Science and Technology*, 27(3):35304, 2016. ISSN 13616501. doi: 10.1088/0957-0233/27/3/035304.
- [19] M. M. F. Figueiredo. *Caracterização de escoamentos verticais bifásicos utilizando ultrassom*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2020.
- [20] C. Y. Ofuchi. *Medição do Perfil de Velocidade por Técnica Ultrassônica Utilizando o Método da Autocorrelação Estendida e Equipamento para Ensaios Não Destrutivos*. PhD thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- [21] Y. Takeda. Velocity profile measurements by ultrasound Doppler shift method. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 7:313, 1986.
- [22] G. Rajita and Nirupama Mandal. Review on transit time ultrasonic flowmeter. *2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication, CIEC 2016*, pages 88–92, 2016. doi: 10.1109/CIEC.2016.7513740.
- [23] X. Shi, X. Dong, C. Tan, and F. Dong. Dispersed Oil-Water Two-Phase Flow Velocity Measurement Based on Ultrasonic Cross-Correlation Technique. In *35th Chinese Control Conference*, Chengdu, 2016.

- [24] J. Coulthard and Y. Yan. Ultrasonic cross-correlation flowmeters. *Measurement and Control*, 26(6), 1993.
- [25] X. Dong, C. Tan, and F. Dong. Gas-Liquid Two-Phase Flow Velocity Measurement with Continuous Wave Ultrasonic Doppler and Conductance Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(11):3064–3076, 2017. ISSN 00189456. doi: 10.1109/TIM.2017.2717218.
- [26] X. Shi, C. Tan, X. Dong, and F. Dong. Structural Velocity Measurement of Gas-Liquid Slug Flow Based on EMD of Continuous Wave Ultrasonic Doppler. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(11):2662–2675, 2018. ISSN 00189456. doi: 10.1109/TIM.2018.2826858.
- [27] C. Tan, X. Dong, and F. Dong. Continuous Wave Ultrasonic Doppler Modeling for Oil-Gas-Water Three-Phase Flow Velocity Measurement. *IEEE Sensors Journal*, 18(9):3703–3713, 2018. ISSN 1530437X. doi: 10.1109/JSEN.2018.2812834.
- [28] W. Wongsaroj, A. Hamdani, N. Thong-un, H. Takahashi, and H. Kikura. Extended Short-Time Fourier Transform for Ultrasonic Velocity Profiler on two-phase bubbly flow using a single resonant frequency. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(1), 2018. doi: 10.3390/app9010050.
- [29] Masanori Aritomi, Shirong Zhou, Makoto Nakajima, Yasushi Takeda, and Michitsugu Mori. Measurement system of bubbly flow using ultrasonic velocity profile monitor and video data processing unit, (II). *Journal of Nuclear Science and Technology*, 34(8):783–791, 1997. ISSN 00223131. doi: 10.1080/18811248.1997.9733742.
- [30] Hideki Murakawa, Hiroshige Kikura, and Masanori Aritomi. Application of ultrasonic doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29(7 SPEC. ISS.):843–850, 2005. ISSN 08941777. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2005.03.002.
- [31] H. Torp and K. Kristoffersen. Velocity matched spectrum analysis: A new method for suppressing velocity ambiguity in pulsed-wave Doppler. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 21(7):937–944, 1995. ISSN 03015629. doi: 10.1016/0301-5629(95)00039-T.
- [32] O. Bonnefous and P. Pesqué. Time domain formulation of pulse-doppler ultrasound and blood velocity estimation by cross correlation. *Ultrasonic Imaging*, 8:73–85, 1986. ISSN 01617346. doi: 10.1177/016173468600800201.
- [33] I. A. Hein and W. D. O'Brien. Current Time-Domain Methods for Assessing Tissue Motion by Analysis from Reflected Ultrasound Echoes—A Review. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 40(2), 1993. ISSN 08853010. doi: 10.1109/58.212556.

- [34] S. Wada, N. Furuichi, and T. Shimada. Application of partial inversion pulse to ultrasonic time-domain correlation method to measure the flow rate in a pipe. *Measurement Science and Technology*, 2017. doi: 10.1088/1361-6501/aa83df.
- [35] Y. Sato, M. Mori, Y. Takeda, K. Hishida, and M. Maeda. Signal processing for advanced correlation ultrasonic velocity profiler. *International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*, 2002.
- [36] Y. Ozaki, T. Kawaguchi, Y. Takeda, K. Hishida, and M. Maeda. High time resolution ultrasonic velocity profiler. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(2-4):253–258, 2002. ISSN 08941777. doi: 10.1016/S0894-1777(02)00134-6.
- [37] T. Pan and H. Chiang. Ultrasound low-velocity flow estimations using cross-correlation and decorrelation: A thread phantom study. *Medical Engineering and Physics*, 29(5): 602–614, 2007. ISSN 13504533. doi: 10.1016/j.medengphy.2006.06.006.
- [38] O. Bonnefous. Blood flow and tissue motion with ultrasound for vascular applications. *Optical and Acoustical Imaging of Biological Media*, 2:1161–1178, 2001. ISSN 12962147. doi: 10.1016/S1296-2147(01)01252-5.
- [39] J. A. Jensen. Range/velocity limitations for time-domain blood velocity estimation. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 19(9):741–749, 1993. ISSN 03015629. doi: 10.1016/0301-5629(93)90091-2.
- [40] W. F. Walker and G. E. Trahey. Using Partially Correlated Speckle Signals. *Ieee Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 42(2):301–308, 1995.
- [41] T. Nguyen, T. H. Kikura, H. Duong, N. H. Murakawa, and N. Tsuzuki. Measurements of single-phase and two-phase flows in a vertical pipe using ultrasonic pulse doppler method and ultrasonic cross-correlation method. *Vietnam Journal of Mechanics*, 35(3):239–256, 2013.
- [42] Y. Soong, I. K. Gamwo, A. G. Blackwell, F. W. Harke, R. R. Schehl, and M. F. Zarochak. Ultrasonic Characterization of Slurries in an Autoclave Reactor at Elevated Temperature. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, pages 1807–1812, 1996. doi: 10.1016/S1385-8947(97)00066-1.
- [43] S. Chakraborty, E. Keller, J. Talley, A. Srivastav, A. Ray, and S. Kim. Void fraction measurement in two-phase flow processes via symbolic dynamic filtering of ultrasonic signals. *Measurement Science and Technology*, 20, 2009. doi: 10.1088/0957-0233/20/2/023001.
- [44] R. D.M. Carvalho, O. J. Venturini, E. I. Tanahashi, F. Neves, and F. A. França. Application of the ultrasonic technique and high-speed filming for the study of the structure of air-

- water bubbly flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33:1065–1086, 2009. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2009.06.004.
- [45] Y. Zheng and Q. Zhang. Simultaneous measurement of gas and solid holdups in multiphase systems using ultrasonic technique. *Chemical Engineering Science*, 59:3505–3514, 2004. ISSN 00092509. doi: 10.1016/j.ces.2004.05.016.
- [46] G. Besagni and F. Inzoli. Bubble sizes and shapes in a counter-current bubble column with pure and binary liquid phases. *Flow Measurement and Instrumentation*, 67:55–82, 2019. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.04.008.
- [47] Y T Shah, B G Kelkar, S P Godbole, and W -D Deckwer. Design parameters estimations for bubble column reactors. *AIChE Journal*, 28(3):353–379, 1982. ISSN 15475905. doi: 10.1002/aic.690280302.
- [48] R. F. Mudde. Gravity-Driven Bubbly Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 37:393–423, 2005. doi: 10.1146/annurev.fluid.37.061903.175803.
- [49] J. H. Hills. Radial non-uniformity of velocity and voidage in a bubble column. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 52:1–9, 1974.
- [50] A. Shaikh and M. H. Al-Dahhan. A review on flow regime transition in bubble columns. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 5, 2007. ISSN 15426580. doi: 10.2202/1542-6580.1368.
- [51] B N Thorat and J B Joshi. Regime transition in bubble columns: Experimental and predictions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28(5):423–430, 2004. ISSN 08941777. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2003.06.002.
- [52] R. Clift, J. R. Grace, and M. E. Weber. *Bubbles, Drops, and Particles*. Academic Press, London, 1978. ISBN 0-12-176950-X.
- [53] O. Shoham. *Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes*. 2006. ISBN 155563107X.
- [54] Y. Taitel, D. Bornea, and A. E. Dukler. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. *AIChE Journal*, 26(3):345–354, 1980. ISSN 15475905. doi: 10.1002/aic.690260304.
- [55] J. G. Proakis and D. G. Manolakis. *Digital signal processing: Principles, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, fourth edition, 2006.
- [56] D. H. Evans and W. N. McDicken. *Doppler ultrasound: Physics, Instrumentation and Signal Processing*. 2nd edition, 2000. ISBN 0-471-97001-8.

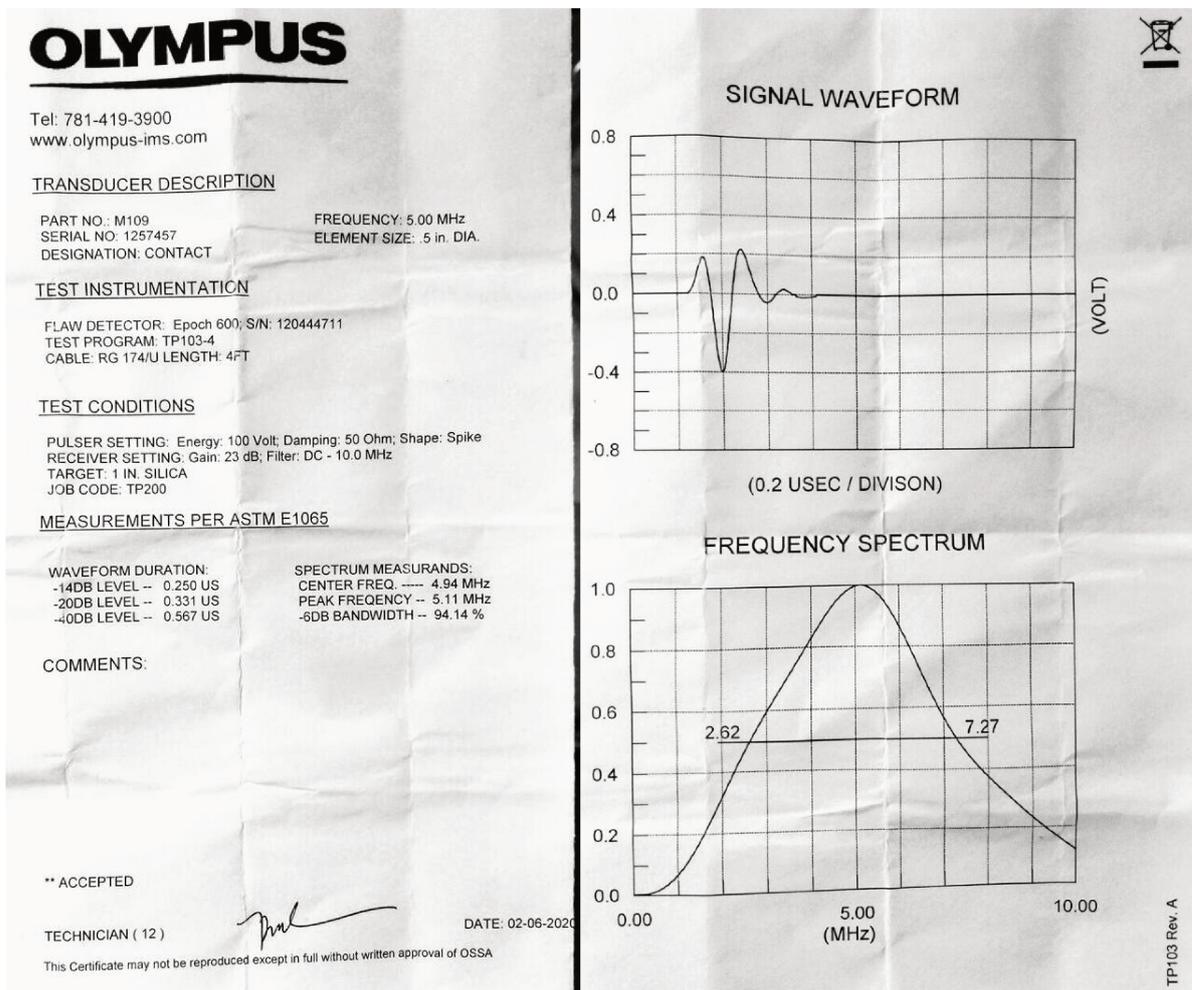
- [57] R. Brunelli. *Template matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice*. 2009. ISBN 9780470517062.
- [58] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders. *Fundamentals of acoustics*. John Wiley & Sons, Inc., 4<sup>a</sup> edition, 2000. ISBN 0-471-84789-5.
- [59] Yang-Hann Kim. *Sound propagation - An Impedance Based Approach*. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 1 edition, 2010. ISBN 9780470825839.
- [60] M. F. Insana and T. J. Hall. Parametric ultrasound imaging from backscatter coefficient measurements: Image formation and interpretation. *Ultrasonic Imaging*, pages 245–267, 1990.
- [61] A. Richter, T. Voigt, and S. Ripperger. Ultrasonic attenuation spectroscopy of emulsions with droplet sizes greater than 10  $\mu\text{m}$ . *Journal Of Colloid And Interface Science*, pages 482–492, 2007. doi: 10.1016/j.jcis.2007.06.081.
- [62] D. J. McClements. Principles of Ultrasonic Droplet Size Determination in Emulsions. *American Chemical Society*, pages 3454–3461, 1996. doi: 10.1021/la960083q.
- [63] Y. Murai, Y. Tasaka, Y. Nambu, Y. Takeda, and R. Gonzalez A., S. Ultrasonic detection of moving interfaces in gas-liquid two-phase flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3):356–366, 2010. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2010.03.007.
- [64] M. Figueiredo, H. Gutierrez, A. M. F. Fileti, N. Ratkovich, and R. D. M. Carvalho. The Use of Artificial Neural Networks for Flow Pattern Identification and GVF Determination in Two-phase Flows. In *Modelling, Simulation and Identification / 841: Intelligent Systems and Control*, 2016. doi: 10.2316/P.2016.841-011.
- [65] J. A. Zagzebski. *Essentials of Ultrasound Physics*. Mosby, 1996. ISBN 0815198523.
- [66] N. Bilaniuk and G. S.K. Wong. Speed of sound in pure water as a function of temperature. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93(3):1609–1612, 1993. ISSN NA. doi: 10.1121/1.406819.
- [67] Jørgen Arendt Jensen. Implementation of Ultrasound Time-Domain Cross-Correlation Blood Velocity Estimators. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 40(5):468–474, 1993. ISSN 15582531. doi: 10.1109/10.243415.
- [68] C. Tang and T. J. Heindel. Estimating gas holdup via pressure difference measurements in a cocurrent bubble column. *International Journal of Multiphase Flow*, 32(7):850–863, 2006. ISSN 03019322. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.02.008.

- [69] F. Raymond and J. M. Rosant. A numerical and experimental study of the terminal velocity and shape of bubbles in viscous liquids. *Chemical Engineering Science*, 55(5):943–955, 2000. ISSN 00092509. doi: 10.1016/S0009-2509(99)00385-1.
- [70] K. Il Lee, V. F. Humphrey, Byoung-Nam Kim, and S. W. Yoon. Frequency dependencies of phase velocity and attenuation coefficient in a water-saturated sandy sediment from 0.3 to 1.0 MHz. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(5):2553–2558, 2007. ISSN 0001-4966. doi: 10.1121/1.2713690.





Figura 6.3: Especificação do transdutor ultrassônico de 5 MHz.



## Apêndice B - Perfis de velocidade

Figura 6.4: Perfis de velocidade mensurados com o ultrassom a 5° e 1 MHz.

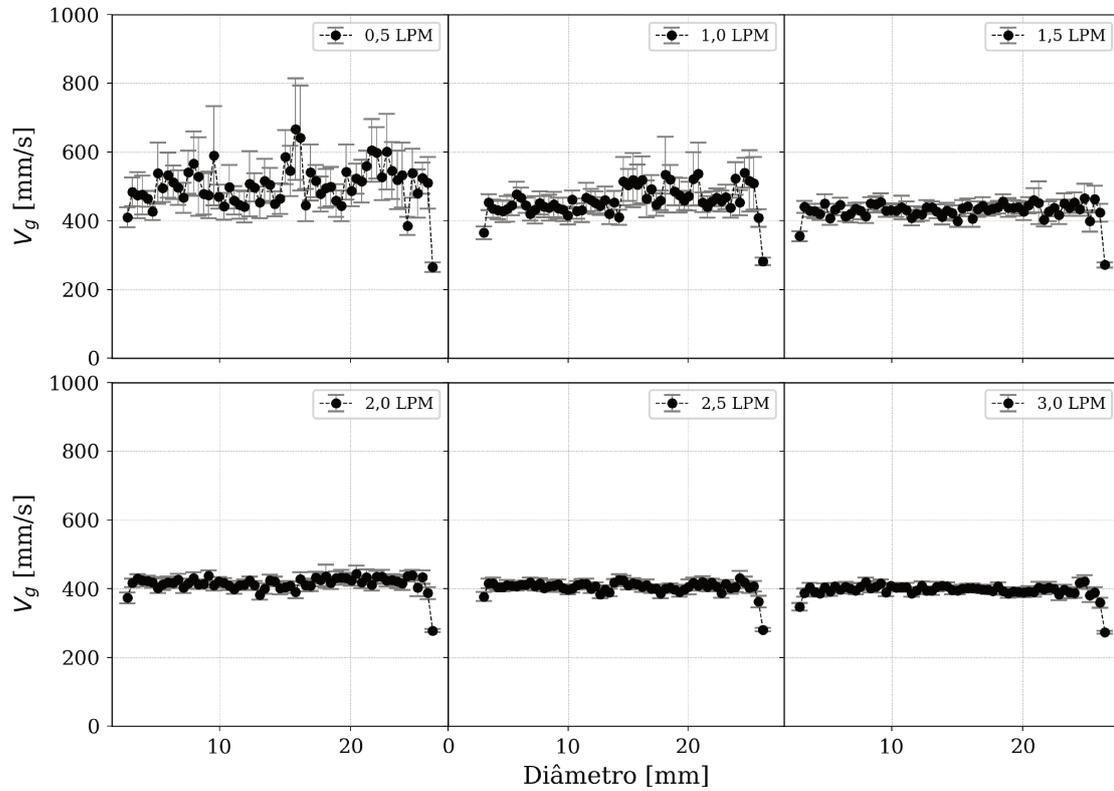


Figura 6.5: Perfis de velocidade medidos com o ultrassom a  $5^\circ$  e 2,25 MHz.

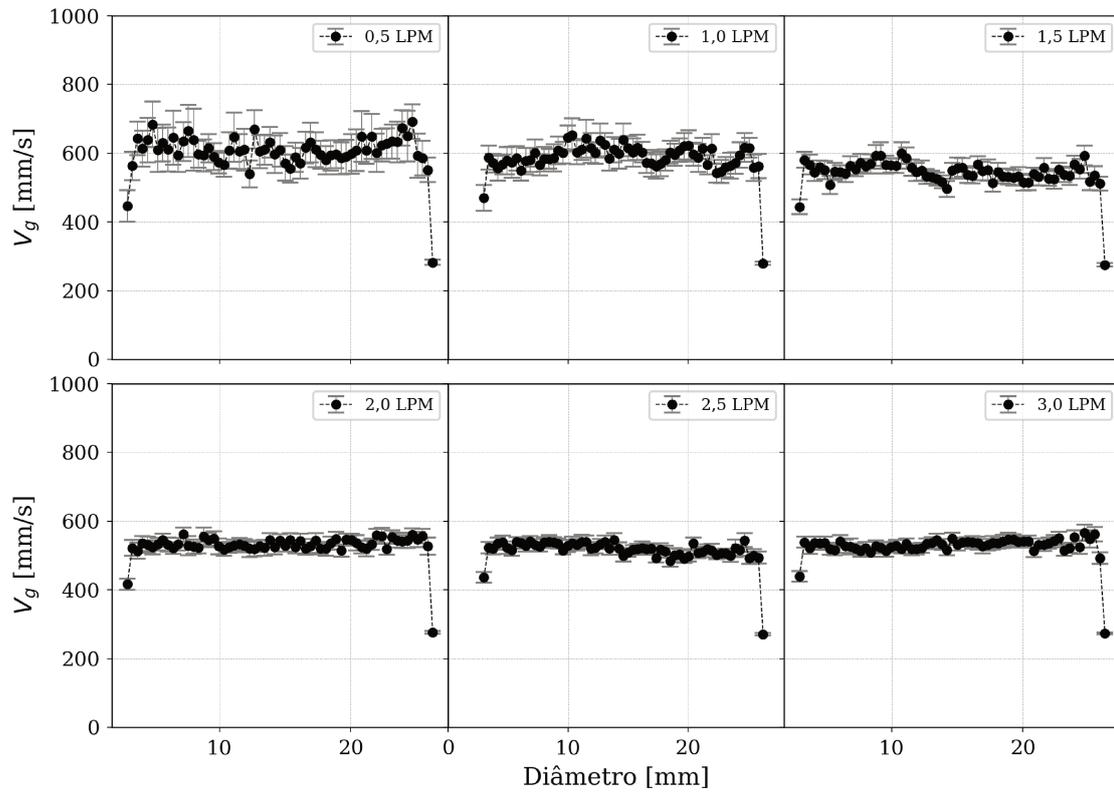


Figura 6.6: Perfis de velocidade medidos com o ultrassom a  $5^\circ$  e 5 MHz.

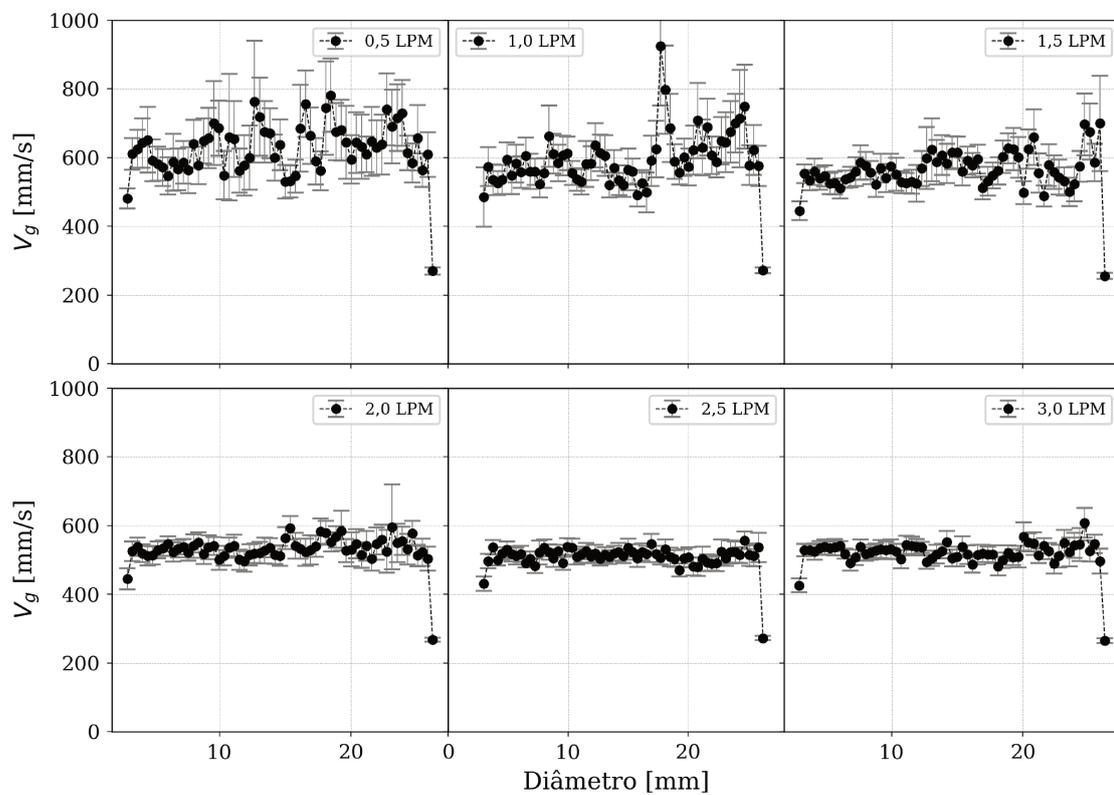


Figura 6.7: Perfis de velocidade medidos com o ultrassom a  $10^\circ$  e 1 MHz.

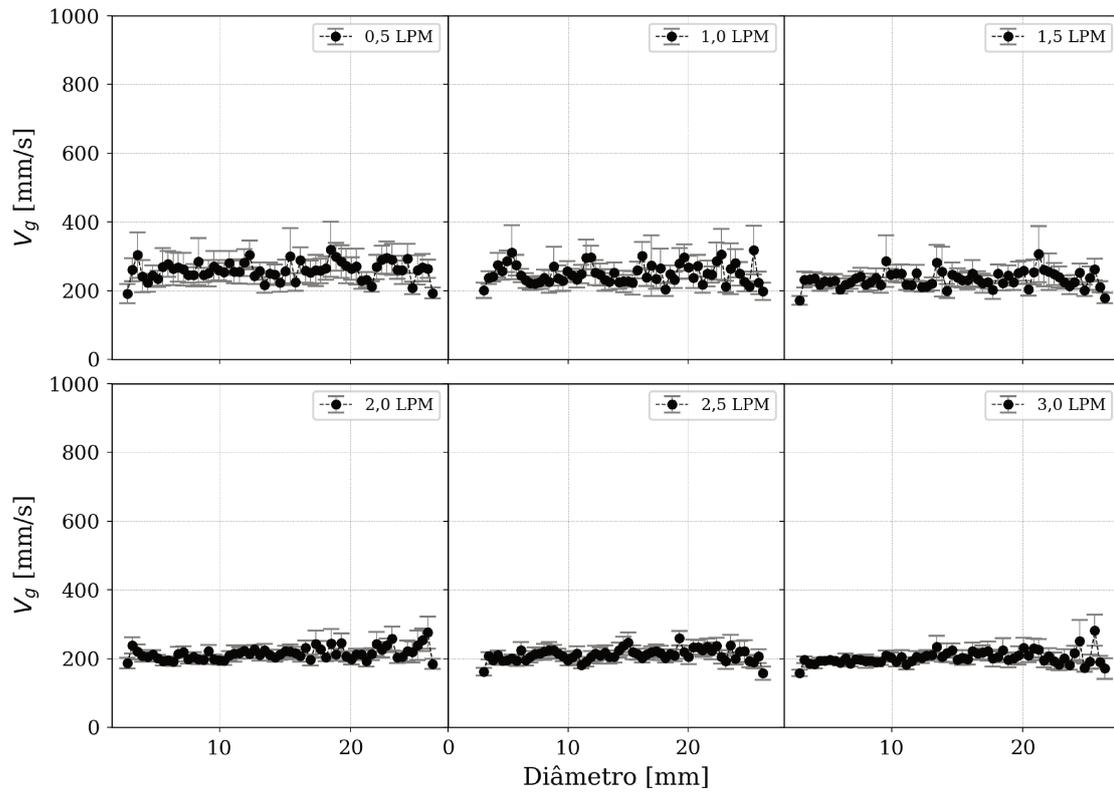


Figura 6.8: Perfis de velocidade medidos com o ultrassom a  $10^\circ$  e 2,25 MHz.

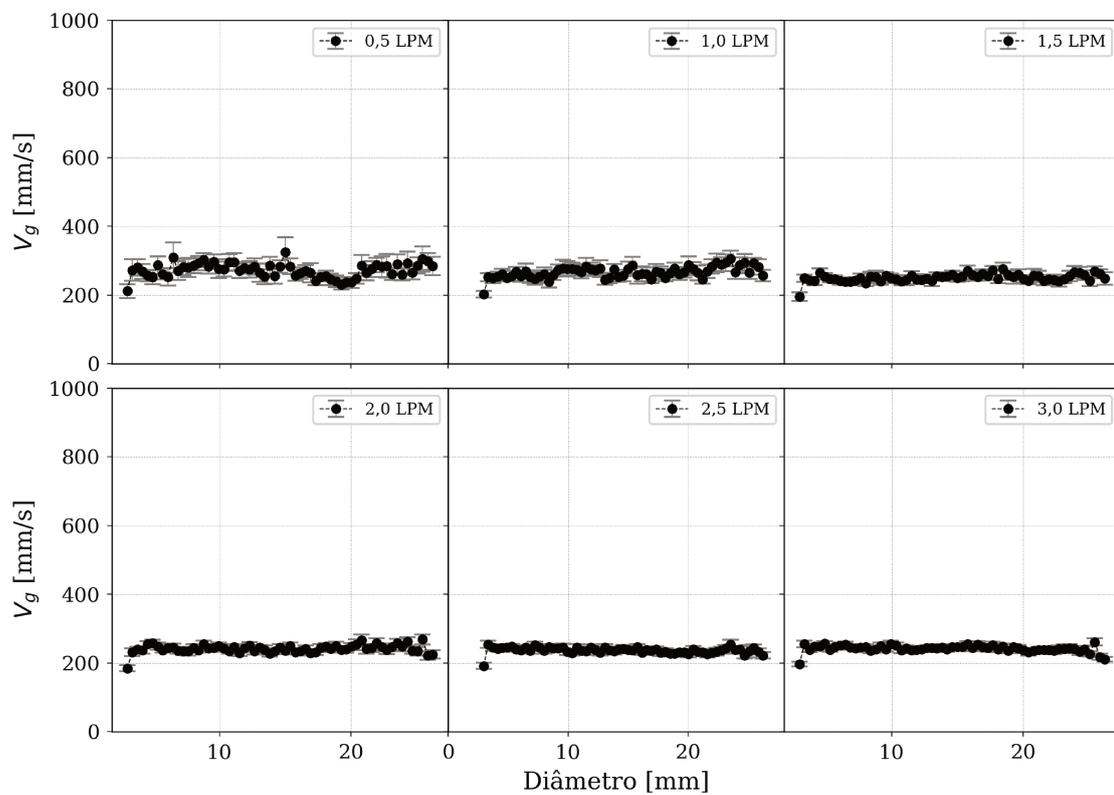


Figura 6.9: Perfis de velocidade medidos com o ultrassom a  $10^\circ$  e 5 MHz.

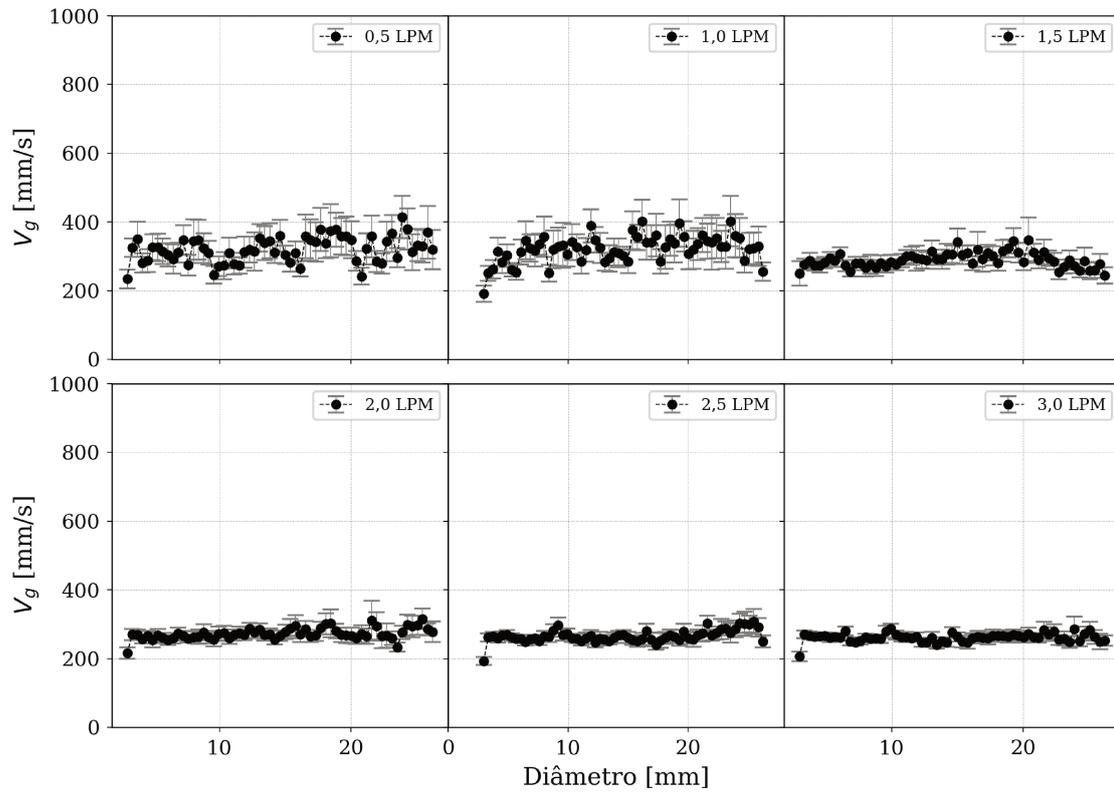


Figura 6.10: Perfis de velocidade medidos com o ultrassom a  $15^\circ$  e 1 MHz.

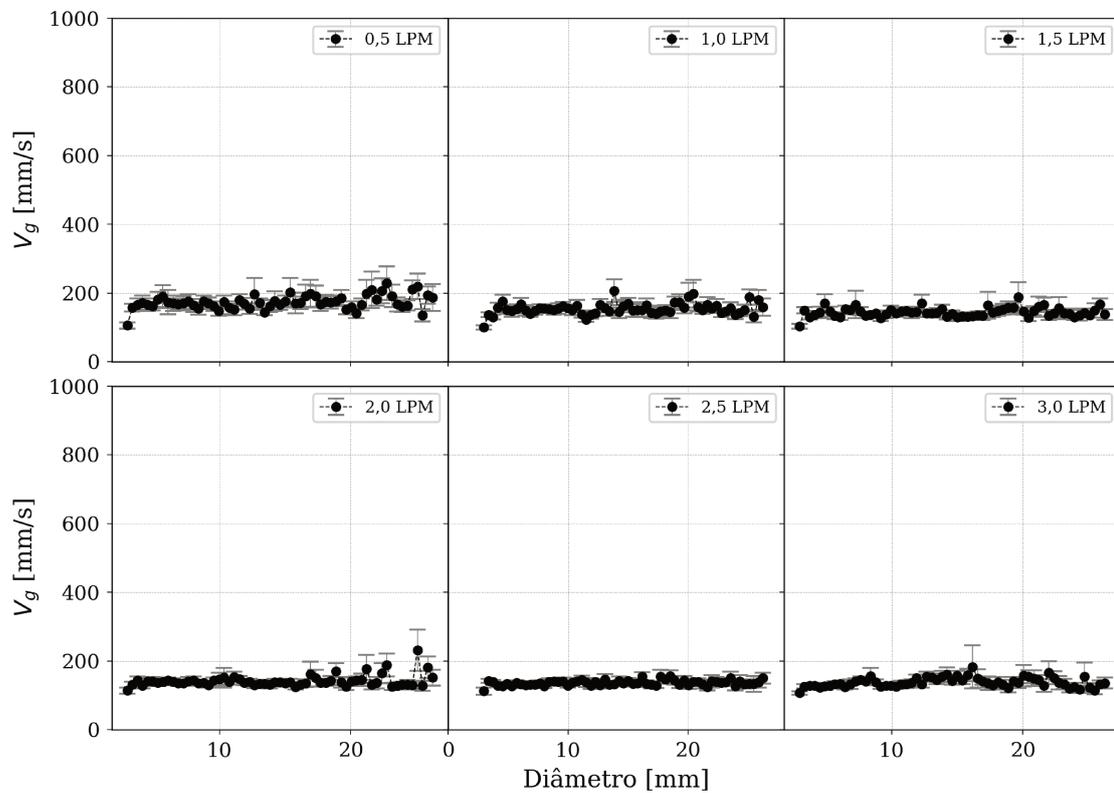


Figura 6.11: Perfis de velocidade medidos com o ultrassom a 15° e 2,25 MHz.

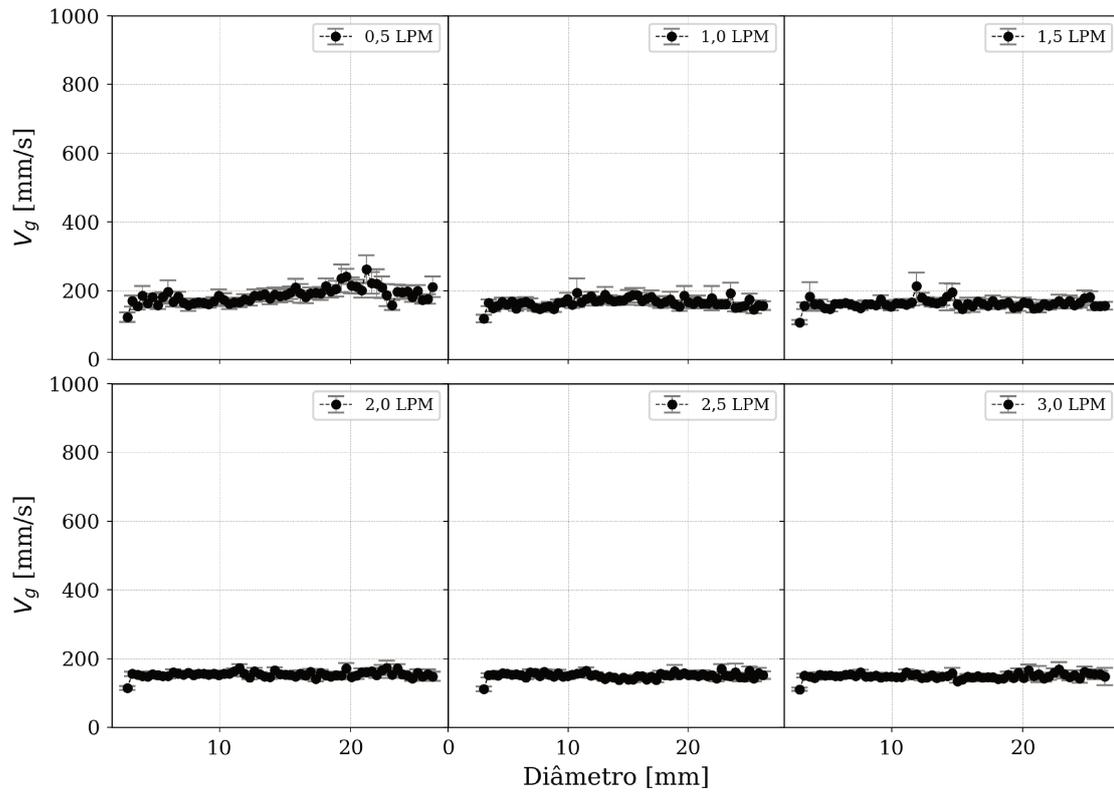


Figura 6.12: Perfis de velocidade medidos com o ultrassom a 15° e 5 MHz.

