



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Química

TIAGO FERREIRA SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA ULTRASSÔNICA PARA A ESTIMATIVA  
DA FRAÇÃO DE VAZIO E VAZÃO DA FASE DISPERSA DE ESCOAMENTOS  
ÁGUA-AR

CAMPINAS  
2021

TIAGO FERREIRA SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA ULTRASSÔNICA PARA A ESTIMATIVA  
DA FRAÇÃO DE VAZIO E VAZÃO DA FASE DISPERSA DE ESCOAMENTOS  
ÁGUA-AR

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

Orientadora: Profa. Dra. Ana Maria Frattini Fileti

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À  
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO  
DEFENDIDA PELO ALUNO TIAGO  
FERREIRA SOUZA, E ORIENTADA PELA  
PROFA. DRA. ANA MARIA FRATTINI  
FILETI

CAMPINAS  
2021

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

So89d Souza, Tiago Ferreira, 1992-  
Desenvolvimento de uma técnica ultrassônica para a estimativa da fração de vazio e vazão da fase dispersa de escoamentos água-ar / Tiago Ferreira Souza. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

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

1. Escoamento bifásico. 2. Ultrassom. 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:** Development of an ultrasonic technique for determination of the void fraction and the gas flow rate in water-air two-phase flows

**Palavras-chave em inglês:**

Two-phase flow

Ultrasound

**Área de concentração:** Engenharia Química

**Titulação:** Mestre em Engenharia Química

**Banca examinadora:**

Ana Maria Frattini Fileti [Orientador]

Renato da Rocha Lopes

Edilson de Jesus Santos

**Data de defesa:** 29-01-2021

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

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

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-0092-6893>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/4449234404308285>

Esta dissertação de mestrado foi defendida por Tiago Ferreira Souza no dia 29 de janeiro 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. Edilson de Jesus Santos  
DEQ / UFS  
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

Com carinho, dedico este trabalho à minha mãe, Maria José; à minha vó, Dona Glorinha (*in memorian*); e à minha tia Marlene (*in memorian*).

## AGRADECIMENTOS

É fato, a construção desta dissertação tornou-se viável devido ao suporte fornecido por algumas instituições e pela convivência e colaboração de colegas e amigos. É, portanto, além de mandatório, gratificante agradecer:

À Profa. Dra. Ana Maria Frattini Fileti por prover com maestria ensinamentos e críticas construtivas ao longo da orientação deste trabalho científico. Ana, obrigado por ser um exemplo profissional e pessoal!

À banca examinadora desta dissertação, Prof. Dr. Edilson de Jesus Santos e Prof. Dr. Renato da Rocha Lopes, pelas sugestões, observações e críticas construtivas direcionadas a esta dissertação.

Ao Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva por todo suporte fornecido durante o desenvolvimento deste trabalho científico. Flávio, muito obrigado pelos conselhos e estímulos para seguir em frente!

Ao engenheiro Me. Caio César Silva Araujo e ao engenheiro Dr. Maurício de Melo Freire Figueiredo por contribuir para a elaboração deste trabalho científico mediante discussões técnicas e críticas construtivas. Agradeço imensamente ao Caio pela cooperação na construção da montagem experimental na qual foram realizados os experimentos com escoamentos água-ar!

Ao corpo técnico do setor de Infraestrutura e Manutenção da FEQ pelos serviços prestados a fim de fornecer as condições necessárias para a construção da montagem experimental e realização dos experimentos. Agradeço, em particular, aos engenheiros Marcos Estevom, Emerson Siqueroli e ao Seu Hugo.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Instrumentação de Redes Industriais (LIRI), Laboratório de Engenharia de Sistemas de Processos Químicos (LESQ) e Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP) pelo convívio cordial durante o mestrado.

Aos meus pais, Wilson e Maria José, pelo afeto, cuidado, suporte incessante e ensinamentos dedicados a mim ao longo da minha formação pessoal e profissional. Meu pai e minha mãe, só foi possível chegar até aqui graças a tudo que vocês fizeram e fazem por mim!

À minha namorada, Fernanda, pelo afeto, companheirismo, parceria, paciência e incentivos que compartilhamos durante a jornada que culminou na construção desta dissertação. Nanda, obrigado por estar comigo durante essa trajetória!

Ao Rafael e ao Gabriel, colegas dos tempos de UFS, por me acolherem em sua residência assim que cheguei em Campinas para iniciar o mestrado na FEQ/UNICAMP.

Às minhas “autarquias” — Raul, Breno, Fernandão e Elisa — pelos saudosos momentos compartilhados durante a jornada vivida ao longo do mestrado.

Aos meus companheiros de república — Lucas, Gustavo, Nathália, Luizinho e Marcelo — pelo ambiente ímpar que construímos. Foi enriquecedor ter convivido com vocês ao longo da elaboração deste trabalho científico!

Às amizades que construí no distrito de Barão Geraldo pelos mais diversos e gratificantes momentos compartilhados durante a trajetória vivida ao longo do mestrado.

À Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e à Faculdade de Engenharia Química (FEQ) pela estrutura física disponibilizada e equipe de funcionários qualificada.

Aos funcionários do Centro de Estudo de Petróleo (CEPETRO), situado na UNICAMP, por colaborar para o desenvolvimento desta dissertação. Agradeço, em especial, aos pesquisadores Dr. William Monte Verde e Dr. Jorge Luiz Biazussi, bem como ao Cláudio Varani e ao Luis Gustavo Silva.

À PETROBRAS e à ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) pelo auxílio financeiro fornecido mediante o convênio FUNCAMP/PETROBRAS N.º 5331. Sem a existência desse auxílio financeiro não seria possível executar este trabalho científico, assim como as pesquisas científicas realizadas em paralelo.

## RESUMO

O escoamento líquido-gás está presente em diversos processos de indústrias químicas e petrolíferas. Nesses processos, mensurar de maneira não invasiva a fração de vazio, assim como a vazão da fase dispersa, é fundamental para o monitoramento contínuo e controle adequado da produção. Posto isso, o objetivo geral desta dissertação é apresentar o desenvolvimento de uma técnica alternativa para estimar de forma não invasiva a fração de vazio e vazão da fase dispersa de escoamentos água-ar. Tal técnica opera mediante a realização de medições via ultrassom dos escoamentos bifásicos e aplicação dos pertinentes processamentos aos sinais de eco adquiridos. Para desenvolver essa técnica, experimentos com escoamentos água-ar foram realizados em um circuito experimental construído no Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP), situado na Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Devido às limitações desse circuito experimental, as faixas de fração de vazio e vazão nominal de gás passíveis de mensuração foram de 0–13% e de 0,5–5 L/min, respectivamente. Além disso, apenas o padrão de escoamento bolhas foi averiguado experimentalmente. Mediante a realização dos experimentos, medições via ultrassom dos escoamentos água-ar foram realizadas, como também medições via sistemas de referência para as variáveis hidrodinâmicas fração de vazio e vazão da fase dispersa. Os sinais de eco oriundos das medições ultrassônicas foram processados para obtenção de distintas variáveis ultrassônicas, tais como os sinais adimensionais de energia dos ecos e a razão adimensional. Por intermédio do ajuste de curva à relação estabelecida entre a fração de gás livre — mensurada pelo sistema de referência — e a razão adimensional — proveniente de um único transdutor emissor-receptor — foi possível criar uma função para a estimativa da variável hidrodinâmica previamente citada. Mediante a aplicação da correlação cruzada aos sinais adimensionais de energia dos ecos — oriundos de dois pontos de medição ultrassônica intervalados ao longo da tubulação — foi possível estimar a velocidade média da fase dispersa e, por conseguinte, a vazão de gás dos escoamentos investigados. De acordo com os resultados obtidos, sugere-se que mediante o acoplamento de uma função de ajuste com os valores de razão adimensional provenientes de um único transdutor é possível estimar frações de vazio no intervalo de 1,5–13% com respectivos valores de erro relativo inferiores a 6%. A técnica proposta nesta dissertação para determinar a vazão de gás apresentou sensibilidade às variações de vazão da fase dispersa induzidas nos escoamentos investigados. A maioria das medições de vazão de gás mediante a aplicação de tal técnica decorreram em estimativas que comparadas às referências resultaram em valores de erro relativo no intervalo de 10 a 35%.

**Palavras-chave:** escoamento água-ar; vazão de gás; fração de vazio; ultrassom; medição não invasiva.

## ABSTRACT

The gas-liquid two-phase flow occurs in several processes of chemical and oil industries. For monitoring purpose and suitable production control of these processes, it is essential to measure the void fraction and the gas flow rate in a non-invasive manner. In the face of that, this thesis overall objective is to present an alternative ultrasonic technique to measure non-invasively the void fraction and the gas flow rate of water-air two-phase flows. This technique works by carrying out ultrasonic measurements of two-phase flows and applying the proposed signal processing to the acquired echo signals. To develop this technique, experiments with water-air two-phase flows were performed in an experimental apparatus built in the Laboratory of Process Control and Automation (LCAP) at the School of Chemical Engineering, located at the University of Campinas. Due to the limitations of experimental apparatus, the ranges of void fraction and nominal gas flow rate investigated were 0–13% and 0.5–5 L/min, respectively. In addition, it was possible to investigate only the bubble flow pattern. In the experimental investigation it was performed ultrasonic measurements of water-air two-phase flows as well the void fraction and gas flow rate measurements via reference measuring systems. The echo signals from ultrasonic measurements were processed to obtain several ultrasonic variables, such as dimensionless echo energy signals and dimensionless ratio. By curve fitting the relationship between the void fraction, measured by the reference system, and the dimensionless ratio, from a single emitter-receiver transducer, it was possible to create a function for the estimation of the previously mentioned hydrodynamic variable. According to the results, it is suggested that by coupling a fitting function with the dimensionless ratio values from a single transducer it is possible to estimate void fraction in the range of 1.5–13% with respective error values less than 6%. The technique proposed in this thesis to determine the gas flow rate was sensitive to the variations in flow of the dispersed phase in the two-phase flows explored. Most of the gas flow rate measurements by using this technique resulted in values that compared to the references produced relative error values in the range of 10–35%.

**Keywords:** water-air two-phase flow; gas flow rate; void fraction; ultrasound; non-invasive measurement.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 — INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 Contextualização .....	12
1.2 Escopo da dissertação .....	13
<b>CAPÍTULO 2 — FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
2.1 escoamento líquido-gás .....	15
2.1.1 Variáveis e propriedades físicas de mistura atreladas ao escoamento líquido-gás .....	16
2.2 Ultrassom .....	19
2.3 Definições de parâmetros estatísticos .....	22
2.3.1 Média aritmética .....	22
2.3.2 Desvio padrão amostral .....	22
2.3.3 Erro relativo .....	23
2.3.4 Coeficiente de determinação .....	23
2.3.5 Intervalo de confiança associado à média .....	23
2.4 Parâmetros atrelados ao processamento de sinais .....	24
2.4.1 Cálculo da energia de sinais discretos .....	24
2.4.2 Valor <i>RMS</i> .....	25
2.4.3 Correlação cruzada normalizada .....	25
<b>CAPÍTULO 3 — REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 4 — METODOLOGIA</b> .....	<b>32</b>
4.1 Circuito experimental .....	32
4.1.1 Sistema para medição de sinais de eco ultrassônico .....	36
4.1.2 Sistema para medição da fração de vazio via tomadas de pressão .....	43
4.2 Planejamento experimental .....	46
4.3 Procedimento experimental .....	49
4.4 Processamento dos sinais de eco ultrassônico .....	52
4.4.1 Sinal de energia dos ecos .....	53
4.4.2 Sinal adimensional de energia dos ecos .....	57

4.4.3 Magnitude das flutuações existentes no sinal adimensional de energia dos ecos ( $E_{RMS}$ ) .....	59
4.4.4 Razão adimensional .....	60
4.4.5 Método para estimativa da vazão da fase dispersa via medições ultrassônicas .....	61
<b>CAPÍTULO 5 — RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>64</b>
5.1 Fração de vazio: medições realizadas pelo sistema de referência ...	64
5.2 Relações entre a fração de vazio e as variáveis ultrassônicas .....	66
5.2.1 Variável $\bar{\alpha}$ em função da $\overline{MSE}$ .....	66
5.2.2 Variável $\bar{\alpha}$ em função da $\overline{MSAE}$ .....	69
5.2.3 Variável $\bar{\alpha}$ em função da $\overline{E_{RMS}}$ .....	71
5.2.4 Variável $\bar{\alpha}$ em função da $\overline{RA}$ .....	72
5.2.5 Conclusões sobre as relações experimentais e definição das funções para estimativa da fração de vazio .....	75
5.3 Estimativa da vazão da fase dispersa via medições ultrassônicas ...	81
<b>CAPÍTULO 6 — CONCLUSÃO .....</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>89</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>97</b>

## CAPÍTULO 1 — INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve o contexto no qual a dissertação está inserida, assim como qual o intuito da pesquisa científica realizada.

### 1.1 Contextualização

O escoamento líquido-gás ocorre em diversos dispositivos industriais, desde em reatores tipo coluna de bolhas até nas tubulações que transportam os fluidos do poço petrolífero às estruturas de produção (GOVIER; AZIZ, 1972; ISHII; HIBIKI, 2011; ROSA, 2012). Para projetar tais dispositivos, como também monitorar os processos que neles ocorrem, é fundamental estimar a seguinte variável hidrodinâmica — a fração de gás livre no escoamento bifásico, usualmente denominada de fração de vazio (SHOHAM, 2006; OFUCHI, 2011).

Diversas técnicas têm sido desenvolvidas para a determinação da fração de vazio e, em suma, elas podem ser classificadas como invasivas ou não invasivas. Dentre as técnicas invasivas, destacam-se as sondas de contato elétrico, o sistema de medição via tomadas de pressão do escoamento e o sistema de enclausuramento do escoamento — usualmente denominado como sistema de fechamento rápido de válvulas (DIAS; FRANÇA; ROSA, 2000; TANG; HEINDEL, 2006; THOME; CIONCOLINI, 2017). Apesar de disponíveis para uso, é preferível não aplicar tais técnicas invasivas na quantificação da fração de vazio em processos contínuos nos quais escoam simultaneamente líquido e gás, uma vez que as recalibrações ou manutenções requeridas para tais sistemas de medição impõem a necessidade de interromper o escoamento bifásico e, por conseguinte, o processo no qual tal escoamento ocorre. Portanto, ante ao exposto, faz-se necessário o emprego de técnicas não invasivas, tais como os sistemas de medição baseado em atenuação de radiação e o ultrassom (VATANAKUL; ZHENG; COUTURIER, 2004; ZHENG; ZHANG, 2004; SALGADO *et al.*, 2010).

As técnicas de medição baseadas em atenuação de radiação funcionam mediante a emissão de raios gama, nêutrons ou raios X através do escoamento líquido-gás. Apesar de não invasivas, tais técnicas utilizam radiação ionizante e, por conseguinte, demandam rigoroso controle de segurança para a realização das medições de interesse. Em oposição, os sistemas de medição baseados em ultrassom são não radioativos, portanto, relativamente mais seguros, simples e baratos em

comparação àqueles previamente citados (VATANAKUL; ZHENG; COUTURIER, 2004).

Sucintamente, as técnicas de medição baseadas em ultrassom utilizam-se de transdutores para emitir pulsos ultrassônicos através do escoamento líquido-gás. Alterações na distribuição e concentração da fase dispersa no escoamento acarretam em modificações na amplitude, bem como no tempo de trânsito das ondas ultrassônicas. Assim sendo, as ondas que trafegam em um dado meio bifásico contêm informações relativas ao meio de propagação. Portanto, é factível a associação entre a fração de vazio atrelada a uma dada condição de escoamento bifásico e os pulsos ultrassônicos propagados nesse meio, conforme evidencia a literatura (VATANAKUL; ZHENG; COUTURIER, 2004; ZHENG; ZHANG, 2004; CARVALHO *et al.*, 2009; CHAKRABORTY *et al.*, 2009; GONG *et al.*, 2016).

Na literatura, dentre as pesquisas científicas recentes atreladas à aplicação de ultrassom em escoamentos líquido-gás, há o trabalho científico desenvolvido por Figueiredo (2020). Tal trabalho propõe um sistema de medição no qual não só a fração de vazio é inferida via ultrassom, mas também a vazão da fase dispersa. Tão relevante quanto mensurar a fração de vazio é estimar a vazão da fase dispersa, visto que a mensuração da vazão de forma não invasiva, assim como sem demandar a separação prévia das fases antes da medição, propicia a realização do controle efetivo da produção pertinente ao processo no qual ocorre o escoamento bifásico.

Ante à pertinente aplicação do ultrassom para determinação de variáveis intrínsecas ao escoamento líquido-gás, o intuito desta dissertação é apresentar o desenvolvimento de uma técnica alternativa baseada em medições via ultrassom de escoamentos água-ar para a estimativa da fração de vazio e vazão da fase dispersa desses escoamentos. Posto isso, adiante encontram-se evidenciados os objetivos atrelados ao desenvolvimento dessa técnica.

## **1.2 Escopo da dissertação**

A pesquisa científica evidenciada nesta dissertação teve como objetivo desenvolver uma técnica alternativa — não invasiva e que não demande a separação prévia das fases líquida e gasosa — para estimar a fração de vazio e vazão da fase dispersa de escoamentos água-ar. O modo de operação dessa técnica foi baseado em medições via ultrassom dos escoamentos sob análise e no pertinente

processamento dos sinais de eco adquiridos. Para realizar o desenvolvimento dessa técnica, os seguintes objetivos específicos foram delimitados:

- Construir um circuito experimental para induzir escoamentos líquido-gás verticais e ascendentes;
- Implementar no circuito experimental um sistema para realizar medições via ultrassom dos escoamentos líquido-gás;
- Implementar no circuito experimental um sistema de referência para medição da fração de vazio;
- Realizar medições via ultrassom de escoamentos água-ar em condições operacionais pré-estabelecidas. Utilizar nessas medições transdutores com frequência central de 1 MHz ou 5 MHz;
- Realizar medições de pressão, temperatura, vazão de gás, vazão de líquido e fração de vazio — via sistema de referência — de escoamentos água-ar nas condições operacionais pré-estabelecidas;
- Realizar a aquisição de imagens dos escoamentos água-ar investigados para validação visual dos regimes de escoamentos obtidos;
- Propor uma metodologia para o processamento dos sinais de eco ultrassônicos oriundos das medições ultrassônicas dos escoamentos investigados.

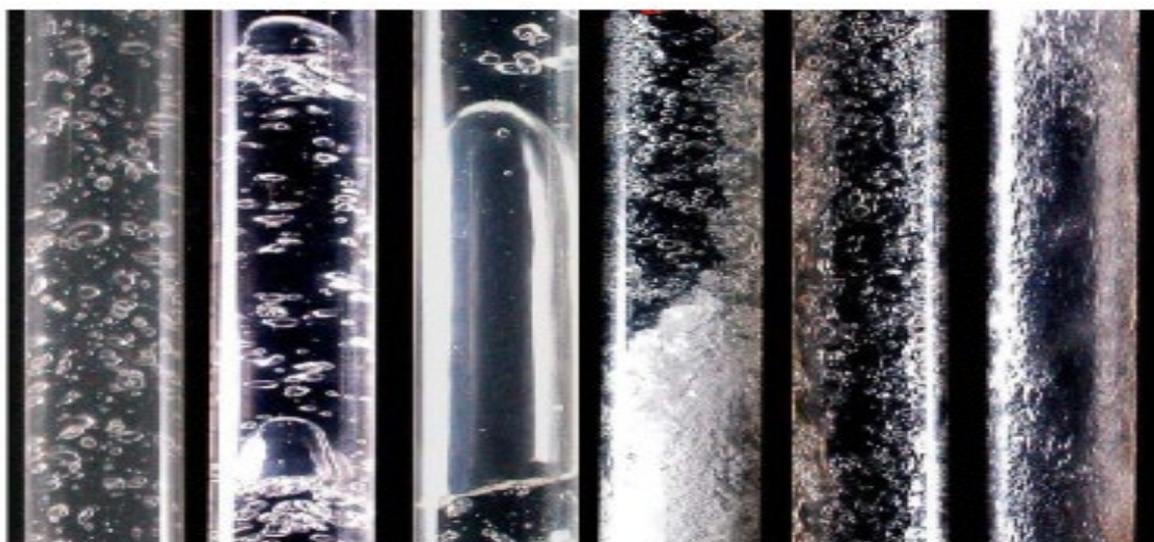
## CAPÍTULO 2 — FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O intuito deste capítulo é prover ao leitor informações fundamentais para melhor compreensão dos Capítulos 3, 4 e 5. Posto isso, encontram-se a seguir: informações básicas sobre o escoamento líquido-gás; aspectos fundamentais sobre o ultrassom; definições de parâmetros pertinentes a processamento de sinais e às definições dos parâmetros estatísticos empregados nesta dissertação.

### 2.1 Escoamento líquido-gás

Sucintamente, o escoamento líquido-gás difere do escoamento monofásico pela seguinte razão: a existência de duas fases diferentes escoando simultaneamente em uma mesma linha de transporte de fluidos. Tal escoamento concomitante das fases líquida e gasosa suscita a formação de padrões de escoamento, isto é, de distintas conformações espaciais dos fluidos no escoamento bifásico, conforme ilustra a Figura 1. Os parâmetros que delimitam a existência de um determinado padrão de escoamento são: as vazões de líquido e gás; a rugosidade, diâmetro e inclinação da linha de transporte e as propriedades físicas dos fluidos, tais como a densidade, viscosidade e tensão superficial (SHOHAM, 2006; ROSA, 2012).

**Figura 1** — Exemplos de padrões de fluxo para escoamento água-ar vertical e ascendente em tubulação. Da esquerda para direita tem-se os seguintes regimes: bolhas; capa esférica; golfadas ou pistonado; golfadas instáveis; semianular e anular



Fonte: Rosa (2012)

Os padrões de escoamento presentes na Figura 1, bem como a nomenclatura associada a eles, são uma representação significativa e adequada dos regimes de escoamento realizáveis em escoamentos líquido-gás verticais e ascendentes (ROSA,

2012). Contudo, segundo salienta Rosa (2012), a classificação presente na Figura 1 torna-se mais completa ao desmembrar o regime bolhas — objeto de estudo nesta dissertação — em mais dois padrões: o bolhas discretas e o bolhas dispersas.

O regime bolhas discretas é caracterizado pelos tamanhos variados e formas não esféricas ou distorcidas das bolhas no escoamento líquido-gás, como também pela trajetória em *zig-zag* que tais bolhas comumente realizam ao escoar (ROSA, 2012). Para tal padrão de escoamento a distribuição espacial das bolhas na seção transversal é aproximadamente homogênea (SHOHAM, 2006). Além disso, nesse padrão de fluxo as fases líquida e gasosa escorregam entre si, isto é, escoam com diferentes velocidades reais (SHOHAM, 2006). Tal escorregamento entre as fases líquida e gasosa é também encontrado nos padrões de escoamento capa esférica, pistonado, golfadas instáveis, semianular e anular — todos em exposição na Figura 1. Contudo, no bolhas dispersas a fase líquida e gasosa escoam com idêntica velocidade real, logo, há ausência de escorregamento entre as fases nesse regime de escoamento.

A ausência de escorregamento no padrão bolhas dispersas é atrelada à alta vazão da fase líquida no escoamento em comparação com a vazão de gás. Devido a isso, a fase líquida é capaz de carrear a fase gasosa e, por conseguinte, ambas as fases escoam com a mesma velocidade real. Além de ser carreada pelo líquido, a fase gasosa encontra-se dispersa e homogeneamente distribuída na fase contínua.

Além dos diversos padrões de fluxo, outra particularidade pertinente ao escoamento líquido-gás é o número de variáveis requeridas para a análise desse tipo de escoamento. Comparado ao escoamento monofásico, o número de variáveis necessárias para a investigação adequada do escoamento líquido-gás é, no mínimo, o dobro. Logo, a seguir encontram-se as definições de algumas dessas variáveis.

### **2.1.1 Variáveis e propriedades físicas de mistura atreladas ao escoamento líquido-gás**

As descrições de variáveis amplamente empregadas na análise de escoamentos líquido-gás encontram-se adiante, como também as definições de propriedades físicas de mistura atreladas a esses escoamentos. Tais variáveis e propriedades estão descritas em termos de valores médios, visto que em aplicações práticas de engenharia, tal como o monitoramento de escoamentos em linhas de transporte de fluidos, os valores médios das variáveis e propriedades físicas têm maior

aplicabilidade que os valores locais. Além disso, a hipótese de escoamento unidirecional encontra-se subentendida, dado que todas as variáveis estão descritas em notação unidimensional. Salieta-se que as informações disponíveis a seguir são adaptações de conteúdos existentes em Shoham (2006) e Rosa (2012).

- Vazão mássica total ( $W_T$ ): é decorrente da soma das vazões mássica da fase líquida e gasosa no escoamento líquido-gás, conforme expõe a Equação 1. Nessa equação,  $W_L$  designa a vazão mássica de líquido e  $W_G$  a vazão mássica de gás.

$$W_T = W_L + W_G \quad (1)$$

- Vazão volumétrica total ( $Q_T$ ): é resultante da soma das vazões volumétrica da fase líquida e gasosa no escoamento líquido-gás, conforme evidencia a Equação 2. Nessa equação,  $Q_L$  designa a vazão volumétrica de líquido e  $Q_G$  a vazão volumétrica de gás.

$$Q_T = Q_L + Q_G \quad (2)$$

- Velocidade superficial do líquido ( $V_{SL}$ ): é definida como a velocidade média que a fase líquida exibiria se escoasse sozinha na linha de transporte de fluidos. Logo, tal variável pode ser obtida mediante a razão entre a vazão volumétrica da fase líquida no escoamento líquido-gás,  $Q_L$ , e a área total da seção transversal da linha de transporte de fluidos, isto é,  $A_T$ , conforme expõe a Equação 3.

$$V_{SL} = \frac{Q_L}{A_T} \quad (3)$$

- Velocidade superficial do gás ( $V_{SG}$ ): é definida como a velocidade média que a fase gasosa exibiria se escoasse sozinha na linha de transporte de fluidos. Logo, tal variável pode ser obtida mediante a razão entre a vazão volumétrica da fase gasosa no escoamento líquido-gás,  $Q_G$ , e a área total da seção transversal da linha de transporte de fluidos, isto é,  $A_T$ , conforme evidencia a Equação 4.

$$V_{SG} = \frac{Q_G}{A_T} \quad (4)$$

- Velocidade da mistura ( $V_M$ ): é resultante da razão entre a vazão volumétrica total,  $Q_T$ , e a área total da seção transversal da linha de transporte de fluidos,  $A_T$ . Assim sendo,

também pode ser calculada mediante a soma das velocidades superficiais de líquido,  $V_{SL}$ , e de gás,  $V_{SG}$ , no escoamento bifásico, conforme expõe a Equação 5.

$$V_M = \frac{Q_T}{A_T} = V_{SL} + V_{SG} \quad (5)$$

- Fração de líquido ( $H_L$ ): é definida como a fração volumétrica média que o líquido ocupa em um determinado volume do escoamento líquido-gás.
- Fração de vazio ( $\alpha$ ): é definida como a fração volumétrica média que o gás ocupa em um determinado volume do escoamento líquido-gás. A relação entre a fração de vazio,  $\alpha$ , e a fração de líquido,  $H_L$ , encontra-se na Equação 6.

$$\alpha + H_L = 1 \quad (6)$$

- Velocidade real do líquido ( $V_L$ ): é definida como a velocidade real da fase líquida no escoamento líquido-gás. Logo, tal variável pode ser obtida mediante a razão entre a vazão volumétrica de líquido,  $Q_L$ , e a área da seção transversal da linha de transporte de fluidos ocupada apenas pela fase líquida, isto é,  $A_L$ , conforme evidencia a Equação 7. É também possível expressar a velocidade real da fase líquida,  $V_L$ , em função da sua velocidade superficial,  $V_{SL}$ , mediante o uso do conceito de fração de líquido,  $H_L$ , conforme expõe a Equação 8.

$$V_L = \frac{Q_L}{A_L} \quad (7)$$

$$V_L = \frac{V_{SL}}{H_L} \quad (8)$$

- Velocidade real do gás ( $V_G$ ): é definida como a velocidade real da fase gasosa no escoamento líquido-gás. Assim sendo, tal variável pode ser obtida mediante a razão entre a vazão volumétrica de gás,  $Q_G$ , e a área da seção transversal da linha de transporte de fluidos ocupada apenas pela fase gasosa, isto é,  $A_G$ , conforme expõe a Equação 9. É também possível expressar a velocidade real da fase gasosa,  $V_G$ , em função da sua velocidade superficial,  $V_{SG}$ , mediante o uso do conceito de fração de vazio,  $\alpha$ , conforme expõe a Equação 10.

$$V_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (9)$$

$$V_G = \frac{V_{SG}}{\alpha} \quad (10)$$

- **Densidade da mistura ( $\rho_M$ ):** é calculada mediante o uso da Equação 11, em que  $\rho_L$  e  $\rho_G$  designam as massas específicas das fases líquida e gasosa, respectivamente. A densidade da mistura,  $\rho_M$ , representa uma estimativa da densidade média do escoamento líquido-gás.

$$\rho_M = (1 - \alpha)\rho_L + \alpha\rho_G \quad (11)$$

- **Viscosidade da mistura ( $\mu_M$ ):** é calculada mediante o uso da Equação 12, em que  $\mu_L$  e  $\mu_G$  designam as viscosidades das fases líquida e gasosa, respectivamente. A viscosidade da mistura,  $\mu_M$ , representa uma estimativa da viscosidade média do escoamento líquido-gás. Contudo, em casos no qual a água não é a fase líquida do escoamento líquido-gás, correlações específicas podem ser requeridas, segundo salienta Shoham (2006).

$$\mu_M = (1 - \alpha)\mu_L + \alpha\mu_G \quad (12)$$

## 2.2 Ultrassom

A denominação ultrassom é atribuída às ondas sonoras cuja frequência de propagação encontra-se acima de 20 kHz. Ao propagarem-se em meio fluido, as ondas ultrassônicas estão suscetíveis a fenômenos de dissipação intrínsecos ao meio, tais como as dissipações devido à viscosidade, à condução térmica e às trocas moleculares (KINSLER *et al.*, 1982a). Essas dissipações atenuam a amplitude das ondas à medida que elas trafegam no meio fluido. Posto isso, encontra-se na Equação 13 a relação matemática entre a minoração da amplitude da onda e a distância percorrida por ela, no meio fluido, em relação à fonte de emissão. Nessa equação, a expressão  $A_0$  corresponde à amplitude da onda na posição inicial, o termo  $y$  designa a distância axial percorrida em relação à fonte de emissão, a expressão  $A(y)$  representa à amplitude da onda na posição  $y$  e, por fim, o termo  $\delta$  corresponde ao coeficiente de atenuação acústica.

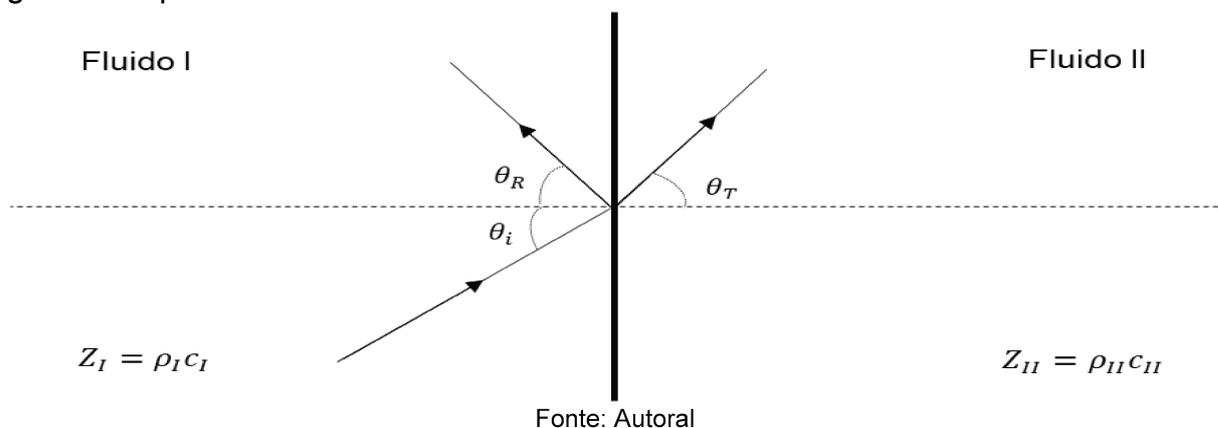
$$\frac{A(y)}{A_0} = e^{-\delta y} \quad (13)$$

O tal  $\delta$ , presente na Equação 13, é o parâmetro responsável por contabilizar a relevância de cada um dos fenômenos de dissipação intrínsecos ao meio na

atenuação da onda acústica. Ademais, há uma propriedade intrínseca à onda ultrassônica cuja quantificação é relevante para o cômputo do  $\delta$  — a frequência de propagação. Em suma, o comportamento do  $\delta$  em função da frequência da onda está descrito a seguir: para um dado meio fluido, quanto maior a frequência de propagação da onda maior será a sua atenuação ao trafegar nesse meio material (KINSLER *et al.*, 1982a).

Além dos fenômenos de dissipação intrínsecos ao meio, as ondas ultrassônicas são também suscetíveis a fenômenos de interface, tais como a difração, refração e reflexão (KINSLER *et al.*, 1982b; ZAGZEBSKI, 1996; KIM, 2010). Esses fenômenos podem ocorrer quando há interfaces, formadas pelo contato físico entre fluidos diferentes, no caminho de propagação da onda. Os parâmetros que definem a ocorrência dos fenômenos de interface são: a forma e a dimensão da interface; o ângulo de incidência da onda na interface; as velocidades de propagação da onda nos meios constituintes da interface e os valores da impedância característica desses meios. Fundamentalmente, a reflexão — fenômeno no qual baseia-se o princípio de medição ultrassônica exposto nesta dissertação — ocorre quando a interface presente no caminho de propagação da onda é formada por fluidos cujas impedâncias características são diferentes, vide Figura 2. Tal impedância característica,  $Z$ , é definida como o produto entre a densidade do meio material,  $\rho$ , e a velocidade do som nesse meio,  $c$ , conforme expõe a Equação 14 (ZAGZEBSKI, 1996).

**Figura 2** — Ideografia da incidência de uma onda ultrassônica plana em interface de geometria plana



$$Z = \rho c \quad (14)$$

O fenômeno de reflexão coexiste com a transmissão de parcela da onda incidente através da interface formada entre os meios de propagação, a menos que o

ocorra o fenômeno de reflexão total (KINSLER *et al.*, 1982b). Quando ambos os eventos coexistem, dois coeficientes podem ser calculados para avaliar o predomínio de um evento em detrimento do outro: o coeficiente de reflexão de potência —  $R_\pi$  — e o coeficiente de transmissão de potência —  $T_\pi$ . O valor do  $R_\pi$  corresponde à fração da taxa de energia da onda incidente que é refletida e, por conseguinte, o  $T_\pi$  equivale à fração da taxa de energia da onda incidente que é transmitida. Posto isso, as Equações 15 e 16 expõem as relações matemáticas para a determinação dos valores de  $R_\pi$  e  $T_\pi$ , sob a condição de geometria plana da interface na qual a onda ultrassônica plana incide, vide Figura 2. Nessas equações, as expressões  $Z_I$  e  $Z_{II}$  correspondem, respectivamente, as impedâncias características dos meios inicial e final; enquanto os termos  $\theta_i$  e  $\theta_T$  designam, respectivamente, os ângulos de incidência e transmissão.

$$R_\pi = \left[ \frac{(Z_{II}/Z_I) - \cos(\theta_T)/\cos(\theta_i)}{(Z_{II}/Z_I) + \cos(\theta_T)/\cos(\theta_i)} \right]^2 \tag{15}$$

$$T_\pi = \frac{4(Z_{II}/Z_I) \cos(\theta_T)/\cos(\theta_i)}{[(Z_{II}/Z_I) + \cos(\theta_T)/\cos(\theta_i)]^2} \tag{16}$$

Na Tabela 1 encontram-se os valores de  $R_\pi$  e  $T_\pi$  calculados mediante a seguinte idealização: incidência normal de onda ultrassônica em interface plana formada entre a água (meio inicial) e o ar (meio final). Apesar da idealização, os dados presentes na Tabela 1 indicam que parcela predominante da onda incidente pode ser refletida quando tal onda ultrassônica incide em interface água-ar. Esse tipo de interface é suscitada no escoamento simultâneo de água e ar, vide Figura 1.

**Tabela 1** — Propriedades físicas da água e do ar, assim como os coeficientes de reflexão e transmissão de potência para a situação na qual uma onda acústica plana incide perpendicularmente na interface água-ar de geometria plana

Propriedades dos fluidos						Coeficientes		
Fluido	Temp. (°C)	Pressão (Pa)	$\rho$ (kg/m³)	$c$ (m/s)	$Z$ (Pa.s/m)	Interface	$R_\pi$ (%)	$T_\pi$ (%)
Água	20	—	998	1481	1480000	Água-ar	99,89	0,11
Ar	20	1,013.10 <sup>5</sup>	1,21	343	415			

Fonte: Kinsler *et al.* (1982c)

### 2.3 Definições de parâmetros estatísticos

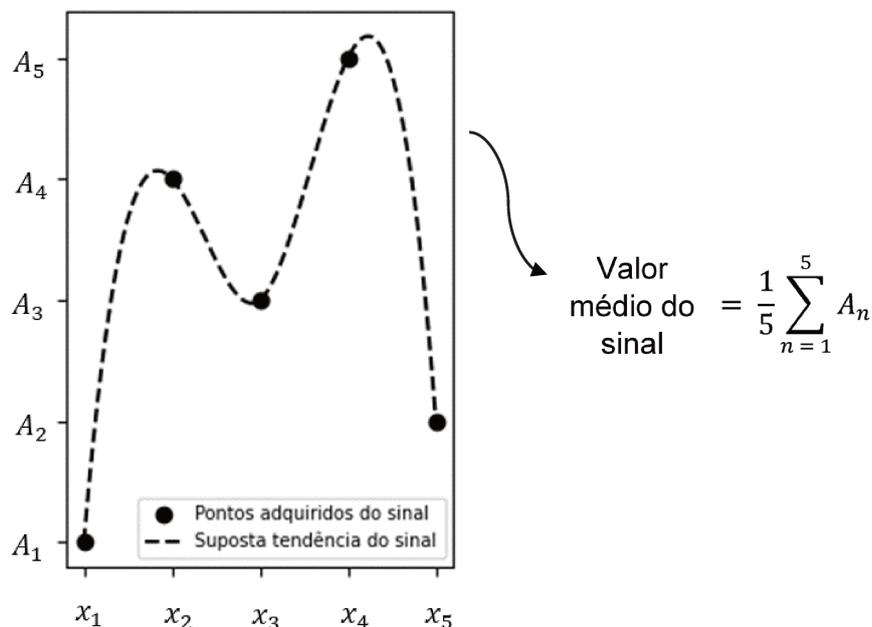
A seguir encontram-se evidenciadas as definições da média aritmética, desvio padrão amostral, erro relativo, coeficiente de determinação e do intervalo de confiança associado à média. Tais parâmetros estatísticos foram empregados na análise dos dados presentes nesta dissertação, cujas definições apresentadas correspondem a adaptações dos conteúdos presentes em Holman (2012a).

#### 2.3.1 Média aritmética

A média aritmética de um conjunto de dados com  $N$  observações é calculável por meio da Equação 17. Nessa equação, o termo  $n$  designa a  $n$ ésima observação, a expressão  $x(n)$  corresponde ao valor da  $n$ ésima observação e, por fim, a expressão  $\bar{x}$  designa a média aritmética das  $N$  observações. De modo ilustrativo, a Figura 3 expõe o procedimento de cálculo da média aritmética de um sinal discreto mediante o uso da Equação 17.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (17)$$

**Figura 3** — Exemplificação do cálculo do valor médio de um sinal discreto



Fonte: Autoral

#### 2.3.2 Desvio padrão amostral

O desvio padrão amostral de um conjunto de dados com  $N$  observações é calculável por meio da Equação 18. Nessa equação, o termo  $n$  designa a  $n$ ésima

observação, a expressão  $x(n)$  corresponde ao valor da enésima observação, o termo  $\bar{x}$  designa a média aritmética das  $N$  observações e, por fim, a expressão  $\sigma$  corresponde ao desvio padrão amostral do conjunto de dados.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{n=1}^N [x(n) - \bar{x}]^2} \quad (18)$$

### 2.3.3 Erro relativo

O erro relativo entre o valor de referência e o valor estimado de uma dada grandeza é calculável mediante o uso da Equação 19. Nessa equação, os termos  $x_{REF}$  e  $x_{EST}$  correspondem valor de referência e ao valor estimado, respectivamente.

$$\text{Erro relativo (\%)} = \left| \frac{(x_{REF} - x_{EST})}{x_{REF}} \right| 100 \quad (19)$$

### 2.3.4 Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação,  $R^2$ , é um parâmetro que quantifica a validade do modelo matemático empregado para descrever a associação entre duas variáveis aleatórias. O valor desse parâmetro varia entre 0 e 1. Quanto mais próximo da unidade for o seu pertinente  $R^2$  melhor será a capacidade do modelo empregado para descrever a relação entre as duas variáveis aleatórias. Tal coeficiente de determinação é calculável mediante o uso da Equação 20. Nessa equação, o termo  $Y(n)_{MOD}$  corresponde ao enésimo valor da variável dependente predito pelo modelo matemático, e o termo  $Y(n)_{EXP}$  designa o enésimo valor da variável dependente obtido experimentalmente. Por sua vez, a expressão  $\bar{Y}_{EXP}$  designa a média aritmética do conjunto de dados da variável dependente obtidos experimentalmente. Por fim, o termo  $N$  corresponde à quantidade de dados amostrais experimentais ou preditos pelo modelo, e o termo  $n$  designa a enésima unidade amostral.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{n=1}^N (Y(n)_{MOD} - \bar{Y}_{EXP})^2 \right]}{\left[ \sum_{n=1}^N (Y(n)_{MOD} - \bar{Y}_{EXP})^2 + \sum_{n=1}^N (Y(n)_{MOD} - Y(n)_{EXP})^2 \right]} \quad (20)$$

### 2.3.5 Intervalo de confiança associada à média

Considera-se adequado expressar o valor médio de um conjunto de medições associado com seu pertinente intervalo de confiança, conforme expõe a Equação 21.

Nessa equação, os termos  $\bar{x}$  e  $\sigma$  correspondem, respectivamente, à média aritmética e ao desvio padrão amostral, o  $t$  representa o coeficiente de Student, o termo  $n$  designa o número de medições e, por fim,  $\bar{X}$  corresponde ao valor médio associado ao seu intervalo de confiança. A Tabela 2 ilustra alguns valores de  $t$  para nível de confiança de 95%. Salienta-se que todos os valores médios descritos graficamente nesta dissertação encontram-se associados aos seus pertinentes intervalos de confiança.

$$\bar{X} = \bar{x} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (21)$$

**Tabela 2** — Valores de  $t$  de Student para nível de confiança de 95%

Graus de liberdade ( $n - 1$ )	$t$ (95%)
3	3,182
4	2,776
5	2,571
6	2,447
7	2,365
8	2,306
9	2,262
10	2,228
11	2,201

Fonte: Holman (2012a)

## 2.4 Parâmetros atrelados ao processamento de sinais

Parâmetros amplamente empregados na análise e processamento de sinais encontram-se descritos a seguir. Tais parâmetros foram utilizados nos processamentos aplicados aos sinais discutidos nesta dissertação.

### 2.4.1 Cálculo da energia de sinais discretos

A energia de um sinal discreto pode ser calculada mediante o uso da Equação 22 (WOJBOR, 2010). Nessa equação, o termo  $A(n)$  designa a amplitude do  $n$ ésimo elemento amostral do sinal, o termo  $n$  corresponde ao  $n$ ésimo elemento amostral, o termo  $N$  designa o número total de elementos amostrais no sinal e o termo  $f$  corresponde à frequência na qual o sinal sob análise foi amostrado.

$$\text{Energia de um sinal} = \sum_{n=1}^N |A(n)|^2 \frac{1}{f} \quad (22)$$

### 2.4.2 Valor RMS

O valor *RMS* de um sinal discreto corresponde à média quadrática desse sinal. Tal parâmetro é calculável por meio da Equação 23 (FLIGLIOLA; BEASLEY, 2007a). Nessa equação, o termo  $A(n)$  corresponde à amplitude da  $n$ ésima unidade amostral do sinal, o termo  $n$  designa a  $n$ ésima unidade amostral e o termo  $N$  corresponde ao número total de unidades amostrais presentes no sinal discreto, ou seja, ao número total de pontos que compõe o sinal.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |A(n)|^2} \quad (23)$$

### 2.4.3 Correlação cruzada normalizada

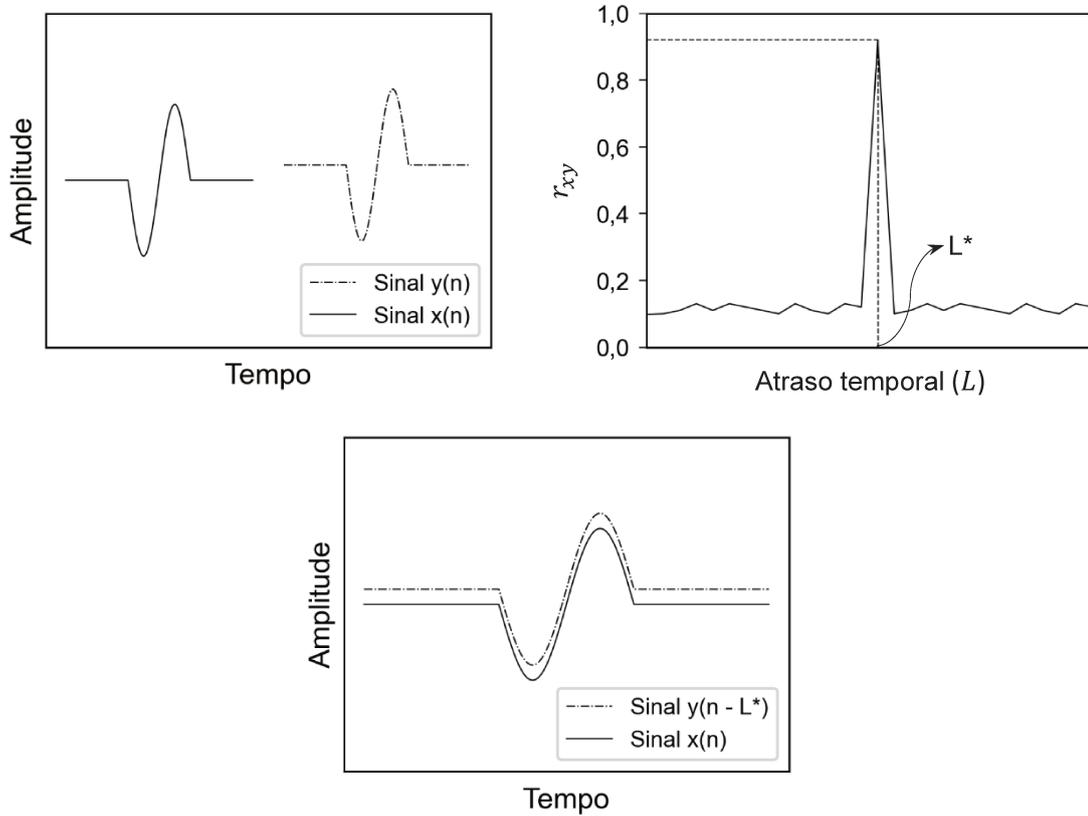
A definição matemática para a função correlação cruzada normalizada encontra-se na Equação 24 (PROAKIS; MANOLAKIS, 1996). Nessa equação, os termos  $x(n)$  e  $y(n)$  representam os sinais discretos correlacionados, e as expressões  $E_x$  e  $E_y$  correspondem aos valores de energia calculados para  $x(n)$  e  $y(n)$ , respectivamente. Além disso, os termos  $n$  e  $N$  designam, respectivamente, a  $n$ ésima unidade amostral de  $x(n)$  ou  $y(n)$  e o número total de unidades amostrais que compõem cada um desses sinais. Por fim, o índice  $L$  representa o deslocamento ou atraso temporal entre os sinais  $x(n)$  e  $y(n)$ .

$$r_{xy}(L) = \frac{1}{\sqrt{E_x E_y}} \sum_{n=1}^N x(n)y(n-L), \text{ em que } L = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots N \quad (24)$$

A função  $r_{xy}(L)$  é amplamente empregada em processamento de sinais para avaliar tanto a similaridade entre dois sinais quanto a existência de um possível atraso temporal entre eles. Em suma, se os sinais  $x(n)$  e  $y(n)$  são oriundos de uma mesma fonte, contudo, foram obtidos com um atraso temporal, o valor de  $L$  que resulta no máximo valor de  $r_{xy}(L)$  corresponde ao deslocamento que aplicado à  $y(n)$  decorre no

maior grau de similaridade com o sinal  $x(n)$ . A Figura 4 exemplifica a aplicação da função de correlação cruzada normalizada a dois sinais defasados temporalmente.

**Figura 4** — Função correlação cruzada normalizada atrelada a dois sinais similares, contudo, defasados temporalmente



Fonte: Autoral

### CAPÍTULO 3 — REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contém uma breve revisão sobre os trabalhos científicos nos quais técnicas baseadas em medições ultrassônicas foram utilizadas com o objetivo de determinar a fração de vazio, assim como a vazão da fase dispersa do regime bolhas em escoamento líquido-gás. Segundo tais trabalhos científicos, duas formas de utilização do ultrassom são comumente empregadas para a determinação da fração de vazio: o modo pulso-eco e o modo transmissão. No modo pulso-eco, o transdutor ultrassônico que emite as ondas acústicas nos escoamentos é também o dispositivo responsável pela recepção dos sinais de eco. Por sua vez, o modo transmissão consiste na emissão da onda por um transdutor-emissor, tais ondas trafegam através do escoamento e, então, são captadas por um transdutor-receptor. Tais modos de aplicação dos transdutores ultrassônicos foram utilizados e analisados no trabalho desenvolvido por Carvalho *et al.* (2009).

Carvalho *et al.* (2009) aplicou tanto o modo pulso-eco quanto o modo transmissão para investigar a relação entre a fração de vazio e a atenuação da amplitude da onda ultrassônica propagada no escoamento água-ar. Tal atenuação na amplitude da onda foi inferida mediante o uso da variável ultrassônica razão de energia, e os valores de referência da variável hidrodinâmica fração de vazio foram mensurados via sistema de fechamento rápido de válvulas. A razão de energia é definida como o quociente entre a energia do sinal captado pelo transdutor, após a emissão do pulso ultrassônico no escoamento bifásico, e a energia do sinal de referência, isto é, a energia do sinal captado pelo transdutor quando o escoamento é monofásico. Para o padrão bolhas discretas, as medições no modo pulso-eco e no modo transmissão indicaram que é possível relacionar a fração de vazio e a variável ultrassônica razão de energia. Para tal padrão de escoamento, a faixa da variável hidrodinâmica averiguada experimentalmente foi de 0–8%. Apesar das relações estabelecidas entre a variável hidrodinâmica e a variável ultrassônica, salienta-se que a razão de energia é computável apenas mediante o uso de um sinal de referência. Por fim, destaca-se que os escoamentos água-ar investigados no trabalho em discussão foram induzidos em tubulação de 54 mm, na direção vertical e de forma ascendente.

No mesmo ano de publicação do trabalho científico supracitado, Chakraborty *et al.* (2009) divulgaram os resultados referentes à aplicação de uma técnica de medição de fração de vazio baseada no processamento dos sinais de eco ultrassônico

via filtro dinâmico simbólico (*Symbolic Dynamic Filter* — SDF). Tal filtro é um método estatístico empregado para reconhecimento de padrões em sistemas dinâmicos. Para cada condição de escoamento investigada, o processamento dos sinais de eco via SDF resultou em uma grandeza escalar denominada medida do escoamento (*flow measure*). Em suma, tal grandeza quantifica o desvio entre o padrão estatístico de referência — que representa o comportamento dinâmico do sistema investigado na condição definida como a referência — e o padrão estatístico do sistema dinâmico na condição sob investigação. Os resultados evidenciam que é possível relacionar a fração de vazio com a grandeza *flow measure*. Para viabilizar a análise da relação entre essas variáveis, os valores de referência da variável hidrodinâmica fração de vazio foram mensurados via sonda de condutividade, e tais mensurações foram realizadas simultaneamente às medições via ultrassom no modo pulso-eco. Assim como no trabalho científico desenvolvido por Carvalho *et al.* (2009), a variável atrelada aos sinais de ultrassom — *flow measure* — é computável apenas mediante a aquisição do sinal de referência. Tal sinal de referência foi também mensurado para condição na qual é nula a vazão nominal de gás no escoamento bifásico. Ademais, destaca-se que os escoamentos líquido-gás atrelados ao trabalho em discussão foram induzidos na direção vertical e de forma ascendente em tubulação de acrílico com 50 mm de diâmetro interno, bem como a faixa de fração de vazio averiguada para o padrão bolhas foi de 0–14%.

Alguns anos mais tarde em relação ao trabalho discutido acima, Gong *et al.* (2016) publicaram os resultados referentes à determinação da fração de vazio mediante o uso de um modelo teórico-experimental. Nesse modelo, a minoração na amplitude da onda ao trafegar no caminho de propagação, isto é,  $A/A_0$  — ver Seção 2.2 —, é relacionada de forma explícita com a fração de vazio presente na condição de escoamento bifásico sob investigação. A existência de tal relação explícita é plausível, contudo, apenas sob determinadas condições, conforme evidenciam Waristo *et al.* (1999), assim como Stravs e Stockar (1985). Para garantir a viabilidade de aplicação de tal relação, Gong *et al.* (2016) assumem que a atenuação intrínseca ao meio devido à fase contínua é desprezível nas condições investigadas experimentalmente. Além disso, nas investigações experimentais os transdutores ultrassônicos foram colocados em contato direto com tal fase contínua para, desse modo, dirimir a atenuação adicional que sucederia nos pulsos ultrassônicos caso os

transdutores fossem colocados em contato direto com a parede da tubulação. Sob esse contexto, os coeficientes do modelo teórico-experimental foram determinados pelo ajuste de curva entre os valores de fração de vazio de referência — mensurados via sistema de fechamento rápido de válvulas — e os valores de  $A/A_0$ , obtidos mediante a realização de medições ultrassônicas no modo transmissão. A performance do modelo teórico-experimental foi averiguada, e os resultados indicam que as estimativas de fração de vazio mediante o uso desse modelo decorreram em 10% de média absoluta do erro relativo. Ressalta-se que para aplicação de tal técnica de medição as aquisições via ultrassom devem ser realizadas de forma invasiva — imposição que minimiza o potencial de aplicação dessa técnica em processos contínuos de monitoramento e controle de escoamentos líquido-gás. Ademais, a atenuação devido à fase contínua deve ser desprezível. Tal necessidade restringe a aplicação do modelo a fluidos e condições restritas. Por fim, destaca-se que os escoamentos líquido-gás atrelados ao trabalho sob discussão foram induzidos na direção vertical e de forma ascendente em tubulação de acrílico com 20 mm de diâmetro interno e, além disso, a faixa de fração de vazio averiguada para o padrão bolhas foi de 0–30%.

Na mesma época do trabalho discutido no parágrafo anterior, Figueiredo *et al.* (2016a) divulgaram os resultados referentes à determinação da fração de vazio via rede neural artificial (RNA) alimentada com medidas via ultrassom de escoamentos multifásicos (óleo-ar-água-areia). A rede neural desenvolvida é caracterizada por quatro entradas e uma saída. O número de entradas da RNA tem relação direta com instrumentação ultrassônica empregada, visto que foram utilizados quatro transdutores ultrassônicos distribuídos radialmente na seção transversal da tubulação. Um desses sensores foi configurado como emissor-receptor e os demais apenas como receptores. Assim sendo, medições via ultrassom tanto no modo pulso-eco quanto no modo transmissão foram realizadas. Similarmente ao realizado por Carvalho *et al.* (2009), a atenuação dos pulsos ultrassônicos propagados no escoamento foi inferida mediante o uso da variável ultrassônica razão de energia. Posto isso, no treinamento da RNA desenvolvida por Figueiredo *et al.* (2016a), cada entrada da RNA foi alimentada com os valores de razão de energia calculados para os sinais adquiridos em cada transdutor ultrassônico distribuído radialmente na seção transversal da tubulação. Por sua vez, os dados de saída da RNA empregados no

treinamento dessa máquina de aprendizagem foram os valores de fração de vazio mensurados via sistema de fechamento rápido de válvulas. Mediante o acoplamento da RNA com medições via ultrassom dos escoamentos foi possível prever os valores de fração de vazio dos regimes de escoamento bolhas, capa esférica, golfadas, golfadas instáveis e anular. Quanto à predição da fração de gás livre para o regime bolhas, os resultados indicam que 2% foi a máxima variação entre o valor predito pela RNA e o valor de referência. Salienta-se que para tal regime de escoamento a faixa de fração de gás livre averiguada foi de 0–5%. A técnica de medição proposta por Figueiredo *et al.* (2016) demanda a utilização de quatro transdutores ultrassônicos. Essa quantidade de transdutores é, no mínimo, o dobro daquela empregada nos trabalhos desenvolvidos por Chakraborty *et al.* (2009) e Gong *et al.* (2016). Por fim, salienta-se que a variável ultrassônica empregada como entrada da RNA possui a mesma desvantagem daquelas variáveis propostas por Carvalho *et al.* (2009) e Chakraborty *et al.* (2016), isto é, são apenas calculáveis mediante o uso de um sinal de referência.

Recentemente, Figueiredo (2020) publicou os resultados referentes à determinação da fração de vazio e vazão da fase dispersa de escoamentos água-ar mediante o uso de ultrassom. Nesse trabalho, transdutores ultrassônicos com frequência central de 2,25 MHz foram empregados no modo pulso-eco para a realização de medições via ultrassom dos escoamentos bifásicos. Os padrões de fluxo agitante, pistonado e bolhas foram investigados no estudo desenvolvido por Figueiredo (2020). Quanto à determinação da fração de gás livre do padrão de escoamento bolhas, a técnica desenvolvida requer a criação de uma função para estimativa da fração de vazio. Tal função é construída mediante o ajuste de curva à relação estabelecida entre as frações de vazio de referência e a média dos sinais de energia dos ecos. O desempenho dessa função quanto à estimativa da fração de vazio foi averiguado, e o valor de 20% foi o maior desvio obtido entre os valores estimados e os valores de referência. Além disso, os valores de desvio da referência enquadraram-se predominantemente entre 3–9%. Quanto à estimativa da vazão de gás para o padrão bolhas, a técnica desenvolvida por Figueiredo (2020) baseia-se na correlação cruzada entre sinais de energia dos ecos defasados no tempo, contudo, oriundos da mesma fonte. Segundo sugere esse pesquisador, a correlação entre tais sinais fornece uma estimativa da velocidade média das bolhas no escoamento

bifásico. Assim sendo, com os valores da velocidade, área da seção transversal da tubulação e da fração de vazio — determinado via função de ajuste — foi possível estimar a vazão da fase dispersa. A aplicação da técnica, ora comentada, resultou em estimativas de vazão gás subestimadas em relação aos valores de referência, cujo maior valor de desvio da referência foi de 37%. A faixa de vazão de gás suscetível à mensuração pela técnica proposta por Figueiredo (2020) foi de 51–255 L/min. Por sua vez, a faixa de fração de vazio averiguada para o padrão bolhas foi de 7–30%.

Ao analisar os trabalhos previamente evidenciados, é perceptível a existência de uma busca contínua por técnicas baseadas em ultrassom que sejam capazes de estimar a fração de vazio e, assim como evidenciou Figueiredo (2020), a vazão da fase dispersa de escoamentos líquido-gás no regime bolhas. É observável que os trabalhos apresentados estabelecem relações entre a variável hidrodinâmica fração de vazio e variáveis atreladas às medições com ultrassom que permitem inferir alterações na amplitude dos pulsos ultrassônicos propagados nos escoamentos líquido-gás. Contudo, para desenvolver a maioria dessas variáveis ultrassônicas é necessário obter um sinal ou parâmetro ultrassônico de referência previamente à investigação do escoamento bifásico.

Diante do exposto, nos capítulos que seguem encontra-se explicitado o desenvolvimento de uma técnica baseada em medições ultrassônicas — no modo pulso-eco — para a estimativa da fração de vazio e vazão da fase dispersa de escoamentos água-ar no regime bolhas. As medições via ultrassom dos escoamentos foram realizadas com transdutores de 1 ou 5 MHz. As faixas de fração de vazio e vazão nominal da fase dispersa exploradas foram, respectivamente, 0–13% e 0,5–5 L/min.

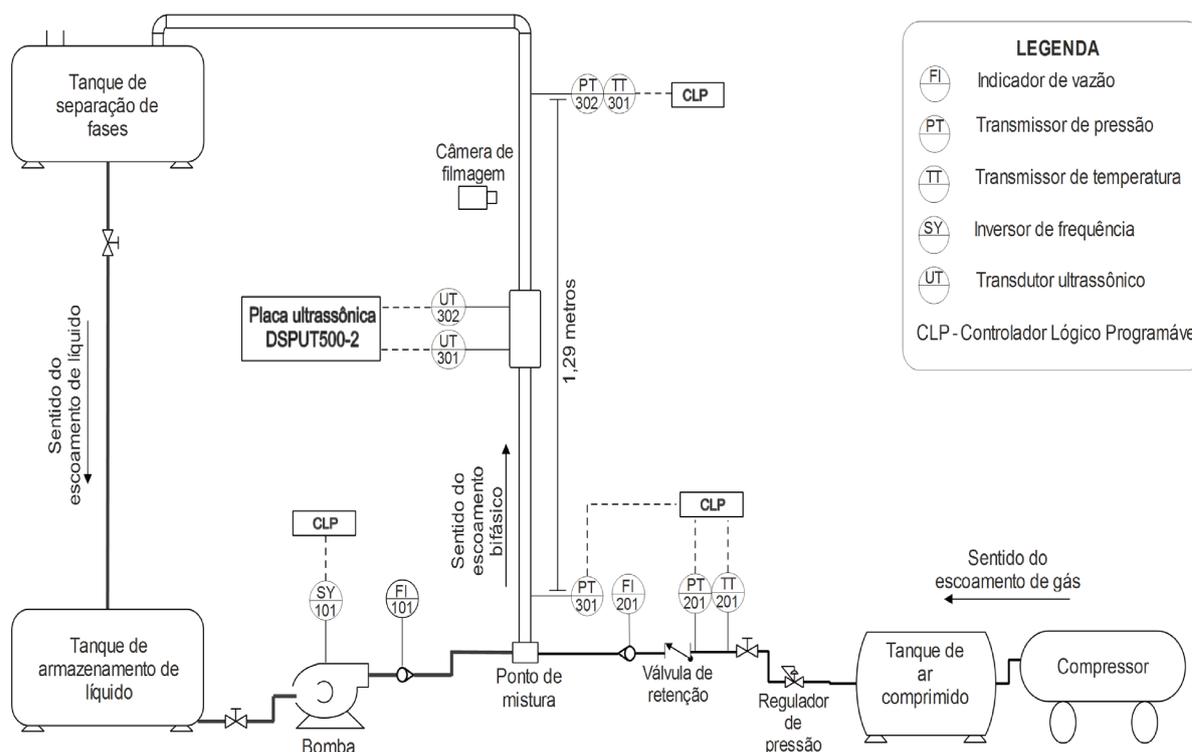
## CAPÍTULO 4 — METODOLOGIA

Este capítulo descreve: o circuito experimental no qual foram induzidos os escoamentos água-ar verticais e ascendentes investigados experimentalmente; o sistema para medição de sinais de eco ultrassônico empregado nas mensurações via ultrassom dos escoamentos bifásicos; o sistema para medição de fração de vazio utilizado como referência na determinação quantitativa da fração de gás presente nos escoamentos estudados; o planejamento experimental; o procedimento experimental e o processamento aplicado aos sinais de eco ultrassônico.

### 4.1 Circuito experimental

A Figura 5 ilustra a montagem experimental onde foram desenvolvidos os experimentos com escoamentos água-ar verticais e ascendentes. Tal circuito foi constituído, basicamente, por três linhas de transporte de fluidos. Uma dessas linhas foi destinada à fase gasosa, outra à fase líquida e, por fim, uma para os escoamentos líquido-gás. A montagem experimental foi construída no Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP), situado na Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

**Figura 5** — Circuito experimental utilizado na investigação de escoamentos água-ar verticais e ascendentes



A linha para transporte de gás foi alimentada por um conjunto formado por compressor e tanque de ar comprimido. A pressão na entrada dessa linha foi controlada por um regulador de pressão e o valor de 500 kPa foi estabelecido como o padrão de entrada. O ar comprimido foi direcionado do ponto de entrada da linha de gás ao ponto de mistura por mangueira pneumática, com diâmetro interno de 8 mm, e foi injetado nesse último ponto mediante o uso de pedra porosa. Tal linha de gás foi instrumentada com sensores de pressão (PT-201) e temperatura (TT-201) para determinação adequada das propriedades físicas da fase gasosa, rotâmetro para mensurar a vazão volumétrica de ar (FI-201), válvula de retenção de líquido e válvula de bloqueio.

Por sua vez, a linha para transporte de líquido foi alimentada por um tanque contendo água. Tal fase fluida foi bombeada do tanque de armazenamento de líquido ao ponto de mistura através de tubulação de PVC com diâmetro interno de 25,4 mm. A vazão volumétrica de líquido bombeado foi mensurada por rotâmetro (FI-101). O controle da vazão de líquido foi realizado via inversor de frequência (SY-101), pois mediante o uso desse dispositivo foi possível variar a rotação da bomba de água.

Quanto à linha bifásica, sua estrutura — destinada aos escoamentos líquido-gás — foi estabelecida após o ponto de mistura. Essa linha de transporte foi posicionada de modo perpendicular ao piso térreo do laboratório e, desse modo, possibilitou a formação de escoamentos verticais e ascendentes. Tal estrutura foi montada com tubulação de acrílico cristal de 2,90 m de comprimento e 52,5 mm de diâmetro interno. A utilização de tubulação transparente viabilizou a filmagem e a classificação visual dos escoamentos. A distância vertical da linha bifásica foi limitada ao valor usado devido à combinação dos fatores espaço disponível e viabilidade de montagem; e o diâmetro da tubulação foi restringido ao valor adotado em razão das dimensões do carretel ultrassônico — aparato que viabilizou a emissão de ondas acústicas nos escoamentos e a recepção dos ecos ultrassônicos. Tal carretel foi instalado a doze diâmetros de distância do ponto de mistura.

Conforme expõe a Figura 5, a extremidade final da linha bifásica vertical foi desviada para um tanque de separação de fases, e tal reservatório foi instalado no piso do 1º andar do LCAP. A linha destinada aos escoamentos líquido-gás foi instrumentada com sensores de temperatura (TT-301) e pressão (PT-301 e PT-302) para determinação adequada das propriedades físicas dos fluidos. Tais sensores de

pressão também foram utilizados pelo sistema definido como a referência para a medição experimental da fração de vazio dos escoamentos estudados experimentalmente. De modo ilustrativo, a Figura 6 corresponde à foto da estrutura construída para estudo de escoamentos líquido-gás verticais e ascendentes.

**Figura 6** — Linha vertical de transporte de fluidos destinada aos escoamentos água-ar averiguados experimentalmente



Fonte: Autoral

Imagens dos elementos constituintes do circuito experimental encontram-se disponíveis no Apêndice A. Além disso, a Tabela 3 contém descrições dos instrumentos, equipamentos e acessórios utilizados na montagem experimental, com exceção daqueles empregados no sistema dedicado à aquisição de sinais de eco ultrassônico. Tanto esse sistema quanto o sistema para medição de fração de vazio utilizado como referência estão detalhados adiante neste documento. Tais sistemas foram imprescindíveis para o desenvolvimento desta dissertação.

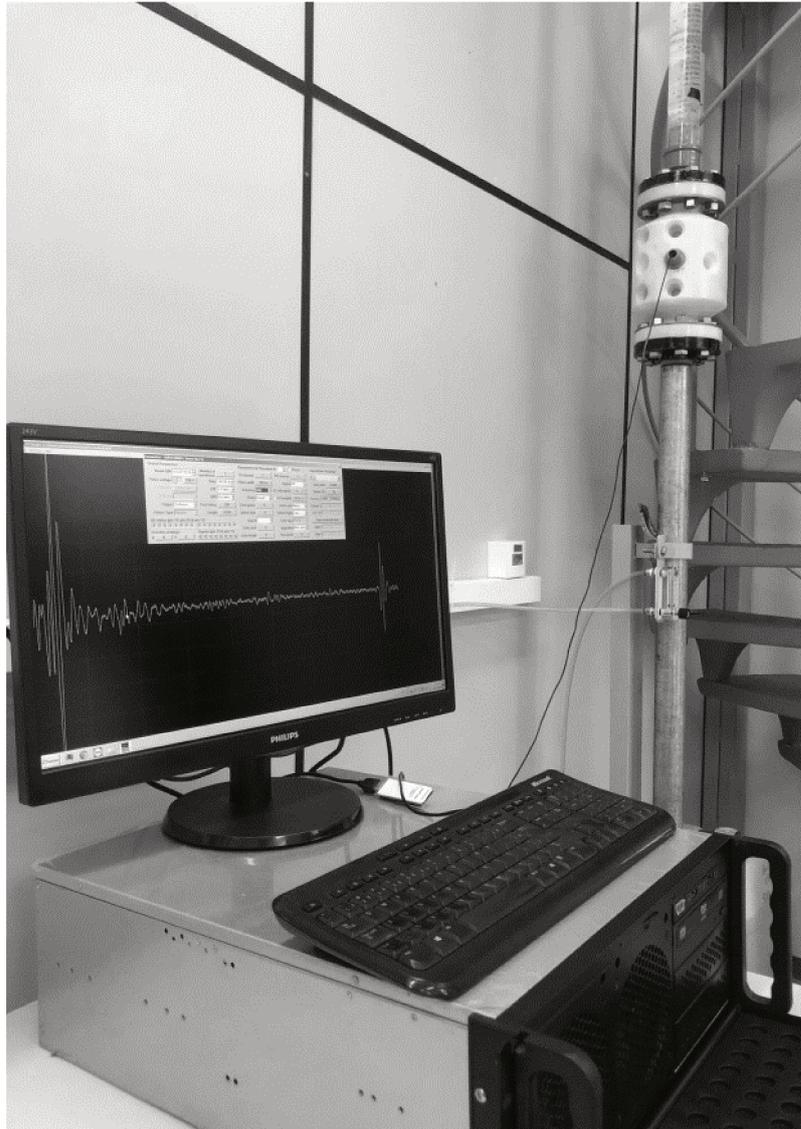
**Tabela 3** — Lista detalhada dos instrumentos, equipamentos e acessórios utilizados no circuito experimental

Item	Descrição
Bomba	Motobomba centrífuga de 01 estágio; Fabricante KSB; Modelo <i>Hydrobloc</i> MA302.
Inversor de frequência (SY-101)	Fabricante DELTA; modelo VFD; potência máxima de 5 HP.
Transmissor de pressão (PT-201)	Fabricante ZÜRICH; modelo PSI-420 3A 12B; faixa de medição de 0 até 400 kPa.
Transmissor de pressão (PT-301)	Fabricante SMAR; modelo LD300; faixa de medição de 0 até 50 kPa.
Transmissor de pressão (PT-302)	Fabricante ZÜRICH; modelo PSI-420 3A 12B; faixa de medição de 0 até 50 kPa.
Transmissor de temperatura (TT-201 e TT-301)	Fabricante NOVUS; sensor tipo PT100; faixa de medição de 0 até 50°C.
Rotâmetro para líquido (FI-101)	Faixa de medição de vazão de 8 até 38 L/min.
Rotâmetro para gás (FI-201)	Fabricante LZT; modelo M-6; faixa de medição de vazão de 0 até 5 L/min.
Regulador de pressão	Fabricante FESTO; modelo MS6; faixa de medição de 0 até 1600 kPa.
CLP	Fabricante HI TECNOLOGIA; Modelo P7C; Módulo AIO 574 com 08 entradas de 4–20 mA e 02 saídas de 4–20 mA.
Câmera de filmagem	Fabricante CANON; modelo EOS Rebel T6.
Compressor	Fabricante SCHULZ; modelo MAX MSV 40/350; pressão máxima de 1200 kPa; vazão máxima de 1133 L/min; potência máxima de 10 HP.
Tanques	Capacidade de 250 litros.
Acessórios	Tubos, conexões, válvulas e mangueiras.

#### 4.1.1 Sistema para medição de sinais de eco ultrassônico

O sistema para medição de sinais de eco ultrassônico empregado nas investigações experimentais foi composto basicamente pelos seguintes itens: carretel ultrassônico, transdutores ultrassônicos e placa de aquisição ultrassônica devidamente instalada em computador industrial. A Figura 7 ilustra como tais itens foram estruturados no circuito experimental.

**Figura 7** — Sistema para medição de sinais de eco ultrassônico

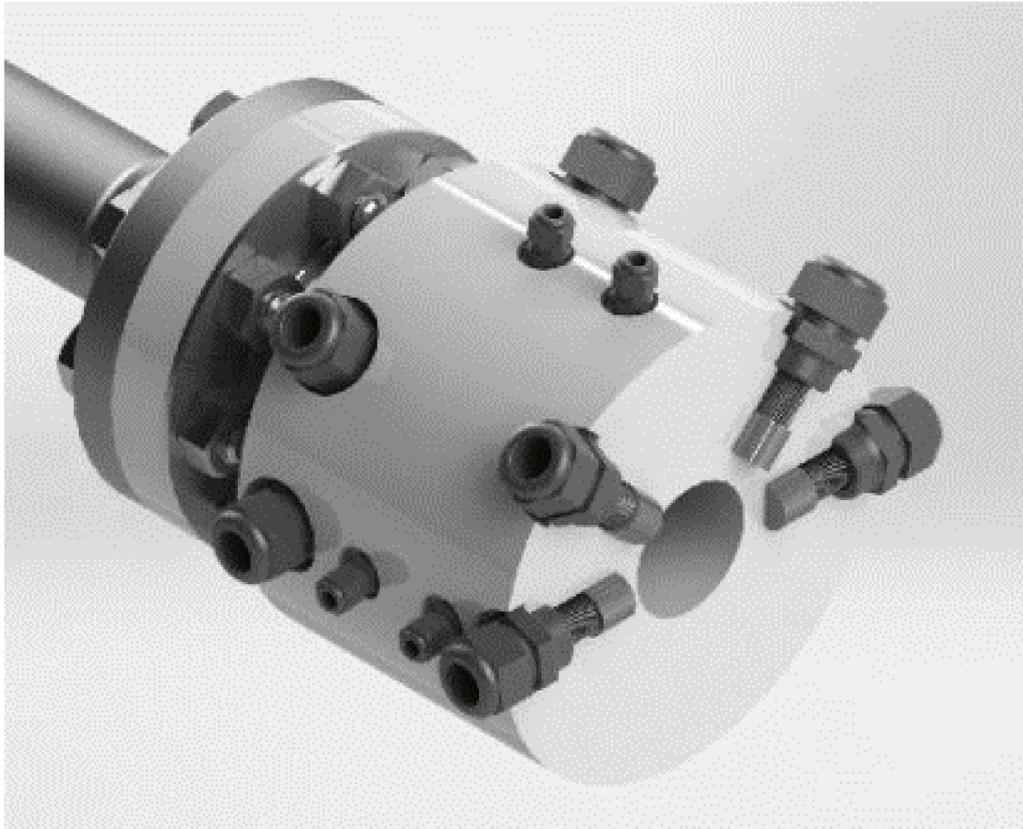


Fonte: Autoral

O carretel ultrassônico, vide Figura 8, foi a estrutura responsável por acomodar os transdutores ultrassônicos e, por conseguinte, viabilizar a tais dispositivos tanto a emissão de ondas acústicas nos escoamentos água-ar quanto a recepção dos ecos ultrassônicos. Essa estrutura foi instalada de modo não intrusivo na tubulação onde

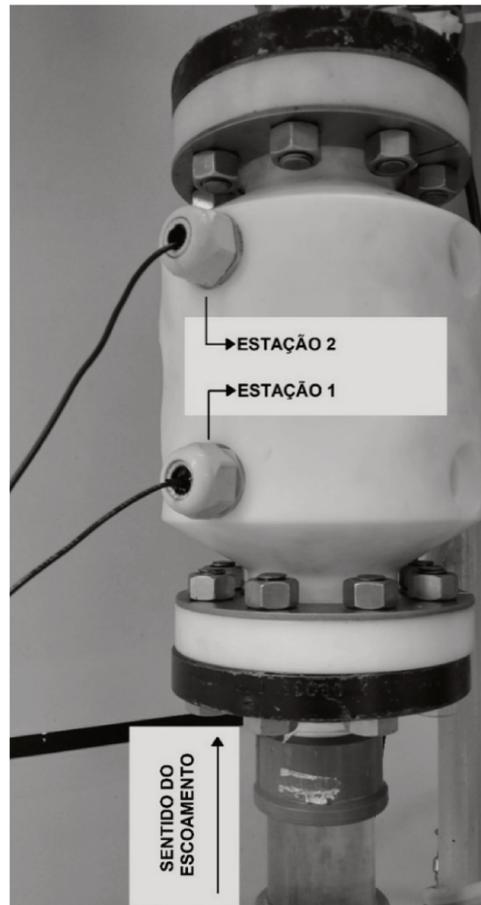
foram induzidos os escoamentos água-ar averiguados experimentalmente, conforme evidencia a Figura 7. O protótipo, ora descrito, foi desenvolvido previamente por Figueiredo (2016b). Tal aparato possui as seguintes características: composição de poliacetal Delrin® 100PNC010, diâmetro interno de 52,5 mm, linha de atraso de 10 mm e duas estações de medição via ultrassom alinhadas e espaçadas em 110 mm.

**Figura 8** — Modelo tridimensional do carretel ultrassônico



Fonte: Figueiredo (2016b)

A existência no carretel de duas estações de medição intervaladas possibilitou o uso simultâneo de dois transdutores ultrassônicos com idêntica frequência central nominal nas investigações experimentais realizadas. Estruturalmente, cada estação de medição comporta até quatro transdutores distribuídos radialmente no carretel. Contudo, apesar da disponibilidade de vários pontos de acomodação de transdutores, os experimentos foram realizados mediante o uso de apenas um ponto por estação de medição, conforme ilustra a Figura 9. Doravante, a expressão estação 1 será atrelada ao primeiro ponto de medição no carretel e, por conseguinte, a expressão estação 2 ao segundo ponto de medição.

**Figura 9** — Distribuição espacial das estações de medição ultrassônica no carretel

Fonte: Autoral

Em ambas as estações de medição os transdutores ultrassônicos foram fixados com o auxílio de prensa cabo e mola, conforme ilustra a Figura 10. Ademais, vaselina foi usada para obtenção de acoplamento acústico adequado entre a interface plana do transdutor e a interface plana do carretel. Estruturalmente, são de idêntica geometria todos os transdutores utilizados nos experimentos. Assim sendo, o formato desses transdutores encontra-se na Figura 11.

**Figura 10** — Sequenciamento de peças para fixação do transdutor no carretel ultrassônico

Fonte: Autoral

**Figura 11** — Formato dos transdutores ultrassônicos usados nas medições via ultrassom dos escoamentos líquido-gás investigados



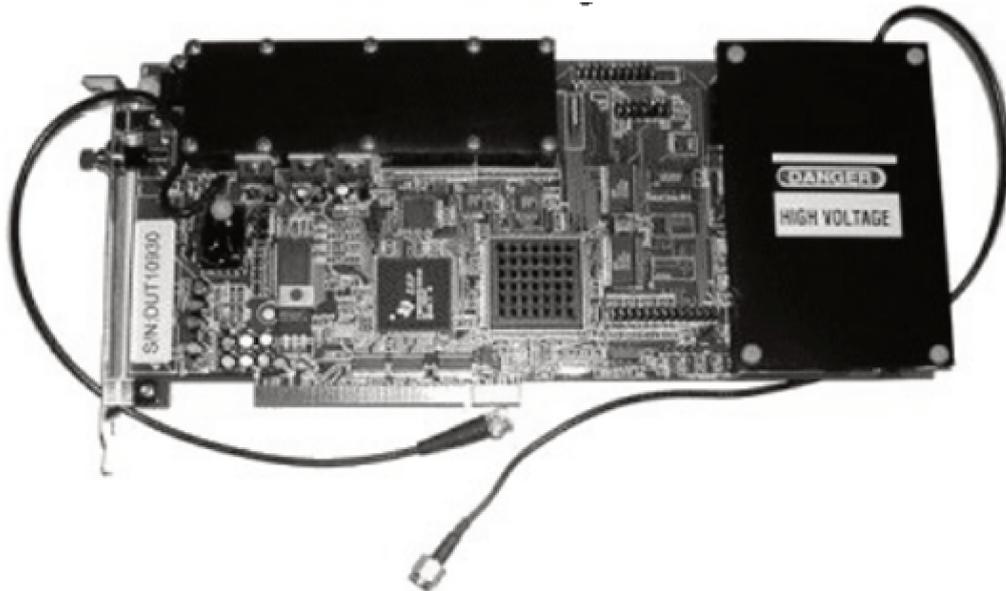
Fonte: Autoral

Embora de geometria idêntica, pares de transdutores com diferentes frequências centrais foram utilizados nas medições via ultrassom dos escoamentos água-ar. Para a realização dessas medições, um par de transdutores com 1 ou 5 MHz de frequência central foi devidamente instalado no carretel ultrassônico. O uso dessas distintas frequências centrais viabilizou a verificação da influência desse parâmetro na estimativa da fração de vazio, assim como na estimativa da vazão de gás dos escoamentos investigados. Segundo o fabricante Olympus®, os transdutores ultrassônicos utilizados nos experimentos são caracterizados pela boa resolução axial, bem como por proeminentes relações sinal/ruído em materiais atenuantes (OLYMPUS, 2010). Informações adicionais sobre esses dispositivos encontram-se no Anexo A, o qual contém os formulários padrão fornecidos pelo fabricante dos transdutores ultrassônicos.

Os transdutores ultrassônicos, ora apresentados, foram os dispositivos responsáveis pela conversão dos pulsos elétricos em pulsos ultrassônicos, bem como pela emissão dessas ondas acústicas nos escoamentos líquidos-gás investigados experimentalmente. Tais pulsos elétricos, gerados pela placa de aquisição ultrassônica, foram transmitidos aos transdutores via cabos elétricos. Além da emissão, os transdutores também realizaram a recepção dos ecos oriundos das reflexões dos pulsos ultrassônicos nas interfaces existentes no caminho de propagação, assim como os converteram em pulsos elétricos e transmitiram esses pulsos para a placa de aquisição ultrassônica, cuja função também contempla a recepção de pulsos elétricos e sua digitalização mediante seu inerente conversor

analógico/digital. Conforme ilustra a Figura 12, a placa de aquisição ultrassônica forneceu dois canais independentes de emissão/recepção de pulsos e, dessa forma, possibilitou a execução, no modo pulso-eco, de duas medições ultrassônicas simultâneas com transdutores de idêntica frequência central nominal em cada experimento realizado.

**Figura 12** — Imagem da placa de aquisição ultrassônica empregada no sistema para medição de sinais de eco ultrassônico



A placa de aquisição ultrassônica DSPUT5000-2, desenvolvida pela USUltratek, foi o modelo utilizado no sistema de medição ora descrito, vide Figura 12. Tal placa foi devidamente instalada em computador industrial, o qual foi equipado com processador intel core i5, 4 GB de memória ram e Windows 7 com 32 bits. O computador industrial foi totalmente dedicado ao controle operacional da placa. Para a realização desse controle foi utilizada uma API, isto é, uma interface de programação de aplicativos. Essa API viabilizou a configuração dos parâmetros de aquisição ultrassônica, bem como a coleta dos dados ultrassônicos adquiridos pela placa após a realização de cada teste experimental. De modo sucinto, o usuário configurava os parâmetros de aquisição ultrassônica da placa via código em linguagem Python, assim como coletava em Python os dados ultrassônicos adquiridos pela placa de aquisição ultrassônica. As Tabelas 4 e 5 ilustram as configurações adotadas para os parâmetros de aquisição referentes às medições com os transdutores de 1 e 5 MHz, respectivamente.

**Tabela 4** — Configuração da placa para as aquisições ultrassônicas com os transdutores de 1 MHz

Parâmetro	Valor adotado
Largura do pulso (ns)	500
Frequência de amostragem de dados (MHz)	25
Número de pontos em cada sinal de eco amostrado (pontos amostrais)	976
Frequência de repetição do pulso (kHz)	2
Número de pulsos emitidos por medição ultrassônica	60000
Tempo silencioso (pontos amostrais)	170
Amortecimento (ohms)	620
Filtro passa-alta (MHz)	0,6
Filtro passa-baixa (MHz)	5,9
Ganho (dB)	50

Fonte: Autoral

**Tabela 5** — Configuração da placa para as aquisições ultrassônicas com os transdutores de 5 MHz

Parâmetro	Valor adotado
Largura do pulso (ns)	100
Frequência de amostragem de dados (MHz)	25
Número de pontos em cada sinal de eco amostrado (pontos amostrais)	976
Frequência de repetição do pulso (kHz)	2
Número de pulsos emitidos por medição ultrassônica	60000
Tempo silencioso (pontos amostrais)	170
Amortecimento (ohms)	620
Filtro passa-alta (MHz)	0,6
Filtro passa-baixa (MHz)	8,8
Ganho (dB)	62

Fonte: Autoral

Os valores dos parâmetros de aquisição presentes nas Tabelas 4 e 5 foram selecionados com base nos fundamentos sobre amostragem de sinais em combinação com as orientações técnicas dos fabricantes da placa de aquisição e dos transdutores ultrassônicos. Além disso, medições ultrassônicas preliminares dos escoamentos foram realizadas com ambas as frequências centrais, isto é, 1 e 5 MHz, e, desse modo, foi possível analisar previamente o efeito dos parâmetros de aquisição nos sinais adquiridos. Assim sendo, em relação ao parâmetro frequência de amostragem de dados, a escolha do valor de 25 MHz atendeu ao teorema de Nyquist: a frequência de amostragem do sinal deve ser no mínimo o dobro do maior conteúdo de frequência do sinal amostrado (FIGLIOLA; BEASLEY, 2007b; HOLMAN, 2012b). Tal fato é verificável mediante a análise dos formulários padrão dos transdutores utilizados, vide Anexo A. Ademais, o uso dessa frequência de amostragem resultou em discretização satisfatória dos sinais de eco, conforme observado em análises preliminares.

Quanto à frequência de repetição do pulso ultrassônico — 2 kHz — e ao número de pulsos emitidos por medição ultrassônica — 60000 —, tais parâmetros foram definidos sob a consideração dos seguintes fatores: tempo de amostragem adequado para a aquisição de sinais representativos dos escoamentos água-ar estudados; máxima velocidade da fase dispersa realizável na montagem experimental; capacidade de armazenamento de dados do computador industrial. Devido à configuração adotada para os parâmetros de aquisição em discussão neste parágrafo, o produto direto de cada medição ultrassônica dos escoamentos foi a aquisição de 60000 sinais de eco ultrassônico. Posto isso, pode-se afirmar que 30 segundos foi a duração de cada medição ultrassônica.

Dado que as medições via ultrassom dos escoamentos foram realizadas no modo pulso-eco, o número de pontos em cada sinal de eco amostrado foi definido sob a hipótese de existência de simetria axial nos escoamentos água-ar estudados experimentalmente. Tal conjectura é razoável, uma vez que os escoamentos foram induzidos na direção vertical em uma tubulação cilíndrica. Assim sendo, foi determinado o número de pontos que cada sinal de eco amostrado deveria possuir para viabilizar a observação da propagação da onda ultrassônica entre o transdutor e o centro da tubulação, ante a consideração do movimento de ida e volta ao ponto de

emissão. Tal número de pontos foi estimado em 976, conforme ilustram as Tabelas 4 e 5.

Por sua vez, os valores configurados para os parâmetros filtro passa-alta e filtro passa-baixa para as aquisições com os transdutores de 1 e 5 MHz foram propícios para atenuação de frequências distintas daquelas contidas no espectro dos respectivos transdutores, conforme evidenciam as informações disponíveis no Anexo A e nas Tabelas 4 e 5. Quanto à largura do pulso, foi orientação do fabricante da placa ultrassônica os valores de 100 e 500 ns adotados para as aquisições com os transdutores de 1 e 5 MHz, respectivamente. De modo similar foi configurado o parâmetro amortecimento, cujo valor adotado foi 620 ohms, o máximo valor configurável na placa de aquisição ultrassônica. Por fim, foram definidos por intermédio das análises preliminares os valores dos parâmetros ganho e tempo silencioso, ambos presentes nas Tabelas 4 e 5.

#### 4.1.2 Sistema para medição da fração de vazio via tomadas pressão

As medições da fração de vazio via tomadas de pressão são aplicáveis para escoamentos líquido-gás verticais sob condições nas quais ambas as fases escoam com velocidade superficial não nula, assim como em situações nas quais apenas a velocidade superficial da fase líquida é nula (ARITOMI *et al.*, 1997; TANG; HEINDEL, 2006; JIA; BABATUNDE; WANG, 2015). Para escoamentos com velocidade superficial de líquido nula, a queda de pressão total ao longo desses escoamentos é proporcional à perda de carga gravitacional, conforme expõe a Equação 25. Nessa equação, o termo  $\Delta P_B$  designa a diferença de pressão entre dois pontos na direção axial do escoamento líquido-gás,  $\Delta Z$  corresponde ao desnível geométrico entre os pontos de medição de pressão,  $g$  designa a aceleração gravitacional e  $\rho_M$  corresponde à massa específica média do escoamento bifásico, cujo valor é calculável mediante o uso da Equação 11 (devidamente definida em 2.1.1 e em evidência a seguir para facilitar a compreensão do texto em curso).

$$\Delta P_B = \rho_M g \Delta Z \quad (25)$$

$$\rho_M = (1 - \alpha)\rho_L + \alpha\rho_G \quad (11)$$

A Equação 11 pode ser reescrita em função apenas de  $\rho_L$  para situações nas quais a massa específica do gás é desprezível ante a massa específica do líquido. Nessas situações, a  $\rho_M$  pode ser estimada por meio da Equação 26. Diante dessa

simplificação é possível obter a Equação 27, dado que ela resulta da substituição da Equação 26 na 25 associada a subsequente aplicação de rearranjo algébrico. Posto isso, o acoplamento da Equação 27 com a mensuração da diferença de pressão ao longo do escoamento líquido-gás possibilita a determinação da fração de vazio, visto que são ordinariamente determináveis a distância entre os pontos de tomada de pressão e a massa específica do líquido.

$$\rho_M = (1 - \alpha)\rho_L \quad (26)$$

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta P_B}{\rho_L g \Delta Z} \quad (27)$$

Em resumo, a Equação 27 representa a relação funcional entre a fração de vazio e a queda de pressão para escoamentos líquido-gás verticais e ascendentes sob velocidade superficial da fase líquida nula. No entanto, tal equação pode ser também aplicada para escoamentos líquido-gás com baixas velocidades superficiais de líquido, isto é, velocidades de 1 cm/s para escoamentos água-ar concorrentes (TANG; HEINDEL, 2006). Contudo, nas situações em que a velocidade superficial de líquido é relevante, a contribuição da perda de carga friccional deve ser considerada no cálculo da fração de vazio. Para tais situações, a Equação 28 ilustra a relação funcional adequada para o cálculo da fração de gás livre (TANG; HEINDEL, 2006). Essa equação pode ser obtida a partir de balanço de quantidade de movimento, vide Merchuk e Stein (1981) e Hills (1976).

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta P_B}{\rho_L g \Delta Z} + \frac{4\tau_B}{\rho_L g D} \quad (28)$$

Na Equação 28, os termos  $D$  e  $\tau_B$  correspondem, respectivamente, ao diâmetro interno da linha de escoamento e à tensão média de cisalhamento para escoamentos líquido-gás. Segundo afirmam Tang e Heindel (2006), é comumente inviável determinar de forma rigorosa o valor da  $\tau_B$  em razão da relação não linear entre esse parâmetro e a fração de vazio, bem como devido às limitadas faixas de aplicação dos modelos de predição da  $\tau_B$  disponíveis na literatura. Assim sendo, esses autores propõem o cálculo da  $\tau_B$  mediante a aplicação da Equação 29, na qual o fator de atrito e a velocidade do escoamento líquido-gás são estimados, respectivamente, pelo fator de atrito referente à fase líquida,  $f_D$ , e pela velocidade superficial de líquido,  $V_{SL}$ . Ante essas aproximações, a fração de vazio de escoamentos líquido-gás sob baixos

valores de  $V_{SL}$  pode ser calculada por meio da Equação 30, visto que tal equação resulta da substituição da Equação 29 na 28 associada a subsequente aplicação de rearranjo algébrico.

$$\tau_B \cong \frac{1}{8} f_D \rho_M (V_{SL})^2 \quad (29)$$

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta P_B}{\rho_L g \Delta Z + \left\{ \frac{[\rho_L f_D \Delta Z (V_{SL})^2]}{(2D)} \right\}} \quad (30)$$

Ao analisar a Equação 30 é coerente afirmar que o denominador da fração presente nessa equação corresponde à queda de pressão para escoamento monofásico de líquido devido às perdas de carga gravitacional e friccional. Posto isso, doravante, tal denominador também será denominado de  $\Delta P_{MONO}$  e, assim sendo, é possível reescrever a Equação 30 em uma forma condensada, conforme expõe a Equação 31.

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta P_B}{\Delta P_{MONO}} \quad (31)$$

De acordo com a Equação 31, a fração de vazio para uma dada condição de escoamento líquido-gás, sob  $V_{SL}$  relativamente baixa, pode ser calculada mediante a determinação da queda de pressão bifásica ao longo de um comprimento  $\Delta Z$  e, por fim, da determinação da queda de pressão do escoamento monofásico apenas do líquido ao longo do mesmo comprimento  $\Delta Z$ , sob mesma condição de  $V_{SL}$  e de temperatura. Segundo Tang e Heindel (2006), a aplicação da Equação 31 resulta em medidas de fração de vazio plausíveis para escoamentos água-ar com velocidades superficiais de líquido e gás não superiores a 11 e 22 cm/s, respectivamente. Posto isso, o sistema para medição da fração de vazio de referência quantificou essa variável hidrodinâmica, para as distintas condições de escoamento investigadas, mediante a aplicação da Equação 31. Em termos de aparato experimental, tal sistema de medição foi constituído por dois sensores de pressão absoluta instalados e distanciados entre si por 1,29 metros na linha de escoamento bifásico, vide Figura 5.

Na prática, os valores de fração de vazio obtidos via Equação 31 foram calculados mediante o uso de valores médios de  $\Delta P_B$  e  $\Delta P_{MONO}$ , visto que tais quedas de pressão foram adquiridas sob taxa de amostragem de 1 Hz em intervalos de

medição de 60 segundos. Ademais, salienta-se que cada condição de escoamento e, por consequência, sua inerente fração de vazio, foi averiguada sete vezes para verificação da repetibilidade dos experimentos e das medições. Logo, os valores da fração de vazio de referência presentes nesta dissertação correspondem às médias aritméticas dos valores amostrais de  $\alpha$  pertinentes a um mesmo conjunto de dados, isto é, atrelados a uma mesma condição de escoamento investigada experimentalmente. Posto isso, a Equação 32 ilustra a expressão matemática para obtenção da média aritmética da fração de vazio por condição de escoamento investigada, doravante designada por  $\bar{\alpha}$ .

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \alpha_i \quad (32)$$

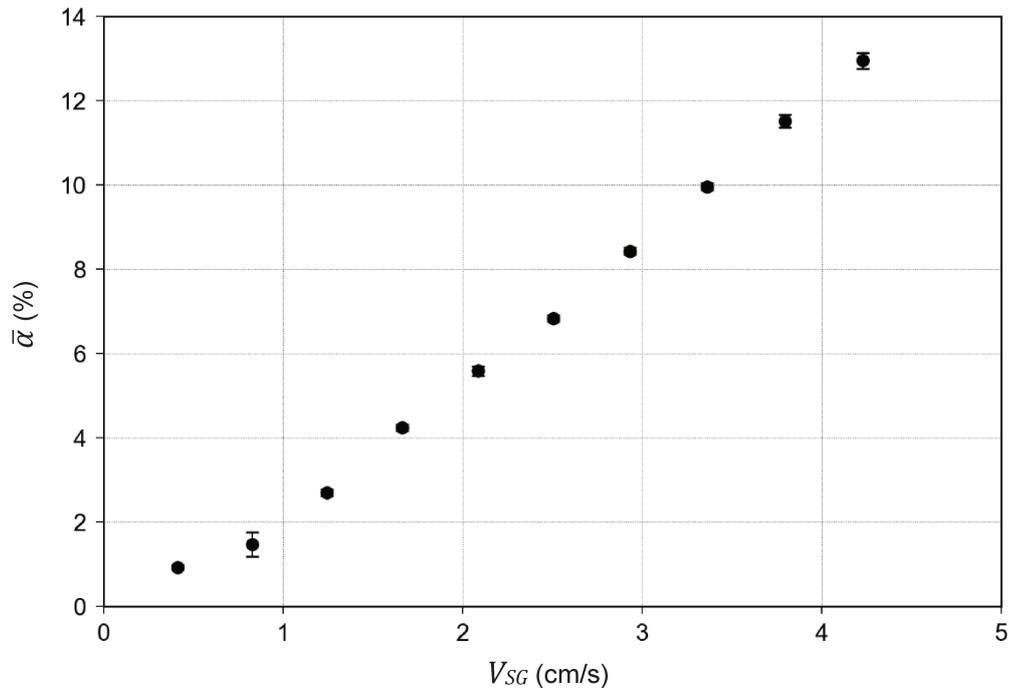
## 4.2 Planejamento experimental

O planejamento empregado nas investigações experimentais foi desenvolvido a partir do seguinte intuito: obtenção de regimes de escoamento água-ar bem definidos mediante a exclusão de possíveis regiões de transição da matriz de testes experimentais. Logo, para identificação dos eventuais regimes, diversas condições de escoamento foram averiguadas preliminarmente sob as restrições impostas pela montagem experimental construída para a realização dos experimentos. Nesses experimentos preliminares a vazão nominal de água foi mantida constante. Em oposição, a vazão nominal de ar foi modificada durante a execução experimental e, desse modo, viabilizou a análise preliminar dos escoamentos em diferentes condições de operação. Além de constante, a vazão de água empregada foi o menor valor sujeito à medição no rotâmetro de líquido, visto que tal configuração facultou a indução dos escoamentos com as maiores frações de vazio realizáveis no circuito experimental.

Os escoamentos água-ar relativos à análise preliminar foram filmados, assim como mensuradas suas inerentes variáveis hidrodinâmicas, isto é, fração de vazio e velocidade superficial de gás e de líquido. As filmagens foram capturadas na seção da tubulação situada logo após o carretel ultrassônico e, conseqüentemente, dentro da região de operação do sistema para medição de fração de vazio usado como referência. As variáveis hidrodinâmicas e as filmagens foram usadas em conjunto na avaliação dos regimes de escoamentos água-ar passíveis de ocorrência no circuito

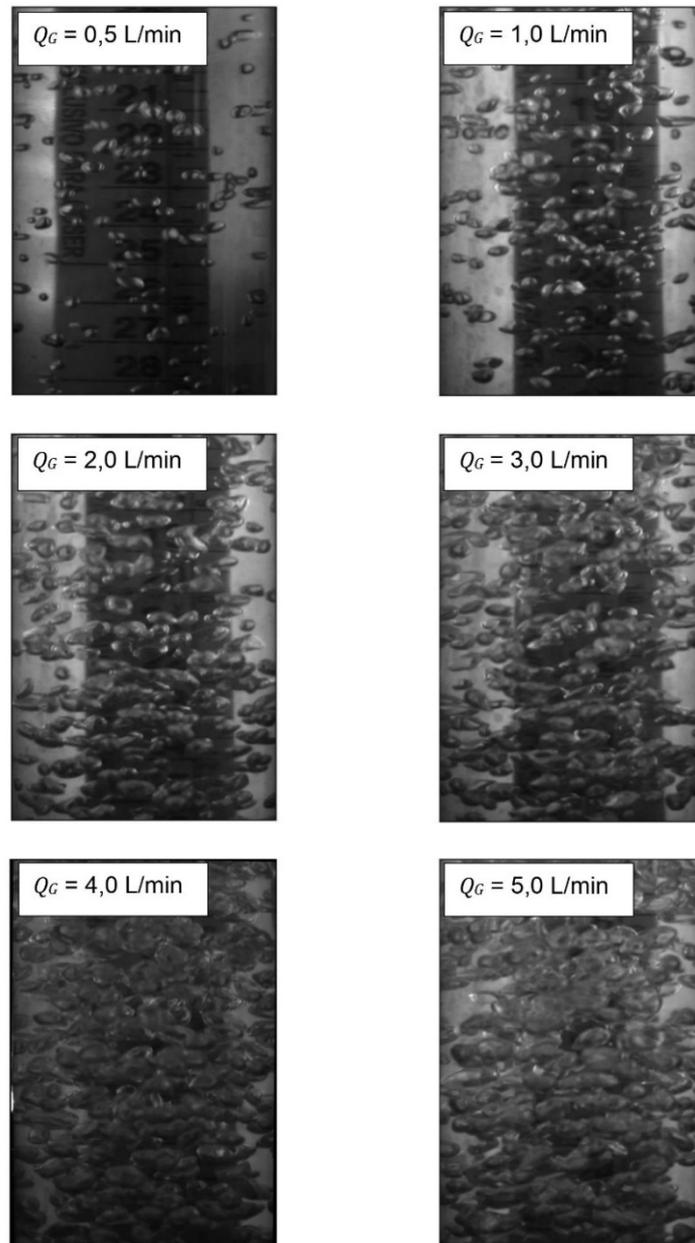
experimental. A Figura 13 ilustra a relação entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $V_{SG}$  para as condições de operação averiguadas no estudo preliminar dos escoamentos bifásicos.

**Figura 13** — Relação entre variáveis hidrodinâmicas dos escoamentos água-ar sob condição de vazão nominal de líquido constante e igual a 8,6 L/min, de gás entre 0,5 e 5 L/min e temperatura de aproximadamente 23,5 °C



A relação entre as variáveis dispostas na Figura 13 é usada comumente para classificação de regimes de escoamento em reator tipo coluna de bolhas (VIAL *et al.*, 2001; GOURICH *et al.*, 2006). Tal abordagem é também aplicável para classificação de escoamentos líquido-gás em tubos, pois sob análogas condições de operação são correspondentes a hidrodinâmica desses sistemas líquido-gás, conforme sugerem Mudde e Saito (2001). Assim sendo, há indício que os escoamentos líquido-gás situam-se no regime bolhas quando é linear e crescente, a partir da origem do sistema de coordenadas, a relação entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $V_{SG}$  desses escoamentos, sob condição de vazão de líquido constante ou nula (VIAL *et al.*, 2001; SCHEID *et al.*, 2004; GOURICH *et al.*, 2006). Logo, a Figura 13 sugere que estavam dentro do regime bolhas os escoamentos água-ar realizáveis no circuito experimental ante as condições de operação empregadas. Tal indício foi confrontado com as respectivas imagens dos escoamentos, vide Figura 14.

**Figura 14** — Imagens dos escoamentos água-ar investigados entre a menor e maior condição de vazão nominal de gás realizável, com vazão de líquido constante e igual a 8,6 L/min e temperatura de aproximadamente 23,5 °C



. Fonte: Autoral

As imagens presentes na Figura 14 corroboraram com o indício de que bolhas foi o regime predominante nos escoamentos água-ar realizáveis na montagem experimental ante as condições de operação empregadas. Na Figura 14, as imagens dos escoamentos água-ar indicam que as bolhas possuem forma não esférica ou distorcida e, por conseguinte, estão em conformidade com Rosa (2012) em relação à geometria de uma subclassificação do regime bolhas: o denominado bolhas discretas. Visto que apenas o regime bolhas e nenhuma região de transição foi observada na

análise preliminar dos escoamentos, as mesmas condições de operação usadas nessa análise foram consideradas na construção da matriz experimental relativa às investigações de escoamentos água-ar via medições com ultrassom. Tal matriz está descrita na Tabela 6.

**Tabela 6** — Matriz experimental utilizada nos testes com escoamentos líquido-gás

Ponto experimental	$Q_L$ (L/min)	$Q_G$ (L/min)
1	8,6	0,5
2	8,6	1,0
3	8,6	1,5
4	8,6	2,0
5	8,6	2,5
6	8,6	3,0
7	8,6	3,5
8	8,6	4,0
9	8,6	4,5
10	8,6	5,0

Fonte: Autoral

A execução experimental das condições presentes na Tabela 6 possibilitou a obtenção dos escoamentos água-ar discutidos nesta dissertação. Esses escoamentos foram sujeitos a medições ultrassônicas, bem como a mensurações de dados de processo, tais como pressão, temperatura e vazão. Cada escoamento bifásico, isto é, cada condição de operação, foi averiguada sete vezes para avaliação da repetibilidade dos experimentos e, por consequência, das medições.

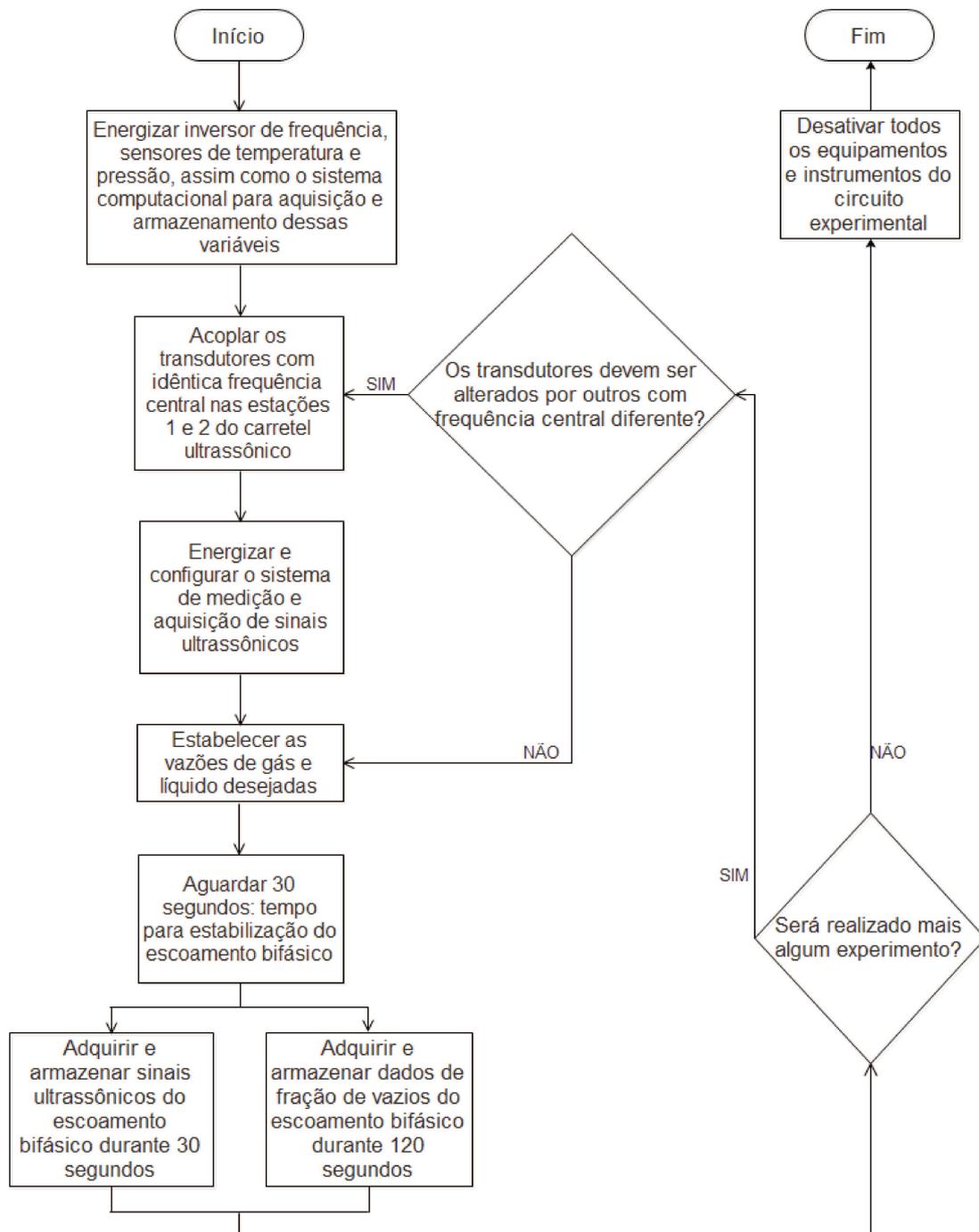
### 4.3 Procedimento experimental

A matriz experimental disponível na Tabela 6 foi executada experimentalmente sob a diretiva de um procedimento experimental, cuja síntese encontra-se na Figura 15. As etapas que compõem esse procedimento experimental estão descritas, de forma detalhada e ordenada, a seguir:

- 1) Energizar o inversor de frequência da bomba destinada à fase líquida, os sensores de temperatura e os de pressão. Acionar o sistema computacional responsável pela aquisição e armazenamento dessas variáveis;

- 2) Acoplar nas estações 1 e 2 transdutores ultrassônicos com idêntica frequência central nominal, bem como conectar tais transdutores aos canais de pulsação/recepção disponibilizados pela placa de aquisição ultrassônica. Acionar o computador industrial no qual a placa de aquisição está instalada. Configurar os parâmetros de aquisição ultrassônica;
- 3) Ajustar a pressão na linha de ar ao valor definido como referência, isto é, 500 kPa. Regular as vazões de líquido e gás aos valores de interesse. Aguardar 30 segundos: tempo necessário para estabilizar o escoamento bifásico;
- 4) Realizar, simultaneamente, as medições ultrassônicas na estação 1 e 2, bem como as medições de queda de pressão ao longo do escoamento para obtenção da fração de vazão de referência. Armazenar os dados coletados;
- 5) Retornar à etapa 3) caso o intuito seja alterar o ponto experimental e, então, realizar novas medições ultrassônicas e de fração de vazão de referência; retornar à etapa 2) caso o objetivo seja alterar a frequência central dos transdutores em ambas as estações ultrassônicas e, então, realizar novas medições ultrassônicas e de fração de vazão de referência; caso o intuito não seja nenhum dos dois descritos previamente, deve-se desativar, de modo adequado, todos os equipamentos e instrumentos presentes no circuito experimental.

Figura 15 — Síntese do procedimento experimental

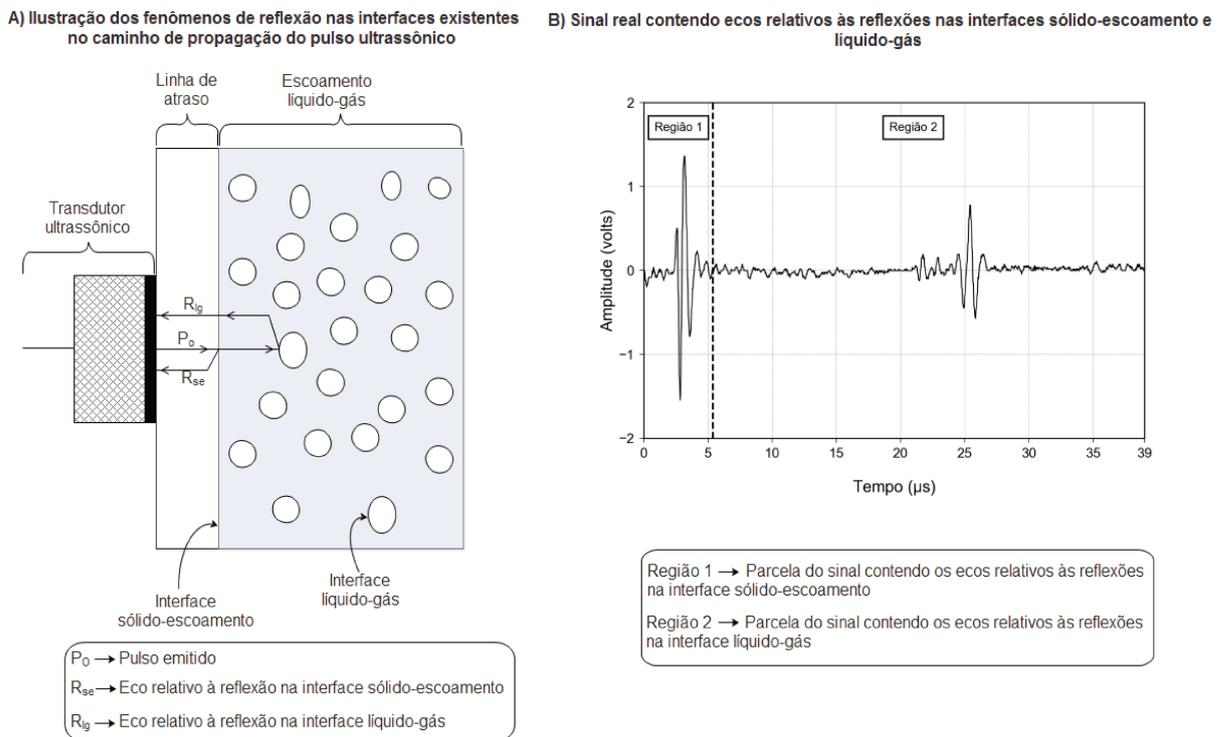


Fonte: Autoral

#### 4.4 Processamento dos sinais de eco ultrassônico

As medições via ultrassom dos escoamentos água-ar propiciaram a obtenção de sinais de eco. Os sinais adquiridos contêm duas regiões, conforme expõe a Figura 16. Uma região contempla os ecos originados na interface sólido-escoamento, a outra os ecos suscitados na interface líquido-gás.

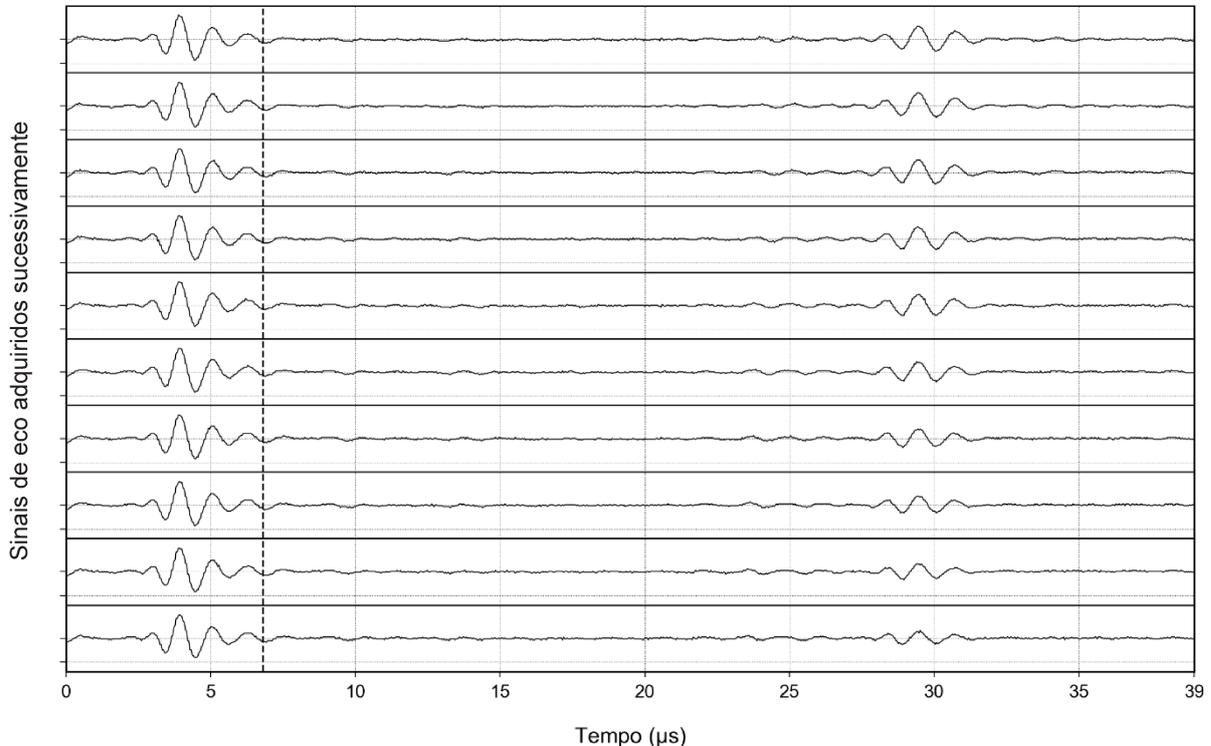
**Figura 16** — Representação dos fenômenos de reflexão atrelados à propagação de ondas ultrassônicas nos escoamentos líquido-gás, como também de um sinal real resultante de medição via ultrassom dos escoamentos água-ar



Fonte: Autoral

As medições ultrassônicas foram realizadas sob específica configuração dos parâmetros de aquisição ultrassônica, vide Seção 4.1.1. Tal configuração resultou na aquisição de 60000 sinais de eco por estação de medição ultrassônica para cada experimento realizado com os escoamentos água-ar. Posto isso, a Figura 17 ilustra uma parcela dos sinais adquiridos mediante o uso de transdutor de 1 MHz na segunda estação de medição para um dado experimento. Os sinais presentes na Figura 17 — assim como os demais sinais oriundos das diversas medições ultrassônicas dos escoamentos água-ar — foram submetidos ao usual processamento prévio de remoção do componente de corrente contínua, como também de remoção de tendência.

**Figura 17** — Sinais de eco adquiridos sequencialmente para uma dada medição ultrassônica. A linha tracejada delimita duas regiões distintas: à esquerda de cada sinal a região que compreende os ecos da interface sólido-escoamento e à direita os ecos da interface líquido-gás



Fonte: Autoral

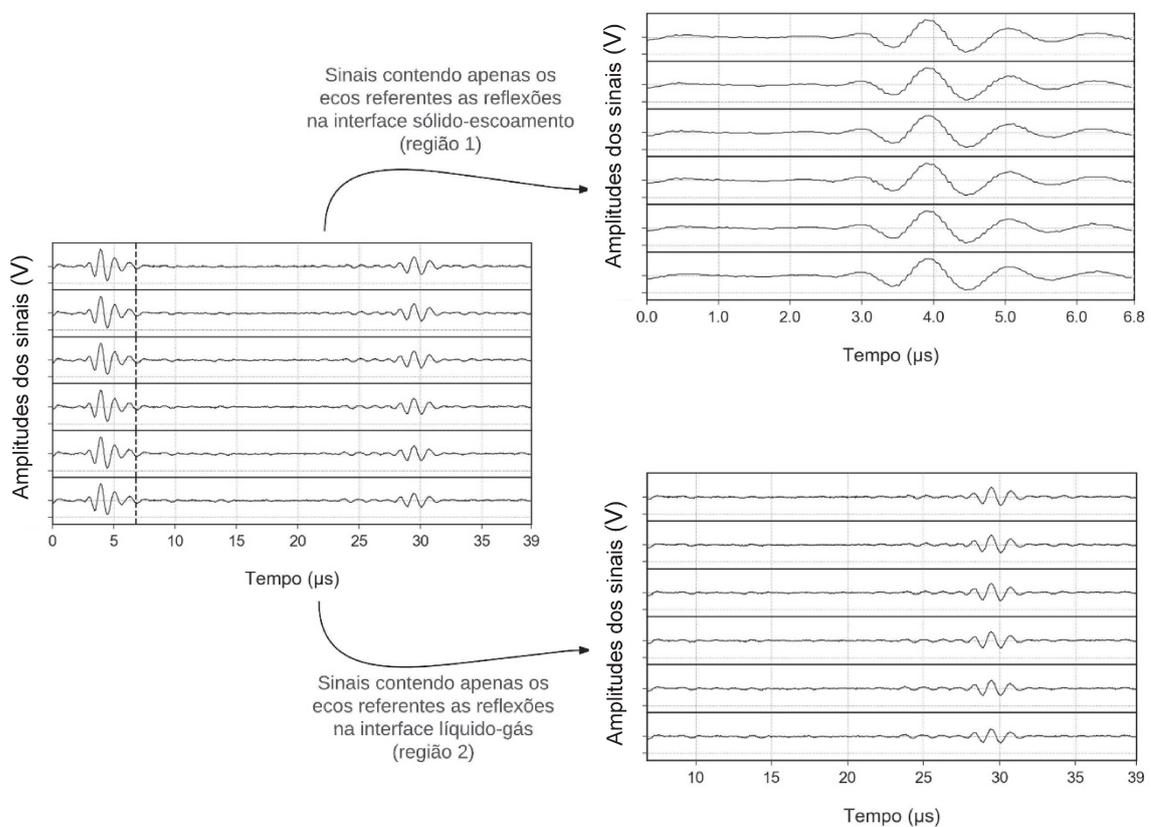
Os sinais de eco, ora explicitados, foram processados de diversas formas. Tais processamentos propiciaram a obtenção das seguintes variáveis ultrassônicas: sinal de energia dos ecos, sinal adimensional de energia dos ecos, magnitude das flutuações existentes no sinal adimensional de energia dos ecos ( $E_{RMS}$ ) e razão adimensional. Essas variáveis foram relacionadas com a fração de vazio mensurada pelo sistema de referência. Além disso, a variável sinal adimensional de energia dos ecos foi empregada no procedimento desenvolvido para estimativa da vazão da fase dispersa dos escoamentos água-ar averiguados experimentalmente. Assim sendo, adiante encontram-se as descrições das variáveis ultrassônicas supracitadas, assim como o procedimento proposto para determinação da vazão da fase dispersa.

#### 4.4.1 Sinal de energia dos ecos

Sucintamente, cada sinal de energia dos ecos foi gerado mediante a aplicação da definição de energia do sinal, vide Seção 2.4.1, aos sinais de eco resultantes de cada medição via ultrassom dos escoamentos água-ar. Contudo, apenas a região dos

sinais de eco compreendendo às reflexões das ondas acústicas na interface líquido-gás foi considerada no cômputo dos sinais de energia dos ecos, conforme ilustra a Figura 18. O uso somente dos dados ultrassônicos pertinentes à interface líquido-gás foi baseado na seguinte premissa: variações na concentração e distribuição espacial das bolhas nos escoamentos água-ar influenciam a forma e a amplitude dos ecos presentes nos sinais de eco e, por conseguinte, as características dos sinais de energia dos ecos.

**Figura 18** — Divisão dos sinais de eco em duas matrizes de sinais distintas

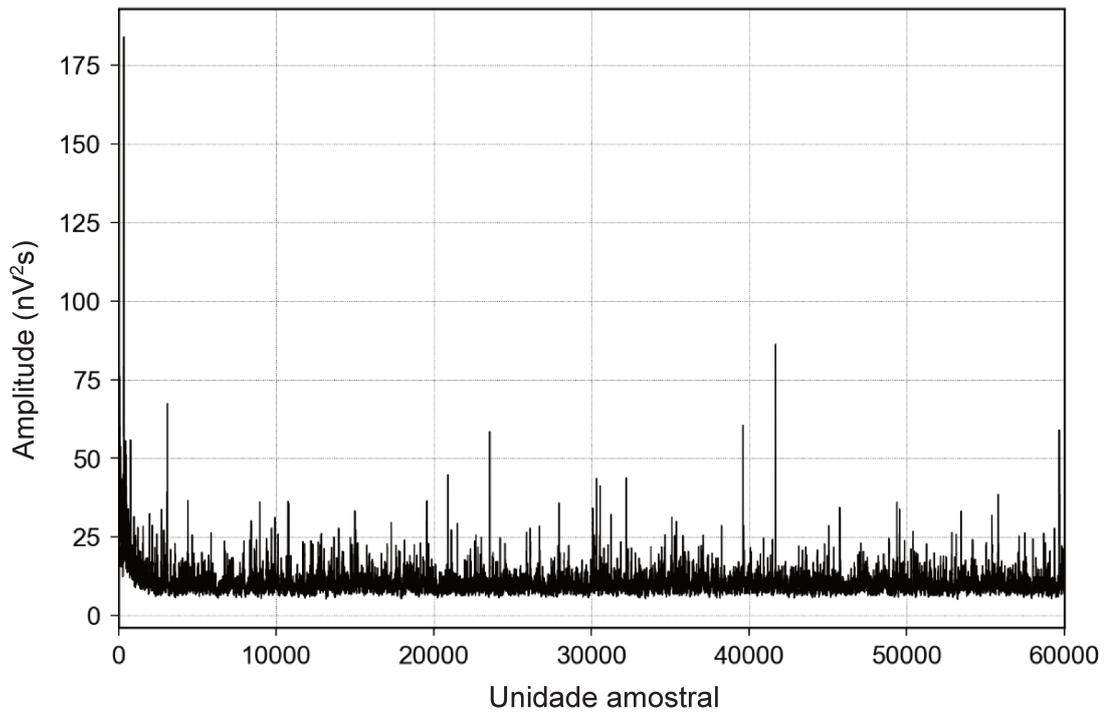


Fonte: Autoral

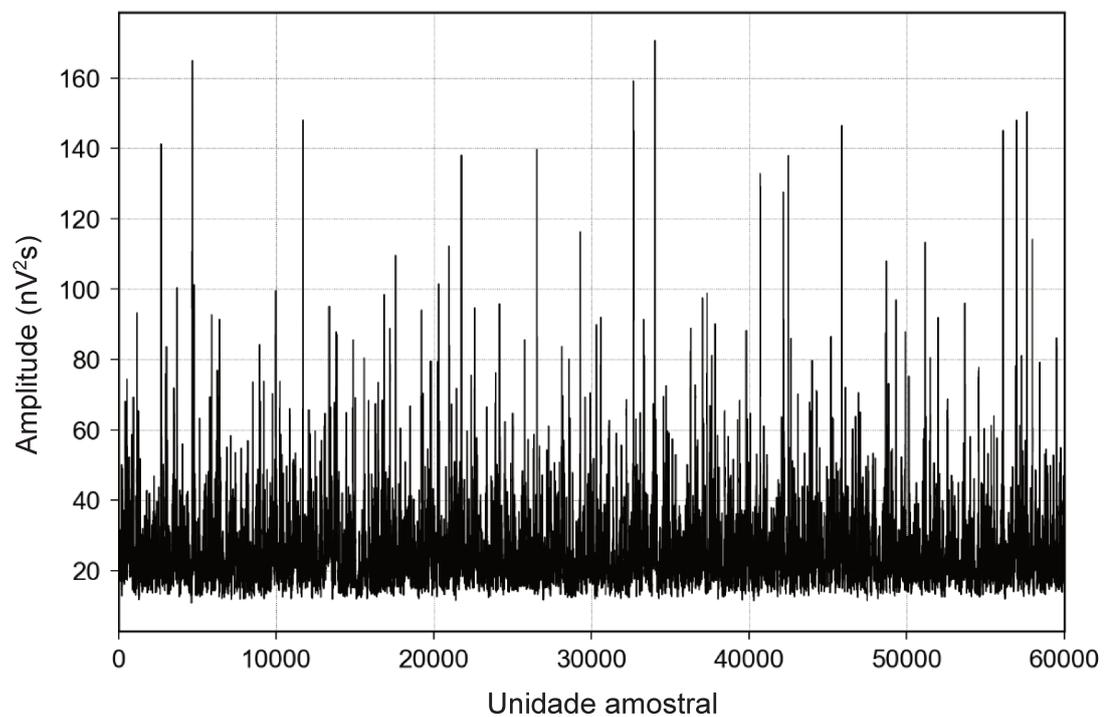
A Figura 18 evidencia que cada matriz de sinais de eco adquirida por medição ultrassônica realizada é separável em duas outras matrizes de sinais, ambas com idêntica quantidade de séries temporais entre si e em comparação com a matriz originária, contudo, contendo ecos oriundos de diferentes interfaces de reflexão. Logo, devido à sua definição, o número de unidades amostrais presente em um sinal de energia dos ecos — 60000 unidades amostrais — corresponde ao número de sinais de eco resultantes de uma medição ultrassônica. Assim sendo, as Figuras 19 e 20

ilustram dois sinais de energia dos ecos atrelados, respectivamente, a uma medição realizada com um transdutor de 1 MHz e outra com um transdutor de 5 MHz.

**Figura 19** — Sinal de energia dos ecos para uma medição realizada com um transdutor de 1 MHz

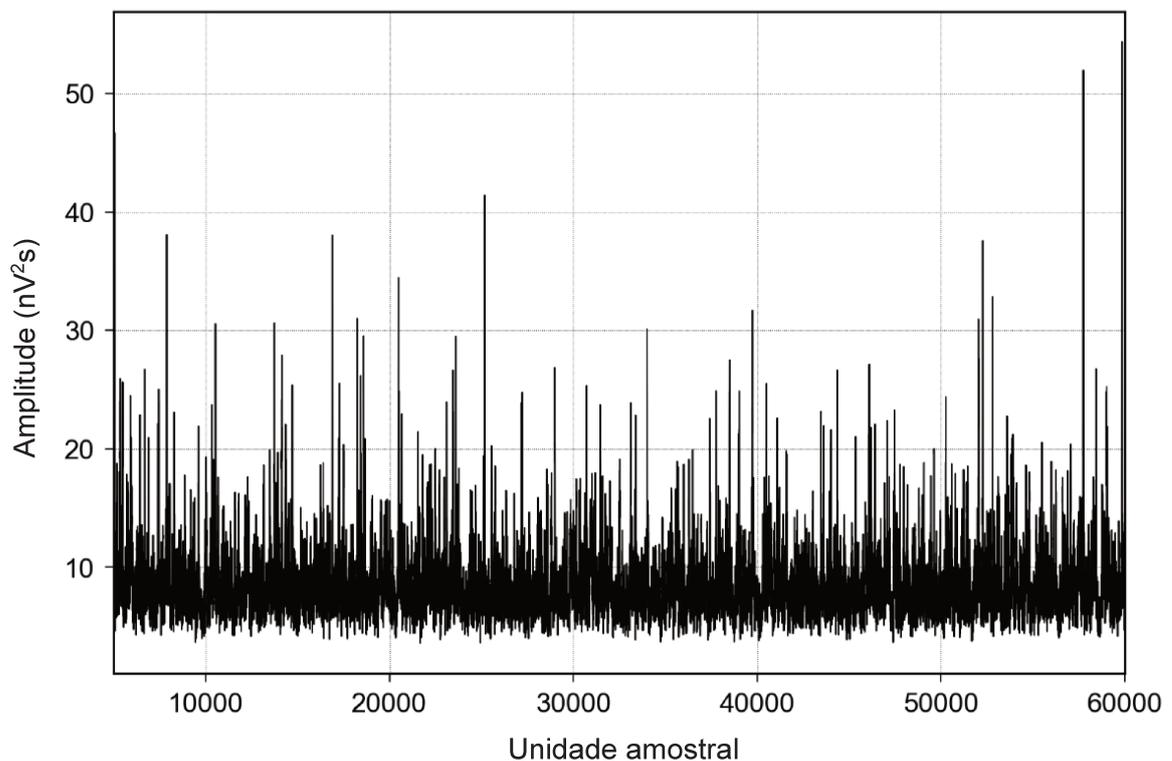


**Figura 20** — Sinal de energia dos ecos para uma medição realizada com um transdutor de 5 MHz



A análise da Figura 19 sugere que é transiente, na região inicial, a linha base do sinal. Tal comportamento também foi observado nos demais sinais de energia dos ecos oriundos das medições ultrassônicas realizadas com os transdutores de 1 MHz. Sugere-se que essa região transiente está atrelada a variações indesejadas na potência de excitação dos transdutores de 1 MHz durante as medições ultrassônicas realizadas com essa frequência central. Logo, tal região foi removida dos sinais de energia, visto que esse comportamento não é devido às reflexões dos pulsos ultrassônicos na interface líquido-gás, bem como interfere na avaliação quantitativa desses fenômenos nos sinais. A Figura 21 ilustra o mesmo sinal de energia dos ecos presente na Figura 19, contudo, sem a presença da linha base transiente.

**Figura 21** — Sinal de energia dos ecos sem a região caracterizada por linha base transiente



Os sinais de energia dos ecos, ora explicitados, foram relacionados com a fração de vazio, mensurada pelo sistema de referência, dos escoamentos água-ar investigados experimentalmente. Para isso, a média dos sinais de energia dos ecos —  $\overline{MSE}$  — foi calculada e relacionada com a variável hidrodinâmica supracitada. A  $\overline{MSE}$  corresponde à média aritmética dos valores individuais de média dos sinais de energia dos ecos pertencentes ao mesmo conjunto de amostras. Cada conjunto de amostras de sinal de energia dos ecos é resultante das sete medições ultrassônicas

realizadas por estação de medição para cada ponto experimental investigado sob determinada frequência central dos transdutores ultrassônicos. Logo, cada conjunto é constituído por sete amostras de sinal de energia dos ecos. Posto isso, a Equação 33 expõe a expressão matemática para obtenção da  $\overline{MSE}$ . Nessa equação, o termo  $MSE$  equivale à média aritmética de um sinal de energia dos ecos, cujo cômputo é correspondente ao aplicado na exemplificação presente na Seção 2.3.1.

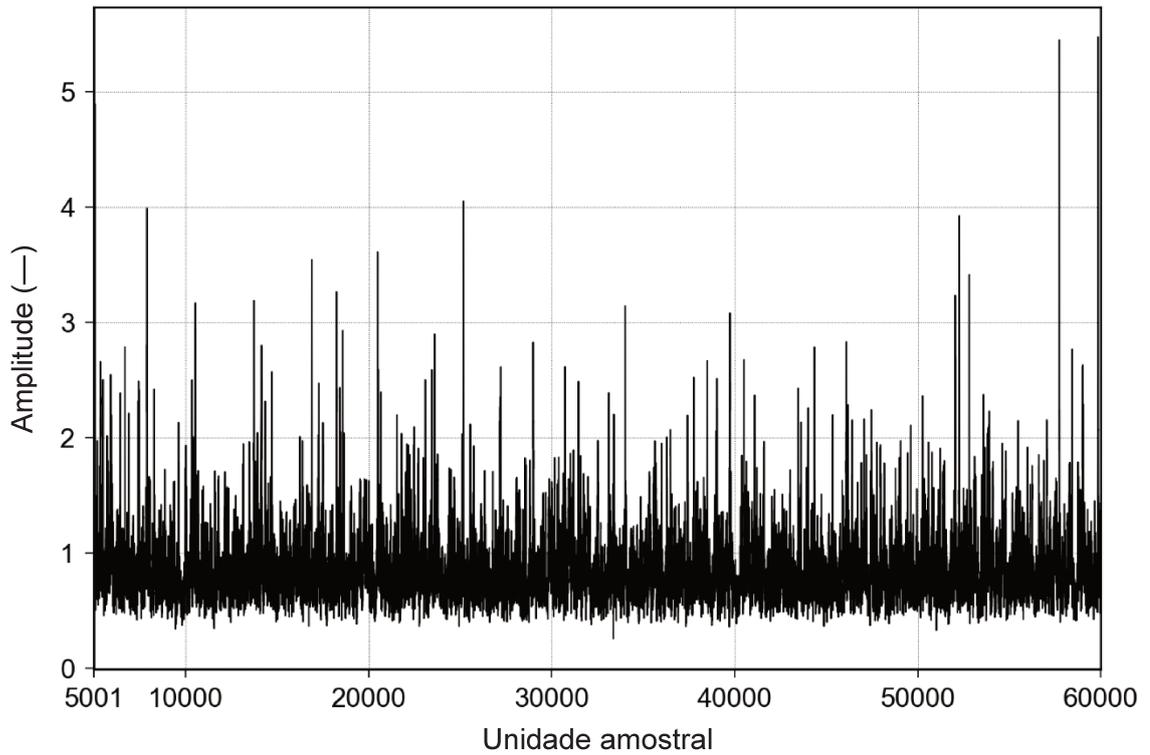
$$\overline{MSE} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 MSE_i \quad (33)$$

#### 4.4.2 Sinal adimensional de energia dos ecos

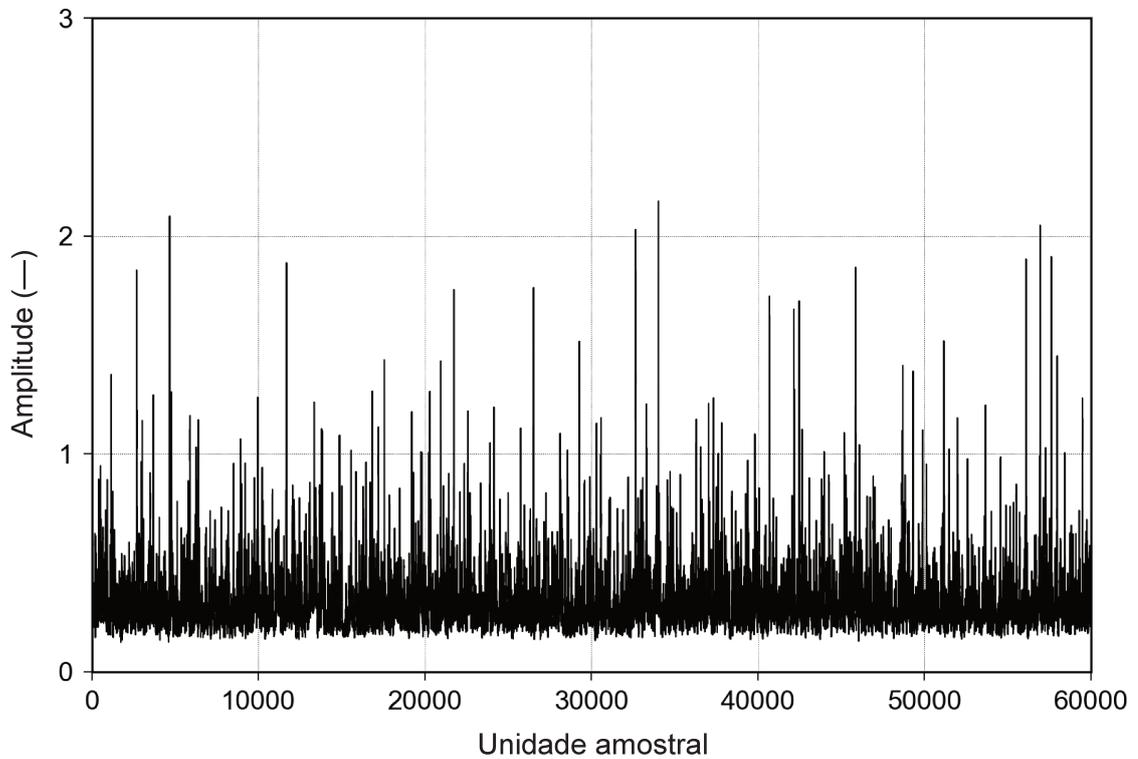
O processamento para obtenção dos sinais adimensionais de energia dos ecos foi análogo ao aplicado no desenvolvimento dos sinais de energia dos ecos, vide Seção 4.4.1. A diferença entre esses processamentos reside apenas na operação de normalização efetuada exclusivamente no processamento dos sinais adimensionais de energia dos ecos. Tal operação foi realizada mediante a divisão de cada sinal de eco por sua respectiva maior amplitude, situada na região dos sinais compreendendo os ecos da interface sólido-escoamento. A normalização adotada foi utilizada como uma forma de autocalibração dos sinais de eco, visto que os ecos da interface sólido-escoamento têm sua amplitude influenciada de modo proeminente pela condição do acoplamento acústico do transdutor no carretel ultrassônico.

As Figuras 22 e 23 ilustram dois sinais adimensionais de energia dos ecos, ambos resultantes de aquisições com os transdutores de 1 MHz, contudo, pertinentes a diferentes estações de medição. Os sinais adimensionais de energia dos ecos atrelados às estações de medição 1 e 2 foram utilizados no procedimento desenvolvido para determinação da vazão da fase dispersa dos escoamentos água-ar investigados experimentalmente — conforme elucida a Seção 4.4.5 — e a fração de vazio desses escoamentos foi relacionada com a média dos sinais adimensionais de energia dos ecos, a  $\overline{MSAE}$ .

**Figura 22** — Sinal adimensional de energia dos ecos para uma medição realizada com um transdutor de 1 MHz



**Figura 23** — Sinal adimensional de energia dos ecos para uma medição realizada com um transdutor de 5 MHz



A  $\overline{MSAE}$  corresponde à média aritmética dos valores individuais de média dos sinais adimensionais de energia dos ecos pertencentes ao mesmo conjunto de amostras. Cada conjunto de amostras de sinal adimensional de energia dos ecos é decorrente das sete medições ultrassônicas realizadas por estação de medição para cada ponto experimental investigado sob determinada frequência central dos transdutores ultrassônicos. Logo, cada conjunto é constituído por sete amostras de sinal adimensional de energia dos ecos. Posto isso, a Equação 34 evidencia a expressão matemática para obtenção da  $\overline{MSAE}$ . Nessa equação, o termo  $MSAE$  equivale à média aritmética de um sinal adimensional de energia dos ecos, cujo cálculo é análogo ao aplicado na exemplificação presente na Seção 2.3.1.

$$\overline{MSAE} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 MSAE_i \quad (34)$$

#### 4.4.3 Magnitude das flutuações existentes no sinal adimensional de energia dos ecos ( $E_{RMS}$ )

A variável  $E_{RMS}$  foi gerada mediante a aplicação da definição do valor  $RMS$ , vide Seção 2.4.2, aos sinais adimensionais de energia dos ecos devidamente subtraídos de seus respectivos valores médios. A subtração de cada sinal adimensional de energia dos ecos por seu inerente valor médio foi uma etapa fundamental antes da realização do cálculo do  $RMS$  para que o resultado desse procedimento, isto é, a variável  $E_{RMS}$ , represente o seguinte: uma medida estatística da magnitude das flutuações existentes no sinal adimensional de energia dos ecos (FIGLIOLA; BEASLEY, 2007a).

Quanto à sua aplicação, a variável  $E_{RMS}$  foi relacionada com a fração de vazio, mensurada pelo sistema de referência, dos escoamentos água-ar averiguados experimentalmente. Logo, foi necessário calcular o valor médio da variável  $E_{RMS}$ , isto é, o  $\overline{E_{RMS}}$ , atrelado a cada conjunto de amostras de  $E_{RMS}$  e, então, associar tais valores às pertinentes médias da variável hidrodinâmica supracitada. Assim sendo, a Equação 35 expõe a expressão matemática para obtenção do  $\overline{E_{RMS}}$ . Nessa equação, o número sete representa a quantidade de valores individuais de  $E_{RMS}$  existentes por conjunto de amostras. Tal quantidade é resultante das sete medições ultrassônicas realizadas por estação de medição para cada ponto experimental investigado sob determinada frequência central dos transdutores ultrassônicos.

$$\overline{E_{RMS}} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 E_{RMS_i} \quad (35)$$

#### 4.4.4 Razão adimensional

A razão adimensional foi adquirida mediante o uso de duas variáveis ultrassônicas descritas previamente: a variável  $E_{RMS}$  e o sinal adimensional de energia dos ecos. A Equação 36 expõe a expressão matemática para obtenção da razão adimensional. Nessa equação, o termo  $RA$  equivale à razão adimensional e  $MSAE$  designa a média de um sinal adimensional de energia dos ecos, cuja definição em detalhes encontra-se em 4.4.2.

$$RA = \frac{E_{RMS}}{MSAE} \quad (36)$$

Devido à sua definição, é plausível afirmar que a variável  $RA$  é um recurso para quantificar a relação entre a magnitude das flutuações presentes no sinal adimensional de energia e a tendência central desse sinal. Por conseguinte, sugere-se que tal variável ultrassônica faculte a dedução da relação quantitativa entre as flutuações na concentração e distribuição espacial das bolhas — refletores dos pulsos ultrassônicos — na seção transversal da tubulação e a tendência central dessas características hidrodinâmicas concernentes aos escoamentos água-ar investigados experimentalmente.

Quanto à sua aplicação, a variável  $RA$  foi relacionada com a fração de vazio, mensurada pelo sistema de referência, dos escoamentos água-ar averiguados experimentalmente. Assim sendo, foi calculado o valor médio da razão adimensional, isto é, o  $\overline{RA}$ , para cada conjunto de amostras de  $RA$ . Posto isso, a Equação 37 expõe a expressão matemática para obtenção da  $\overline{RA}$ . Nessa equação, o número sete representa a quantidade de valores individuais de  $RA$  existentes por conjunto de amostras. Tal quantidade é resultante das sete medições ultrassônicas realizadas por estação de medição para cada ponto experimental investigado sob determinada frequência central dos transdutores ultrassônicos.

$$\overline{RA} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 RA_i \quad (37)$$

#### 4.4.5 Método para estimativa da vazão da fase dispersa via medições ultrassônicas

O método para estimativa da vazão de gás via ultrassom é baseado, fundamentalmente, na Equação 38. Essa equação demonstra que a vazão da fase dispersa ( $Q_G$ ), para uma dada condição de escoamento, é calculável mediante a determinação da fração de vazio ( $\alpha$ ), da área total da tubulação ( $A_T$ ) e da velocidade real da fase dispersa ( $V_G$ ). Tal velocidade média pode ser calculada mediante a determinação do intervalo temporal,  $\Delta t$ , gasto pelas bolhas ao percorrer uma dada distância,  $\Delta S$ , vide Equação 39. Segundo Figueiredo (2020), para uma dada condição de escoamento líquido-gás, tal intervalo temporal pode ser estimado mediante a aplicação do conceito de correlação cruzada a dois sinais de energia dos ecos oriundos de dois pontos de medição ultrassônica intervalados ao longo da linha de transporte de fluidos. Posto isso, o método em evidência nesta seção tem como premissa que o  $\Delta t$  é estimável por intermédio da correlação cruzada aplicada aos sinais adimensionais de energia dos ecos. Assim sendo, ao aplicar o conceito de correlação cruzada a dois sinais adimensionais de energia oriundos de diferentes estações de medição e, conseqüentemente, defasados no tempo, obtém-se o atraso temporal entre esses sinais ( $L$ ), cuja divisão pela frequência de repetição do pulso (*Pulse Repetition Frequency* — *PRF*) fornece o valor de  $\Delta t$ , conforme expõe a Equação 40.

$$Q_G = \alpha A_T V_G \quad (38)$$

$$V_G = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (39)$$

$$\Delta t = \frac{L}{PRF} \quad (40)$$

Apresentado o conceito relativo à estimativa do  $\Delta t$  via medições ultrassônicas, faz-se necessário apresentar o modo como a variável hidrodinâmica  $\alpha$  foi estimada via ultrassom: mediante o uso da função de ajuste oriunda da relação estabelecida entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$ . As devidas discussões sobre essa função de ajuste encontram-se na Seção 5.2.5. Ante ao exposto, encontra-se a seguir o procedimento geral empregado para estimar a vazão da fase dispersa das diversas condições de escoamento líquido-gás investigadas experimentalmente:

- 1) Calcular os sinais adimensionais de energia dos ecos das estações 1 e 2, segundo explicitado em 4.4.2, assim como estimar o valor da variável  $RA$  atrelado aos sinais adquiridos via medição ultrassônica realizada na estação 2;
- 2) Dividir cada sinal adimensional de energia em  $M$  segmentos sobrepostos. Cada segmento deve conter  $m$  pontos, assim como a sobreposição entre esses segmentos deve corresponder a 50% das  $m$  pontos;
- 3) Aplicar o conceito de correlação cruzada aos segmentos de sinais correspondentes entre as estações 1 e 2 para, assim, obter um conjunto com no máximo  $M$  valores de atraso temporal ( $L$ ) entre os sinais. Nesse conjunto, só devem ser incluídos os valores de  $L$  com coeficiente de correlação normalizado equivalente ou superior a 0,7;
- 4) Calcular o valor médio do conjunto com no máximo  $M$  valores de atraso temporal, o denominado  $\bar{L}$ , bem como o desvio padrão amostral desse conjunto, o  $\sigma_L$ . Em sequência, retirar desse conjunto os valores de  $L$  fora do seguinte intervalo:  $\bar{L} - 0,5\sigma_L < L < \bar{L} + 0,5\sigma_L$ . Após isso, deve-se recalcular a média aritmética relativa aos valores remanescentes de  $L$ , doravante denominada de  $\overline{L}_R$ ;
- 5) Estimar a fração de vazio, da condição de escoamento sob análise, via função de ajuste entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$ . Utilizar como variável de entrada nessa função o valor de  $RA$  calculado segundo informa a etapa 1);
- 6) Estimar a vazão da fase dispersa, para a condição de escoamento sob análise, mediante a substituição dos valores estimados de fração de vazio,  $\alpha$ , e atraso temporal,  $\overline{L}_R$ , na Equação 41, em evidência a seguir:

$$Q_G = \alpha A_T \frac{\Delta S}{\overline{L}_R} (PRF) \quad (41)$$

Quanto à Equação 41, ela resulta das substituições das Equações 39 e 40 na Equação 38. Nessa equação, o parâmetro  $\Delta S$  corresponde à distância entre as estações de medição ultrassônica — 110 mm — e os parâmetros  $A_T$  e  $PRF$  são constantes cujas descrições e valores encontram-se evidenciados, respectivamente,

em 4.1 e 4.1.1. Por fim, salienta-se que o termo  $\overline{L_R}$  corresponde à estimativa do atraso temporal  $L$  presente na Equação 40.

De acordo com o procedimento geral, previamente explicitado, os sinais adimensionais de energia dos ecos foram particionados em segmentos com  $m$  pontos cada antes do cômputo da correlação cruzada. Foram averiguados diferentes valores de  $m$  com o intuito de avaliar o efeito do número de pontos presentes nos sinais correlacionados na estimativa da vazão da fase dispersa via medidas com ultrassom. Os valores de  $m$  empregados foram: 500, 1500 e 2500.

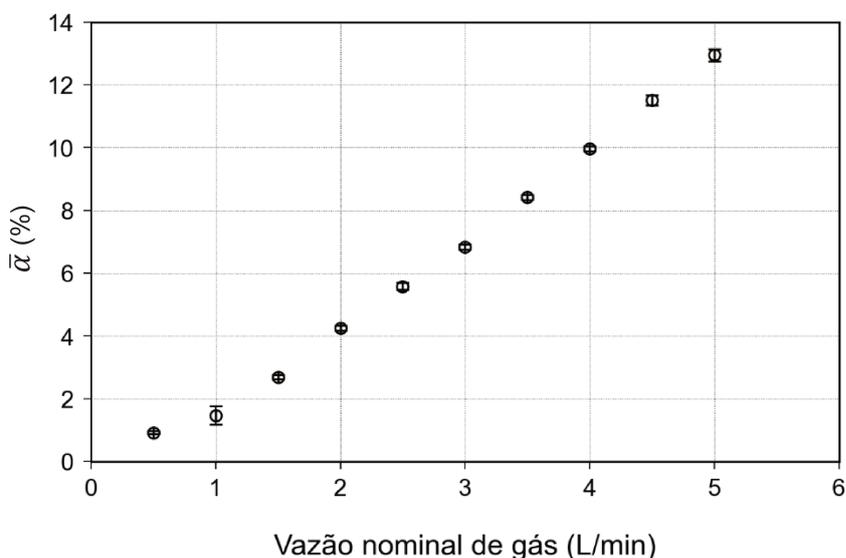
## CAPÍTULO 5 — RESULTADOS E DISCUSSÃO

Reiterando, escoamentos água-ar foram investigados experimentalmente com o seguinte objetivo: desenvolvimento de uma técnica para a estimativa da fração de vazio e vazão da fase dispersa de escoamentos água-ar mediante a realização de medições via ultrassom desses escoamentos. Logo, foram averiguadas as relações entre a fração de vazio e as variáveis ultrassônicas oriundas das medições ultrassônicas dos escoamentos bifásicos, bem como desenvolvido um procedimento para cálculo da vazão da fase dispersa baseado na correlação cruzada dos sinais adimensionais de energia dos ecos em associação à fração de gás livre determinada via ultrassom. Posto isso, a seguir encontram-se os resultados desenvolvidos e concernentes ao escopo previamente citado.

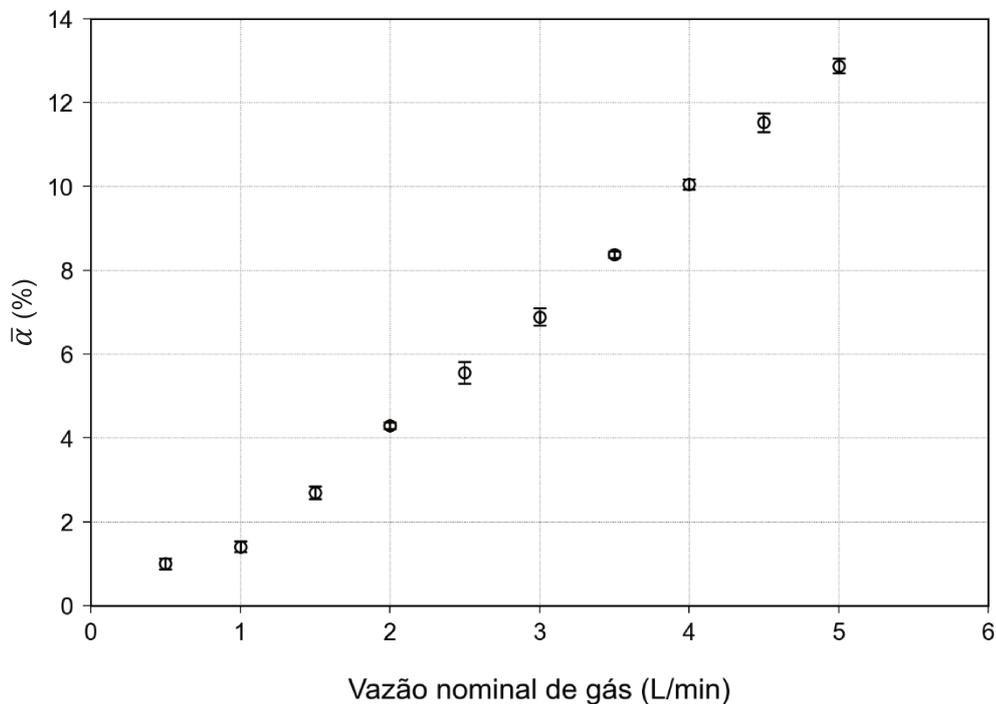
### 5.1 Fração de vazio: medições realizadas pelo sistema de referência

As Figuras 24 e 25 ilustram o comportamento da fração de vazio em função da vazão nominal de gás. Tais resultados são pertinentes aos experimentos realizados mediante a execução da matriz de testes, vide Seção 4.2, para as aquisições de sinais de eco ultrassônico com os transdutores de 1 e 5 MHz, respectivamente. Tais mensurações de fração de gás livre foram realizadas via sistema de referência, devidamente descrito em 4.1.2.

**Figura 24** — Frações de vazio via sistema de referência, sob vazão nominal de líquido constante e igual a 8,6 LPM e temperatura entre 23 e 23,5 °C. Resultados atrelados às investigações com os transdutores de 1 MHz

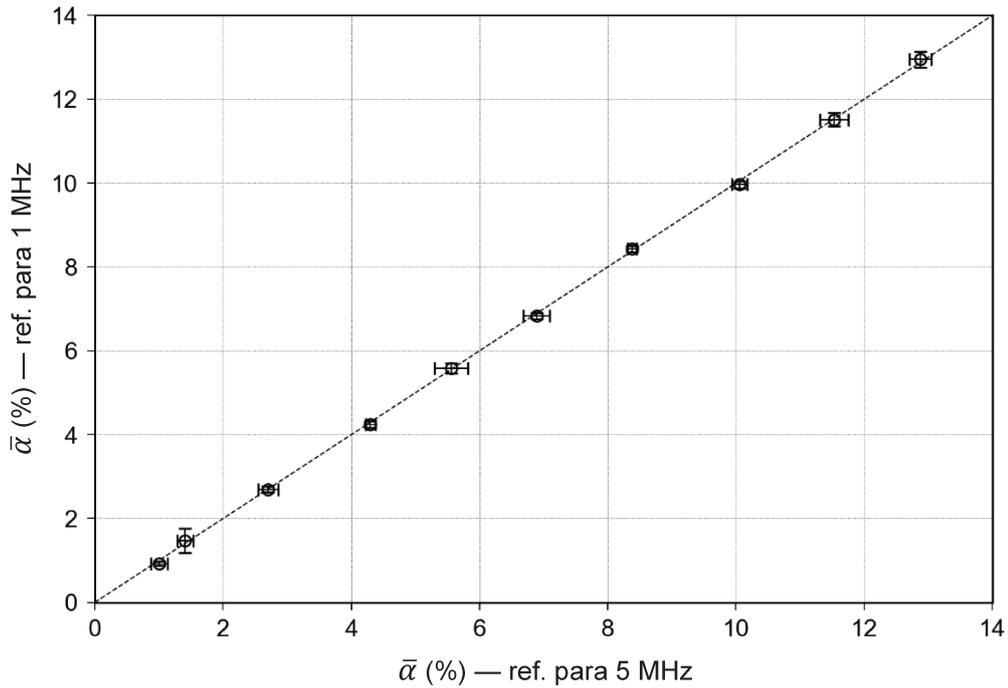


**Figura 25** — Frações de vazio via sistema de referência, sob vazão nominal de líquido constante e igual a 8,6 LPM e temperatura entre 23 e 23,5 °C. Resultados atrelados às investigações com os transdutores de 5 MHz



Os resultados disponíveis nas Figuras 24 e 25 estão coerentes com a literatura, visto que sob a condição de vazão de líquido constante o incremento da vazão de gás acarreta no aumento da fração de vazio dos escoamentos líquido-gás verticais e ascendentes (JIA; BABATUNDE; WANG, 2015). Esses resultados também sugerem que são concordantes as frações de vazio mensuradas pelo sistema de referência para equivalentes condições de vazão nominal de gás e líquido, bem como de temperatura, conforme salienta a Figura 26. Além disso, é verificável que são relativamente baixas as incertezas associadas às medições de fração de gás livre via sistema de referência. Assim sendo, tais indícios corroboram com as observações disponíveis na literatura — Tang e Heindel (2006) e Simões-Moreira (2008) — sobre a adequabilidade do sistema adotado como referência nos experimentos, vide Seção 4.1.2, para realizar medições de fração de vazio atribuíveis como valores de referência.

**Figura 26** — Comparação entre as frações de vazio utilizadas como referência para as aquisições com os transdutores de 1 e 5 MHz



Concluindo, as discussões relativas aos resultados dispostos nesta seção indicam que foram consistentes os valores de fração de vazio mensurados e adotados como referência no estudo das relações entre essa variável hidrodinâmica e as variáveis ultrassônicas atreladas aos sinais de eco adquiridos via medições ultrassônicas dos escoamentos. As discussões sobre as relações supracitadas encontram-se adiante.

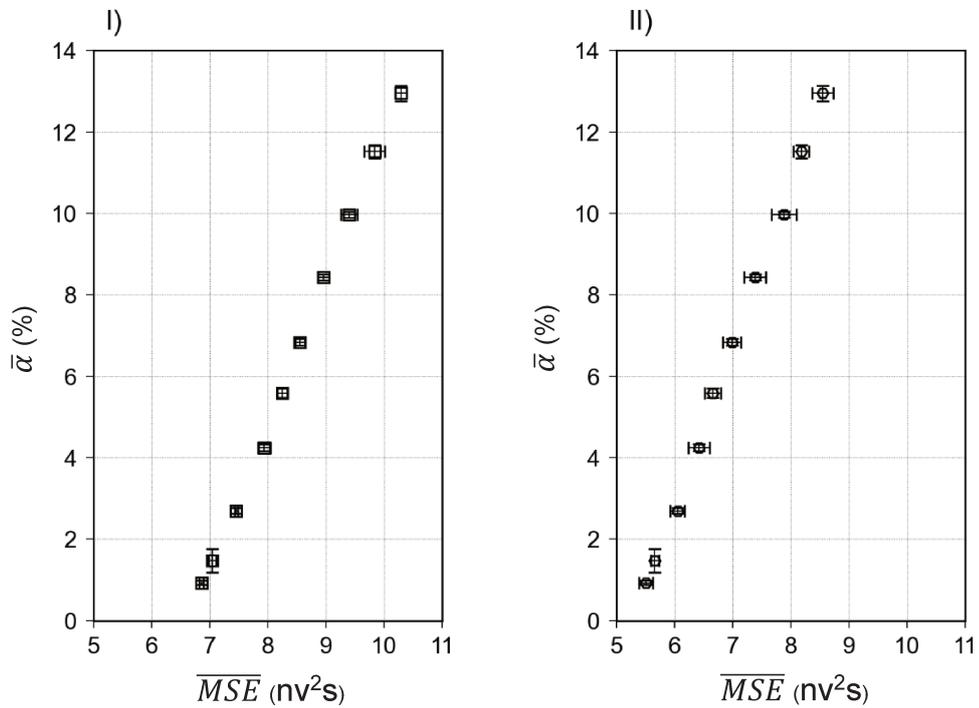
## 5.2 Relações entre a fração de vazio e as variáveis ultrassônicas

Estão evidenciadas a seguir as relações entre a fração de vazio, mensurada pelo sistema de referência, e as variáveis ultrassônicas oriundas dos distintos processamentos aplicados aos sinais de eco ultrassônico. As descrições dos processamentos aplicados aos sinais de eco encontram-se na Seção 4.4.

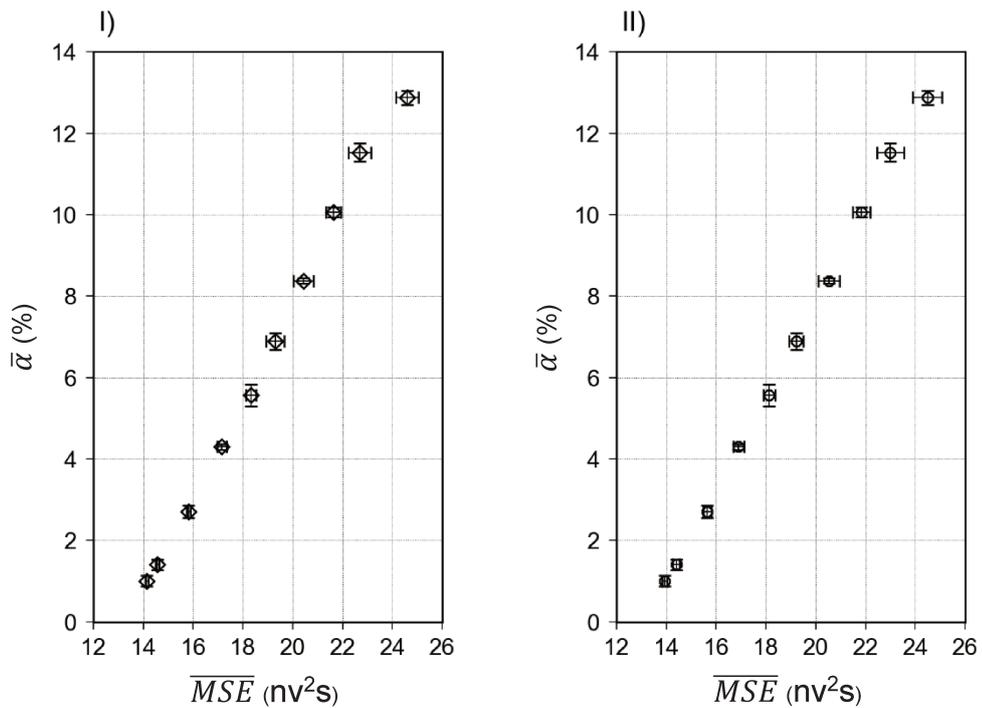
### 5.2.1 Variável $\bar{\alpha}$ em função da $\overline{MSE}$

Nas Figuras 27 e 28 a fração de vazio,  $\bar{\alpha}$ , inerente a cada condição investigada está associada à média dos sinais de energia dos ecos,  $\overline{MSE}$ . A Figura 27 contém resultados atrelados às medições com os transdutores de 1 MHz. Por sua vez, a Figura 28 dispõe resultados pertinentes às medições com os transdutores de 5 MHz.

**Figura 27** — Relações oriundas das aquisições com os transdutores de 1 MHz. O gráfico I) contém os resultados atrelados às medições executadas via estação 1, e o gráfico II) dispõe os resultados pertinentes às medições realizadas via estação 2



**Figura 28** — Relações oriundas das aquisições com os transdutores de 5 MHz. O gráfico I) contém os resultados atrelados às medições executadas via estação 1, e o gráfico II) dispõe os resultados pertinentes às medições realizadas via estação 2



Os resultados disponíveis nas Figuras 27 e 28 são concordantes em um ponto: é crescente a relação entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{MSE}$ . Tal fato está associado ao modo como foram utilizados os transdutores ultrassônicos e com a hidrodinâmica dos escoamentos investigados experimentalmente. Nos experimentos, os transdutores foram configurados no modo pulso-eco, isto é, o transdutor que emite os pulsos também recebe os sinais de eco. Ademais, é factível que o incremento no valor da fração de vazio corresponde ao aumento da quantidade de bolhas distribuídas na seção transversal da tubulação. Logo, o incremento da fração de gás livre eleva a probabilidade de ocorrência de reflexões nos pulsos ultrassônicos propagados nos escoamentos e, devido a isso, a quantidade e intensidade dos ecos adquiridos pelos transdutores tende a aumentar. Por sua vez, o acréscimo na quantidade e intensidade dos ecos adquiridos eleva o valor da média dos sinais de energia dos ecos. Posto isso, os resultados sugerem que há real incremento na quantidade de ecos adquiridos pelos transdutores à medida que aumenta a fração de vazio nos escoamentos, visto que é crescente a relação entre  $\bar{\alpha}$  e  $\overline{MSE}$ . A tendência crescente entre essas variáveis também foi observada no estudo desenvolvido por Figueiredo (2020).

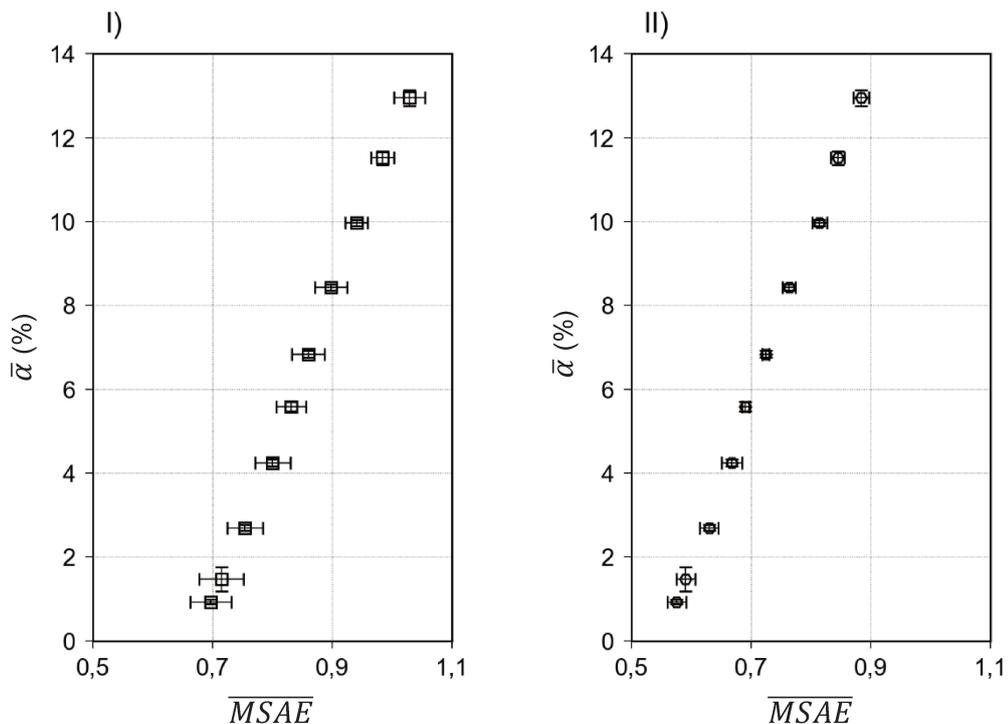
Apesar da similaridade quanto à relação crescente entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{MSE}$ , as medições com transdutores de diferentes frequências centrais resultaram em divergentes valores de  $\overline{MSE}$  para correspondentes valores de  $\bar{\alpha}$ , vide Figuras 27 e 28. Sugere-se que tal comportamento está associado aos diferentes ganhos adotados para esses transdutores na configuração dos parâmetros de aquisição ultrassônica. Visto que esse parâmetro de aquisição eleva a amplitude dos ecos, é justificável que os maiores valores de  $\overline{MSE}$  estejam atrelados às medições com 5 MHz em comparação com 1 MHz, dado que o ganho adotado para os transdutores de maior frequência central foi superior ao escolhido para os transdutores menor frequência central, vide item 4.1.1. Além disso, para as medições com os transdutores de 1 MHz é perceptível que para similares condições de escoamento, isto é, semelhantes valores de  $\bar{\alpha}$ , são correspondentes e não iguais entre si os valores de  $\overline{MSE}$  oriundos das estações de medição 1 e 2, conforme evidencia a Figura 27. Sugere-se que essa dissemelhança está atrelada ao somatório de diversos fatores, tais como a variações na condição do acoplamento acústico entre o transdutor e a linha de atraso, perdas de transmissão distintas por meio dos cabos ultrassônicos que conectam os transdutores à placa de aquisição ultrassônica, como também ao possível desgaste

associado ao tempo de uso desses transdutores que pode acarretar na atenuação da similaridade entre as medições realizadas por esses dispositivos de idêntica frequência central nominal.

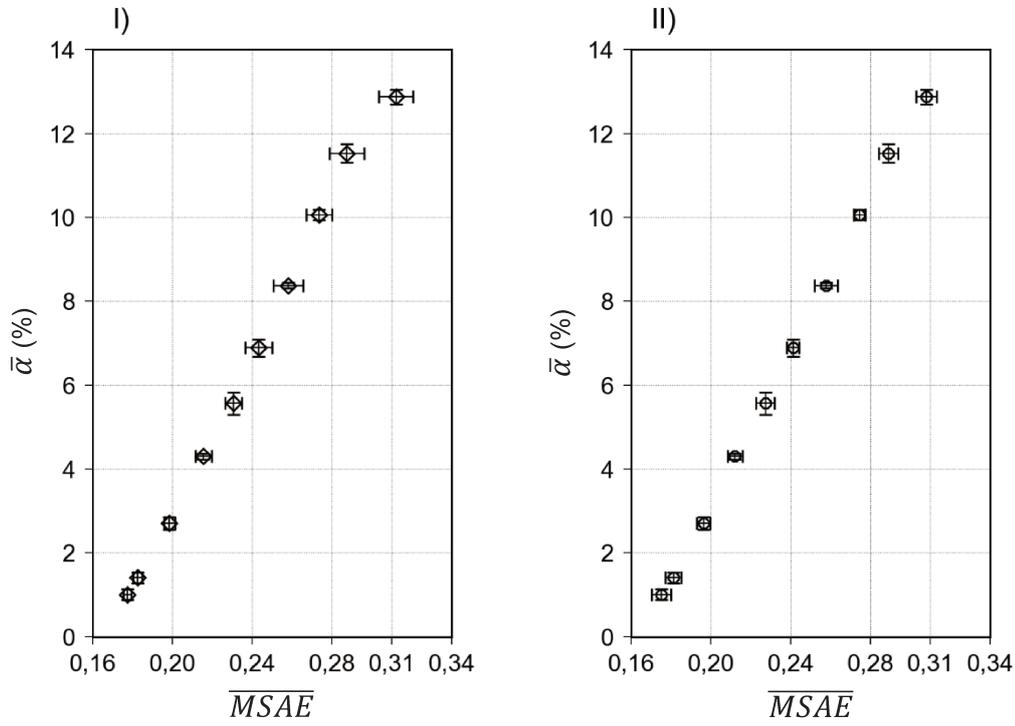
### 5.2.2 Variável $\bar{\alpha}$ em função da $\overline{MSAE}$

Conforme ilustram as Figuras 29 e 30, o comportamento crescente da  $\bar{\alpha}$  em função da  $\overline{MSAE}$  é correspondente ao observado no estudo das relações estabelecidas entre a variável hidrodinâmica supracitada e a  $\overline{MSE}$ , vide Seção 5.2.1. Essa similaridade é justificável, visto que a  $\overline{MSAE}$  é definida de modo semelhante à  $\overline{MSE}$ , bem como calculada mediante o uso dos mesmos sinais de eco oriundos das reflexões dos pulsos ultrassônicos na interface água-ar dos escoamentos investigados. A diferença no cômputo desses parâmetros reside apenas no procedimento de normalização dos sinais de eco por suas respectivas reflexões na interface sólido-escoamento e, conforme expõe a Seção 4.4.2, tal normalização foi realizada apenas no cálculo da  $\overline{MSAE}$ .

**Figura 29** — Relações estabelecidas entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{MSAE}$  atreladas às medições com os transdutores de 1 MHz. O gráfico I) contém os resultados pertinentes às medições executadas via estação 1, e o gráfico II) dispõe os resultados referentes às medições realizadas via estação 2



**Figura 30** — Relações estabelecidas entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{MSAE}$  atreladas às medições com os transdutores de 5 MHz. O gráfico I) contém os resultados pertinentes às medições executadas via estação 1, e o gráfico II) dispõe os resultados referentes às medições realizadas via estação 2

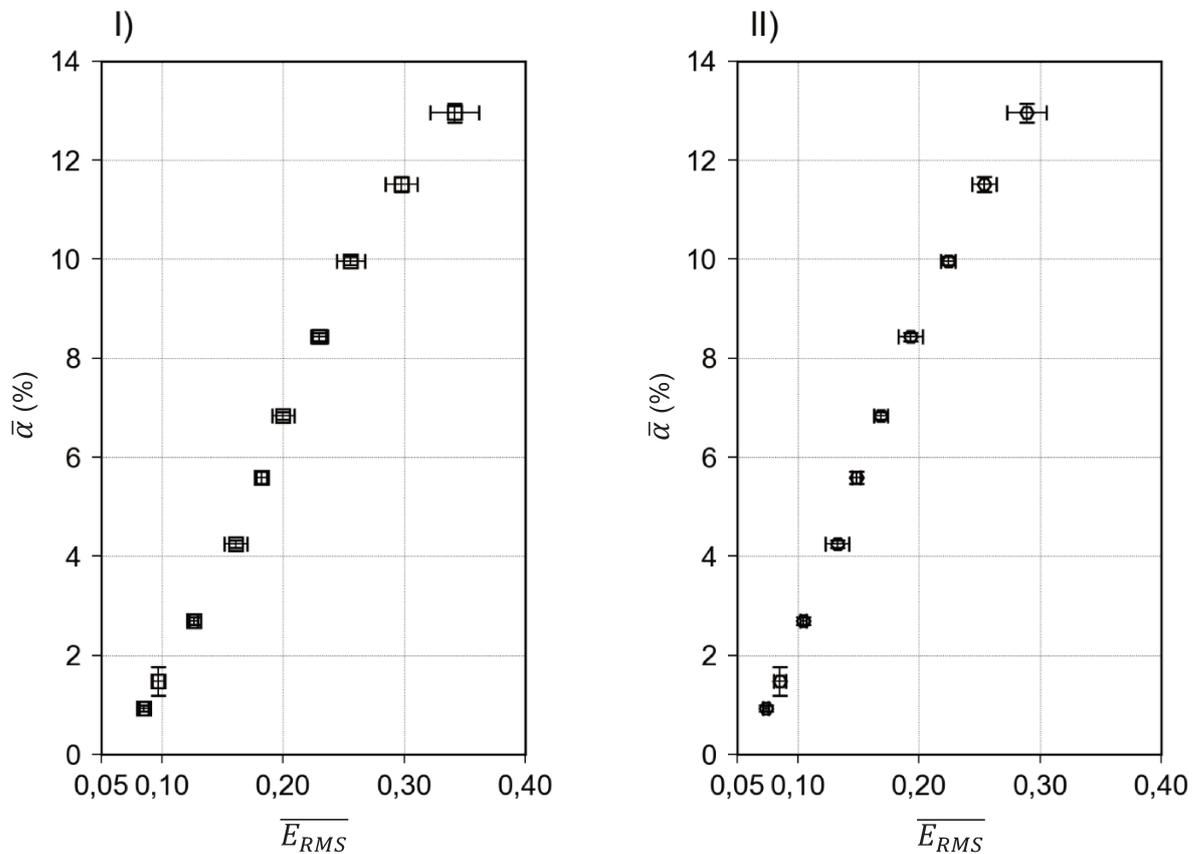


As Figuras 29 e 30 também informam que os valores de  $\overline{MSAE}$  para as aquisições com 1 MHz são superiores aos atrelados às medições com 5 MHz. Tal comportamento é oposto ao observado para as relações estabelecidas entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{MSE}$ , vide Seção 5.2.1. Sugere-se que esse comportamento está atrelado à frequência central dos transdutores. É plausível que os pulsos ultrassônicos emitidos pelos transdutores de 5 MHz foram atenuados com maior intensidade do que os emitidos pelos de 1 MHz. Tal afirmação está baseada no seguinte fato: a dissipação das ondas acústicas em meio fluido cresce com o aumento da frequência de propagação da onda (KINSLER *et al.*, 1982a). Logo, uma vez que o procedimento de normalização dos sinais de eco para cômputo da  $\overline{MSAE}$  coloca as aquisições com os transdutores de 1 e 5 MHz em uma escala comum, na qual os efeitos do ganho são minorados, torna-se então perceptível, mediante o uso dessa variável ultrassônica, o efeito do aumento da frequência de propagação na amplitude dos pulsos ultrassônicos emitidos nos escoamentos, segundo evidenciam as Figuras 29 e 30.

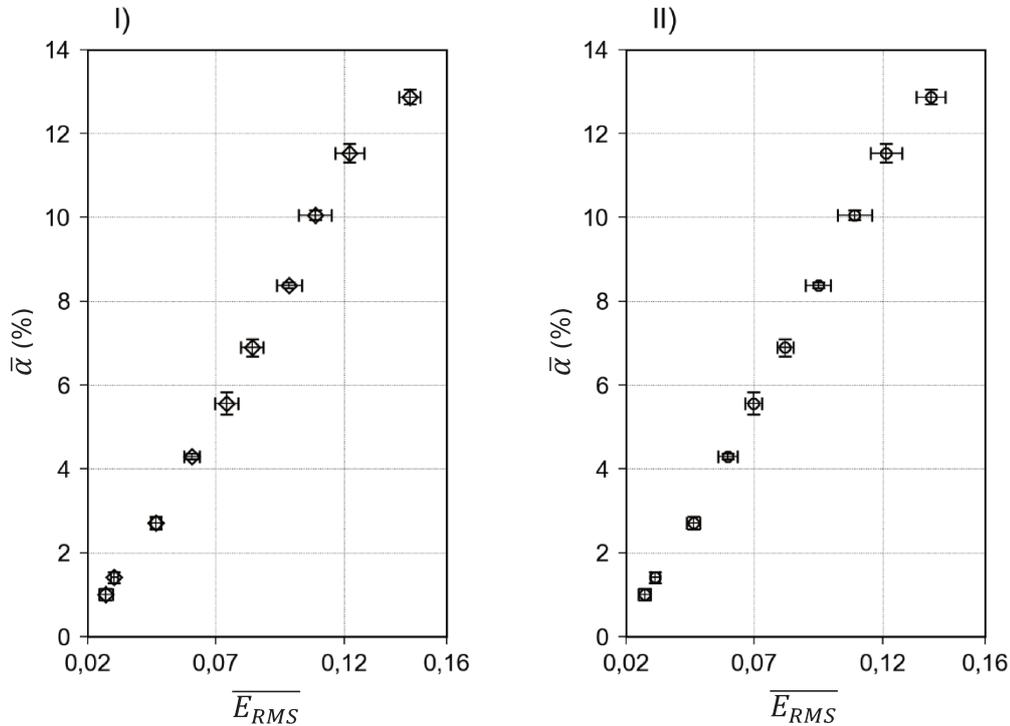
### 5.2.3 Variável $\bar{\alpha}$ em função da $\overline{E_{RMS}}$

Encontram-se nas Figuras 31 e 32 as relações entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{E_{RMS}}$ . A Figura 31 dispõe resultados pertinentes às medições com os transdutores de 1 MHz, e a Figura 32 contém resultados atrelados às medições com os transdutores de 5 MHz. De modo análogo ao observado nas Seções 5.2.1 e 5.2.2, as Figuras 31 e 32 evidenciam a existência de relação crescente entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{E_{RMS}}$ .

**Figura 31** — Relações estabelecidas entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{E_{RMS}}$  pertinentes às medições com os transdutores de 1 MHz. O gráfico I) contém os resultados atrelados às medições executadas via estação 1, e o gráfico II) dispõe os resultados referentes às medições realizadas via estação 2



**Figura 32** — Relações estabelecidas entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{E_{RMS}}$  atreladas às medições com os transdutores de 5 MHz. O gráfico I) contém os resultados atrelados às medições executadas via estação 1, e o gráfico II) dispõe os resultados referentes às medições realizadas via estação 2

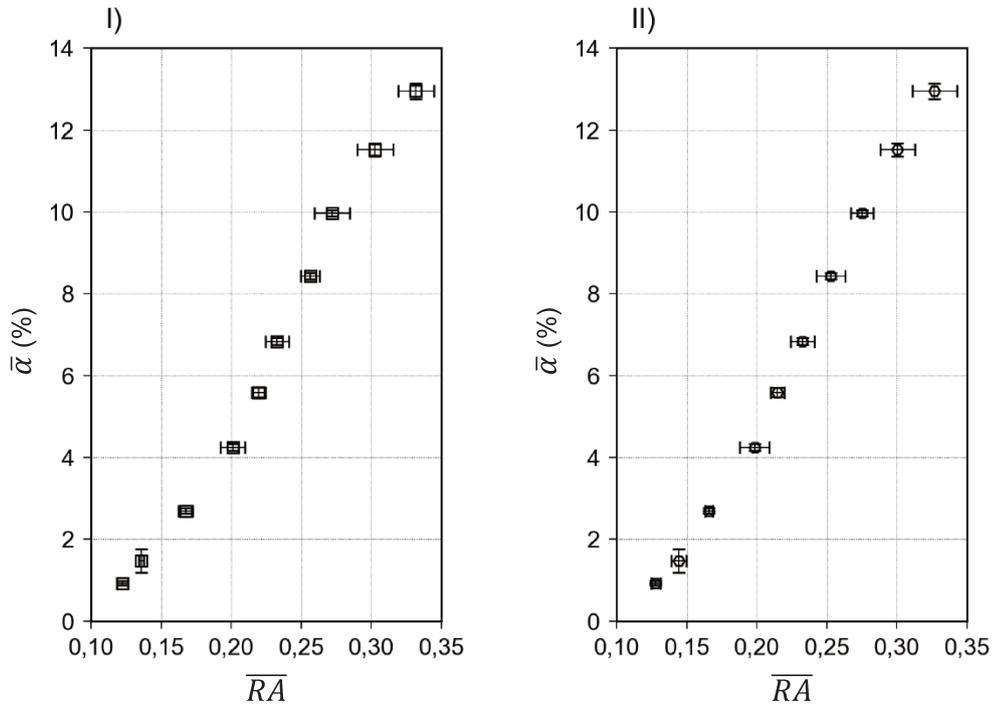


A variável  $\overline{E_{RMS}}$  expressa a magnitude das flutuações existentes nos sinais adimensionais de energia dos ecos e, por conseguinte, a magnitude das flutuações na quantidade e amplitude das reflexões dos pulsos ultrassônicos na interface líquido-gás. Devido à sua definição, é plausível que os maiores valores de  $\overline{E_{RMS}}$  estejam atrelados às maiores  $\bar{\alpha}$ , visto que o aumento na quantidade de bolhas — refletores dos pulsos ultrassônicos — na seção transversal da tubulação eleva a probabilidade de interação entre tais bolhas e, conseqüentemente, aumenta a possibilidade de ocorrência de flutuações na distribuição espacial desses refletores de pulsos ultrassônicos na linha de medição ultrassônica.

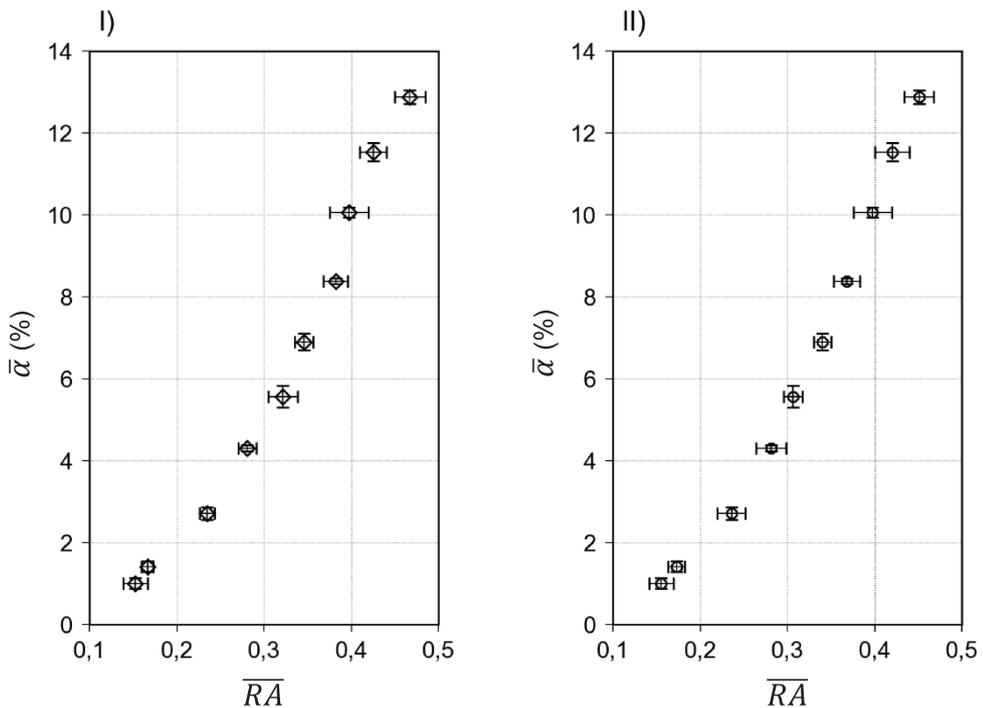
#### 5.2.4 Variável $\bar{\alpha}$ em função da $\overline{RA}$

Conforme evidenciam as Figuras 33 e 34, sob condição de similar frequência central são semelhantes as relações estabelecidas entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$  atreladas a diferentes estações de medição ultrassônica. Para as demais relações, em evidência a partir da Seção 5.2.1, tal comportamento, ora exposto, é perceptível apenas nas relações pertinentes às medições com os transdutores de 5 MHz.

**Figura 33** — Relações entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$  concernentes às medições com os transdutores de 1 MHz. O gráfico I) contém os resultados pertinentes às medições realizadas por meio da estação 1, e o gráfico II) dispõe os resultados referentes às medições realizadas por meio da estação 2

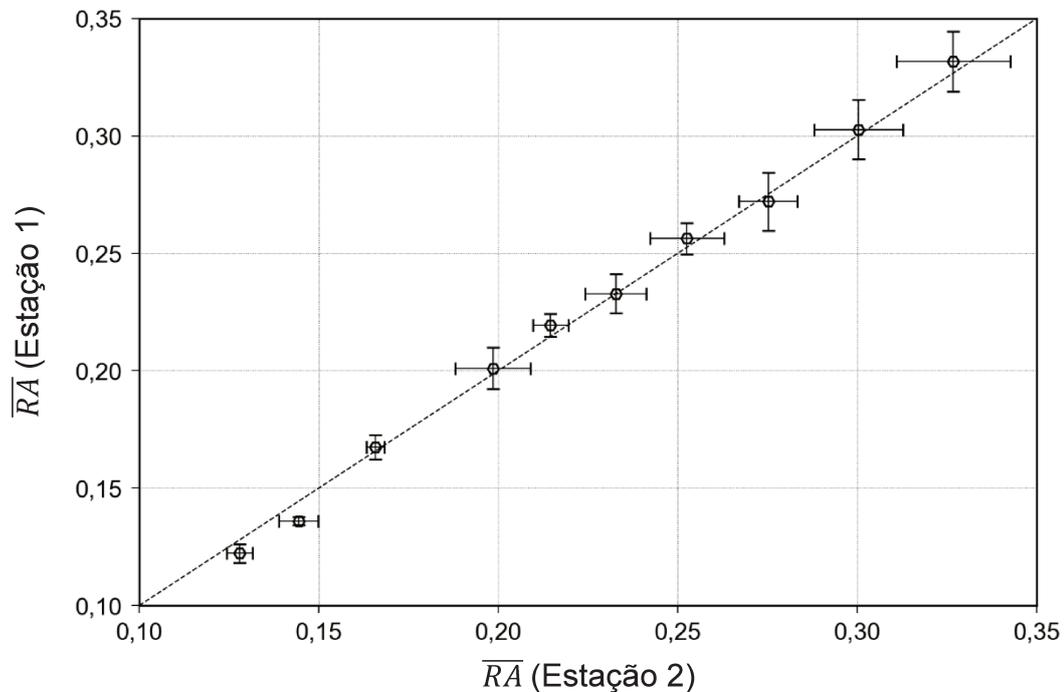


**Figura 34** — Relações entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$  pertinentes às medições com os transdutores de 5 MHz. O gráfico I) contém os resultados atrelados às medições realizadas por meio da estação 1, e o gráfico II) dispõe os resultados referentes às medições realizadas por meio da estação 2

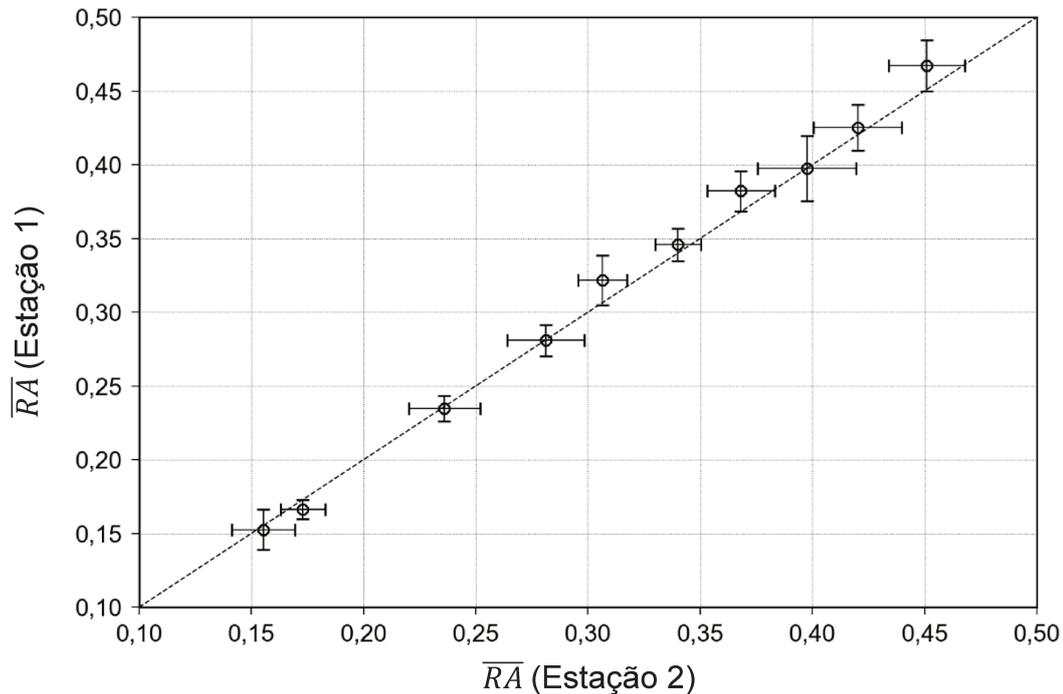


A variável  $\overline{RA}$  é uma medida relativa e significa, em suma, a razão entre a magnitude das flutuações na concentração e distribuição espacial das bolhas e a tendência central dessas características hidrodinâmicas em uma dada condição de escoamento. Segundo sugerem os resultados das Seções 5.2.1 e 5.2.2, a tendência central dessas características hidrodinâmicas é captada por ambas as estações de medição ultrassônica, em termos quantitativos, de modo correspondente, contudo, não necessariamente igual. Além disso, é também plausível que ambas as estações de medição captem, de forma correspondente e não inevitavelmente igual, possíveis flutuações tanto na concentração quanto na distribuição espacial dos refletores dos pulsos ultrassônicos, as bolhas, na seção transversal da tubulação, conforme sugerem os resultados da Seção 5.2.3. Logo, devido à definição da variável  $\overline{RA}$  em combinação com a correspondência entre os sinais de eco adquiridos mediante as estações 1 e 2, apresenta-se como válida a similaridade entre os valores dessa variável ultrassônica atrelados a diferentes estações de medição, contudo, pertinentes à mesma condição de escoamento. Para fins comparativos, as Figuras 35 e 36 confrontam os resultados da  $\overline{RA}$  pertinentes a diferentes estações de medição.

**Figura 35** — Comparação entre os valores da razão adimensional para as aquisições com os transdutores de 1 MHz



**Figura 36** — Comparação entre os valores da razão adimensional para as aquisições com os transdutores de 5 MHz



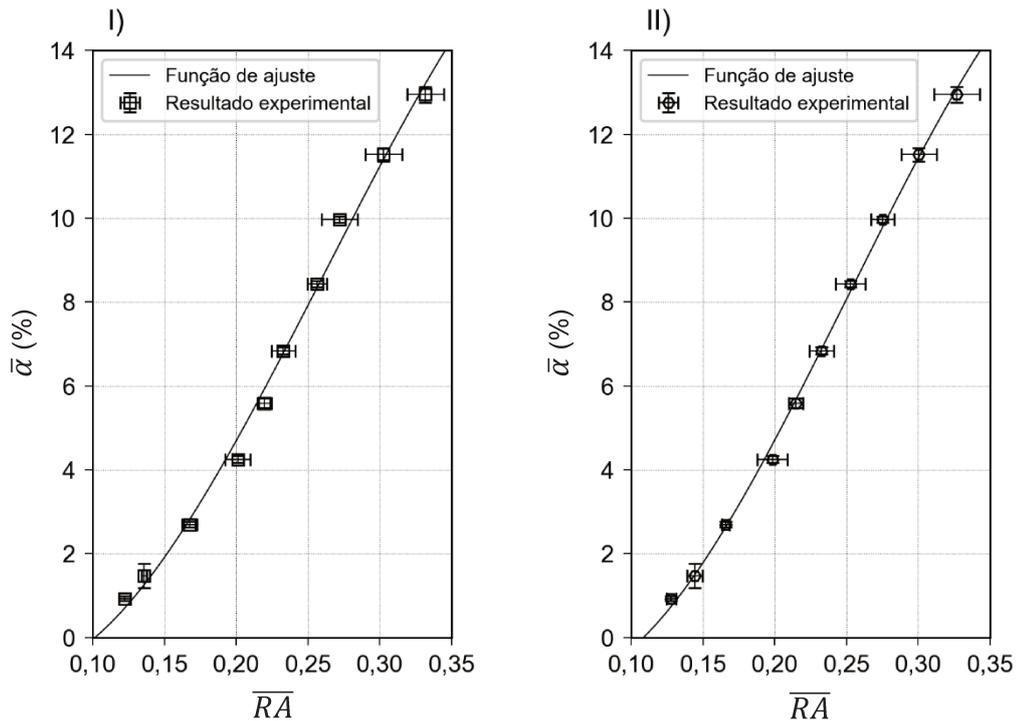
### 5.2.5 Conclusões sobre as relações experimentais e definição das funções para estimativa da fração de vazio

Os resultados explicitados previamente sugerem que são plausíveis todas as relações estabelecidas entre a variável hidrodinâmica fração de vazio e as diversas variáveis ultrassônicas apresentadas. Contudo, apenas a variável  $\overline{RA}$  foi selecionada para criação das funções para estimativa da fração de vazio dos escoamentos água-ar investigados experimentalmente. Considera-se razoável a seleção dessa variável ao invés das demais em razão do significado físico que ela possui, bem como devido ao seguinte fato: as mensurações ultrassônicas via distintas estações de medição resultam em similares valores de  $\overline{RA}$  para uma mesma condição de escoamento, tanto para as aquisições com os transdutores de 1 MHz quanto para as aquisições com os de 5 MHz.

A criação das funções para estimativa da fração de vazio foi realizada mediante o ajuste de curvas aplicado às relações previamente discutidas entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$ . Tal ajuste foi realizado mediante o uso do método de mínimos quadrados não lineares. Ademais, foi adotado o modelo de função polinomial cúbico no procedimento de ajuste, uma vez que em análise preliminar o uso dessa função decorreu em melhor ajuste de curva do que os obtidos com os modelos linear, quadrático, exponencial e

sigmoidal. Assim sendo, nas Figuras 37 e 38 encontram-se explicitadas graficamente as funções de ajuste obtidas, bem como os valores experimentais das variáveis relacionadas. Por sua vez, as expressões analíticas dessas funções encontram-se entre as Tabelas 7 e 8.

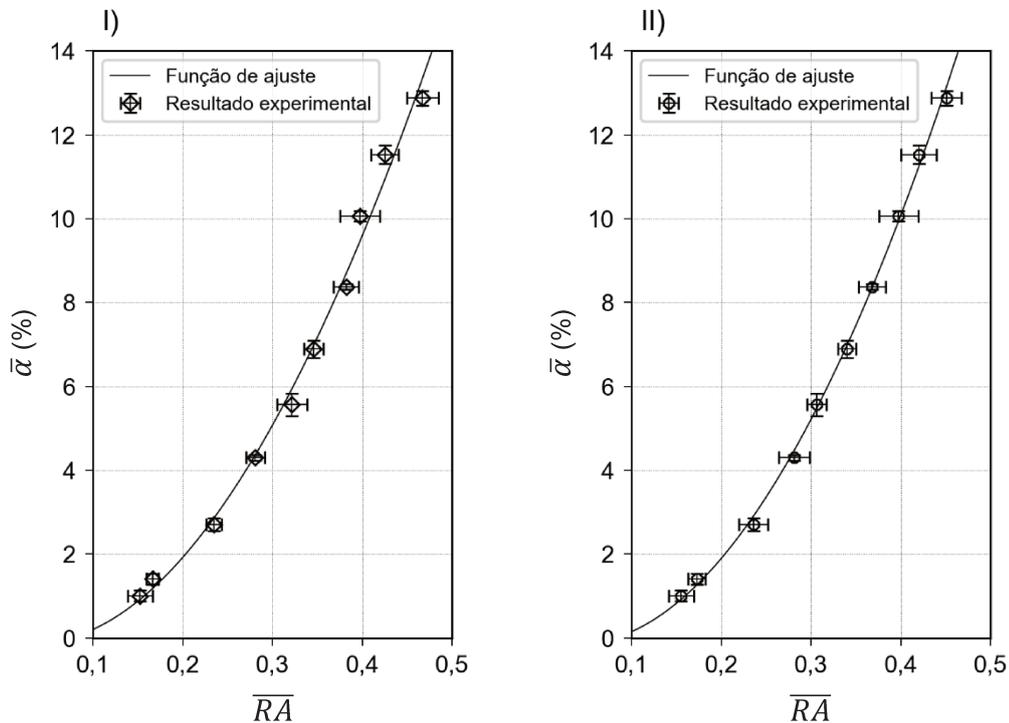
**Figura 37** — Funções de ajuste para as relações estabelecidas entre  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$ . O gráfico I) está atrelado às medições realizadas com 1 MHz na estação 1, e o gráfico II) está vinculado às medições realizadas com 1 MHz na estação 2



**Tabela 7** — Expressões analíticas das funções de ajuste para as relações estabelecidas entre  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$  atreladas às medições realizadas com 1 MHz

Estação de medição ultrassônica	Função de ajuste	$R^2$
1	$\bar{\alpha} = (-497,29)\overline{RA}^3 + (388,58)\overline{RA}^2 + (-34,37)\overline{RA}$	0,994
2	$\bar{\alpha} = (-583,58)\overline{RA}^3 + (437,61)\overline{RA}^2 + (-40,65)\overline{RA}$	0,998

**Figura 38** — Funções de ajuste para as relações estabelecidas entre  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$ . O gráfico I) está atrelado às medições realizadas com 5 MHz na estação 1, e o gráfico II) está vinculado às medições realizadas com 5 MHz na estação 2



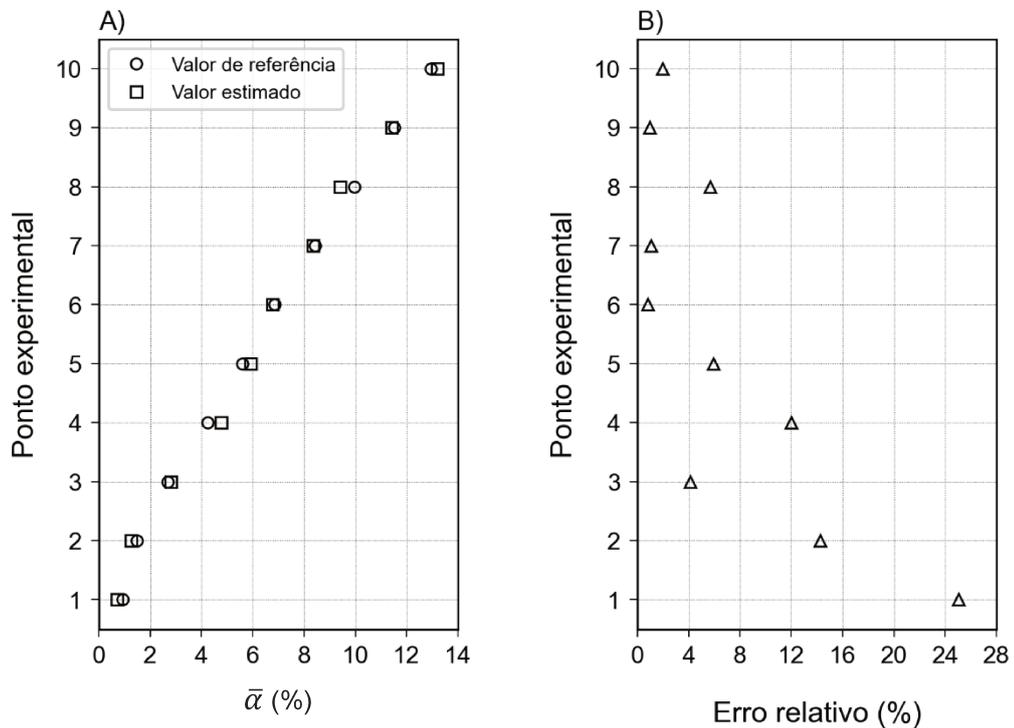
**Tabela 8** — Expressões analíticas das funções de ajuste para as relações estabelecidas entre  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$  atreladas às medições realizadas com 5 MHz

Estação de medição ultrassônica	Função de ajuste	$R^2$
1	$\bar{\alpha} = (-12,88)\overline{RA}^3 + (79,62)\overline{RA}^2 + (-5,82)\overline{RA}$	0,992
2	$\bar{\alpha} = (-4,07)\overline{RA}^3 + (81,02)\overline{RA}^2 + (-6,58)\overline{RA}$	0,998

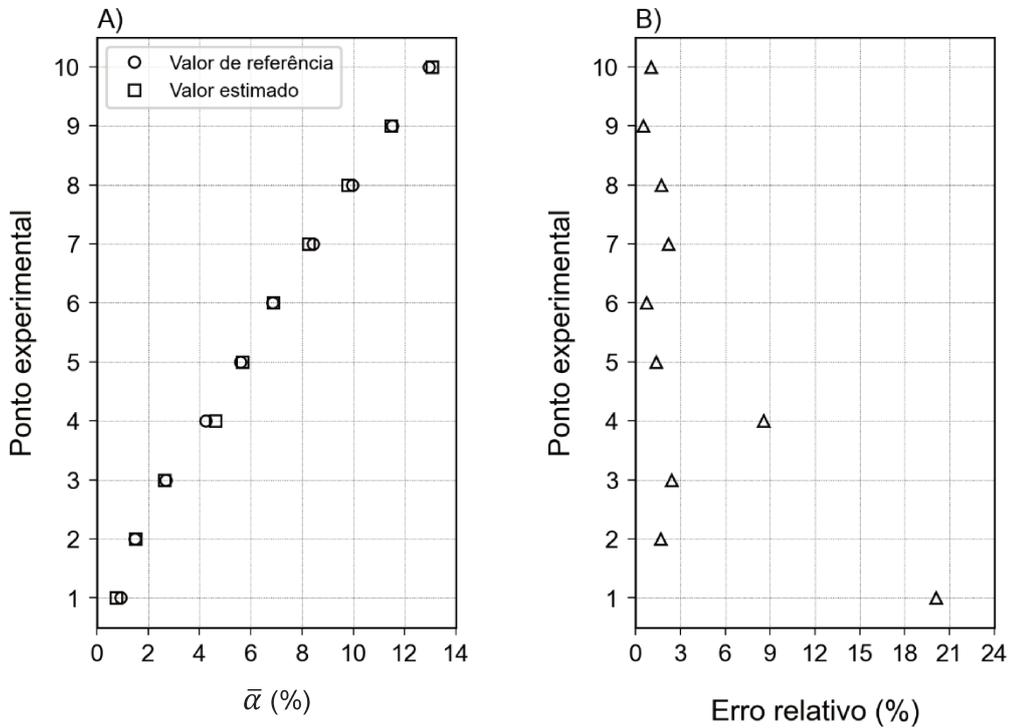
Os resultados dispostos nas Figuras 37 e 38 indicam que foram adequados os ajustes de curva. A adequabilidade desses ajustes de curva é também sugerida pelo valor de  $R^2$  superior a 0,9 para todos os casos avaliados, conforme evidenciam as Tabelas 7 e 8. Tal coeficiente de determinação foi calculado por meio da Equação 20. Ademais, os valores de erro relativo pertinentes às estimativas da fração de vazio mediante o uso das funções de ajuste estão disponíveis nos gráficos 39, 40, 41 e 42. Ao analisar tais gráficos, é plausível afirmar que as funções de ajuste, ora explicitadas, são capazes de quantificar frações de vazio no intervalo de 1,5–13% associadas a erros relativo inferiores a 6%, independente da frequência central utilizada, bem como

da estação de medição ultrassônica. Diante dessas informações, propõem-se que, para uma dada frequência central, o acoplamento de uma única função para estimativa da fração de vazio —  $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}(\overline{RA})$  — com medições ultrassônicas provenientes de um único transdutor emissor-receptor é um método aplicável para realizar medições não invasivas da  $\bar{\alpha}$  de escoamentos água-ar no regime bolhas.

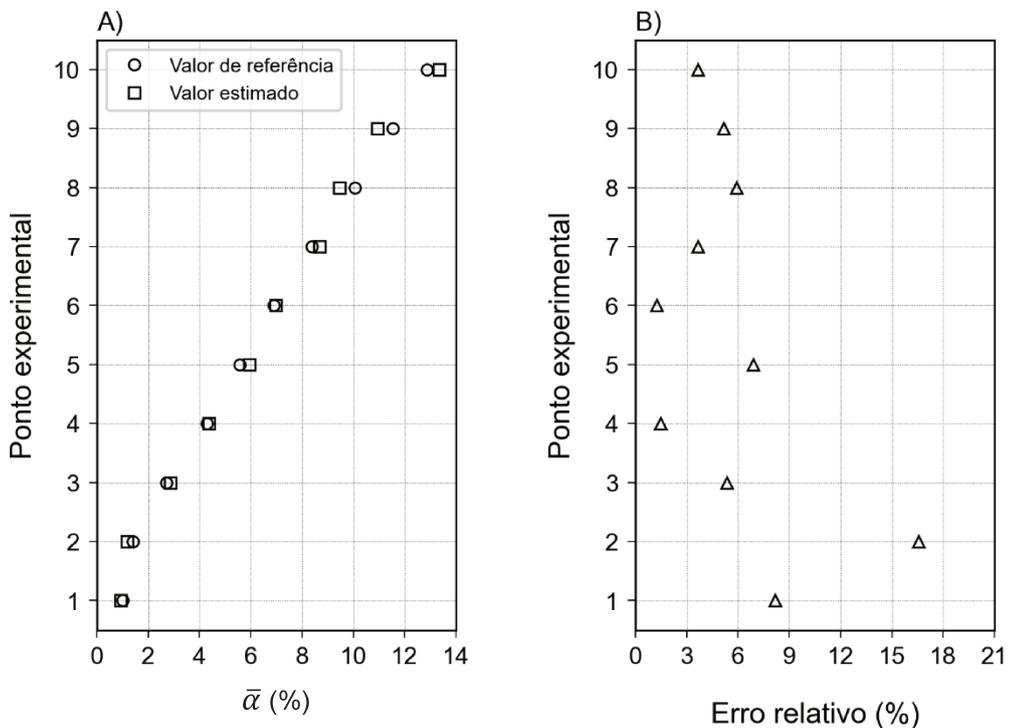
**Figura 39** — O gráfico A) compara a  $\bar{\alpha}$  via função de ajuste com a referência. O gráfico B) corresponde ao erro relativo. As aquisições são referentes às medições na estação 1 com o transdutor de 1 MHz



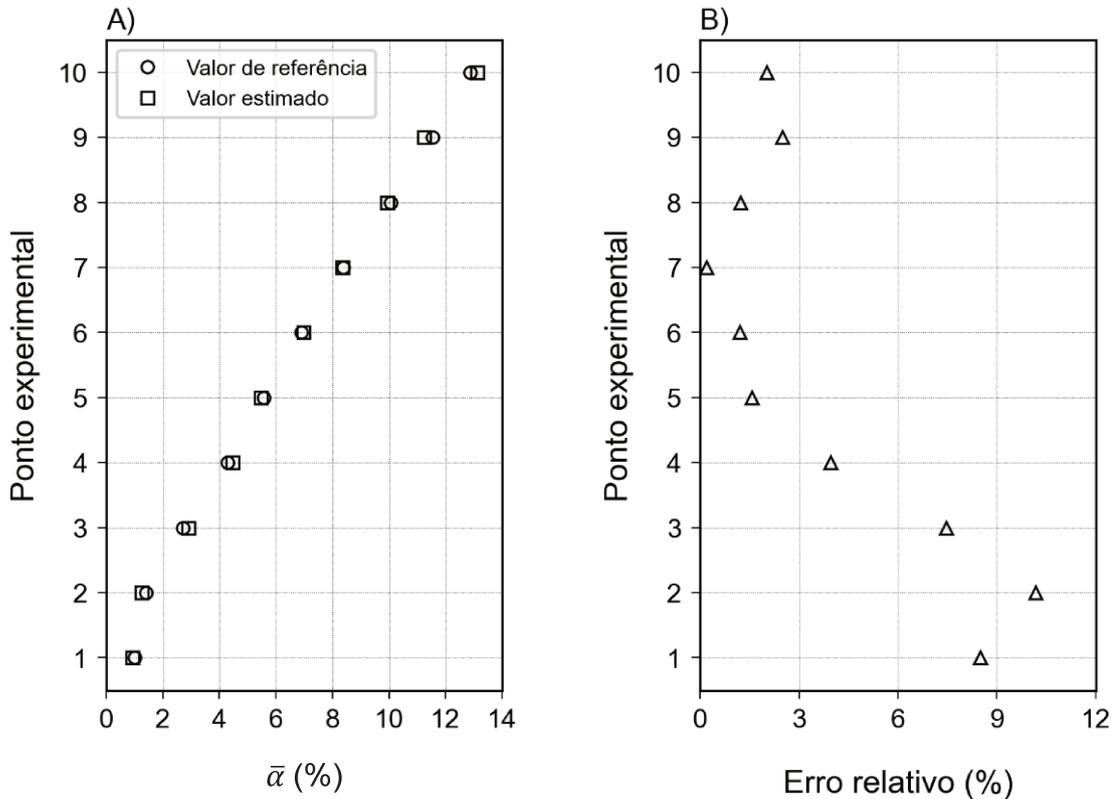
**Figura 40** — O gráfico A) compara a  $\bar{\alpha}$  via função de ajuste com a referência. O gráfico B) corresponde ao erro relativo. As aquisições são referentes às medições na estação 2 com o transdutor de 1 MHz



**Figura 41** — O gráfico A) compara a  $\bar{\alpha}$  via função de ajuste com a referência. O gráfico B) corresponde ao erro relativo. As aquisições são referentes às medições na estação 1 com o transdutor de 5 MHz



**Figura 42** — O gráfico A) compara a  $\bar{\alpha}$  via função de ajuste com a referência. O gráfico B) corresponde ao erro relativo. As aquisições são referentes às medições na estação 2 com o transdutor de 5 MHz

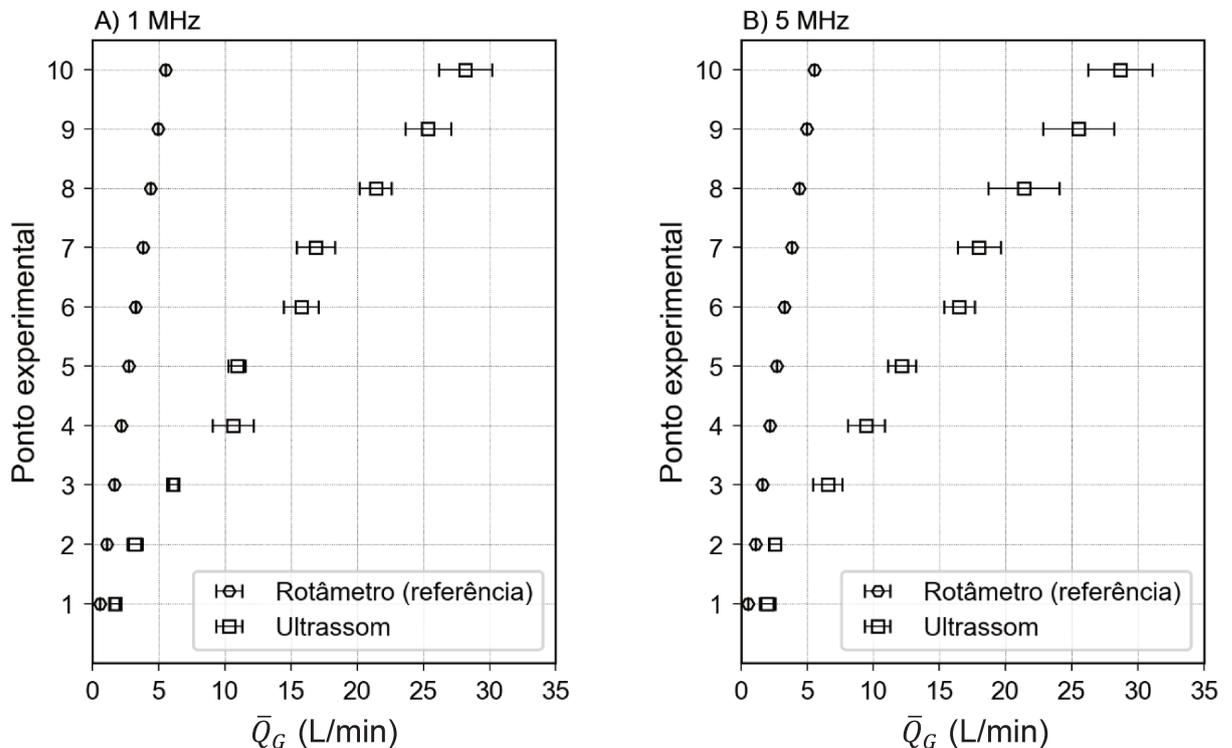


Por fim, vale ressaltar que os resultados presentes nas Figuras 39, 40, 41 e 42 indicam que ambas as frequências centrais, isto é, 1 e 5 MHz, são similares em desempenho quanto à determinação da fração de vazio dos escoamentos líquido-gás investigados experimentalmente. Logo, para as condições de escoamento averiguadas, não foram relevantes ao ponto de acarretar em desempenhos diferentes em função da frequência central empregada os seguintes efeitos — o incremento na dissipação das ondas acústicas ao aumentar a frequência central do transdutor, como também a diminuição na resolução espacial axial e na faixa de diâmetro de bolhas detectáveis via ultrassom ao diminuir a frequência central do transdutor empregado nas medições.

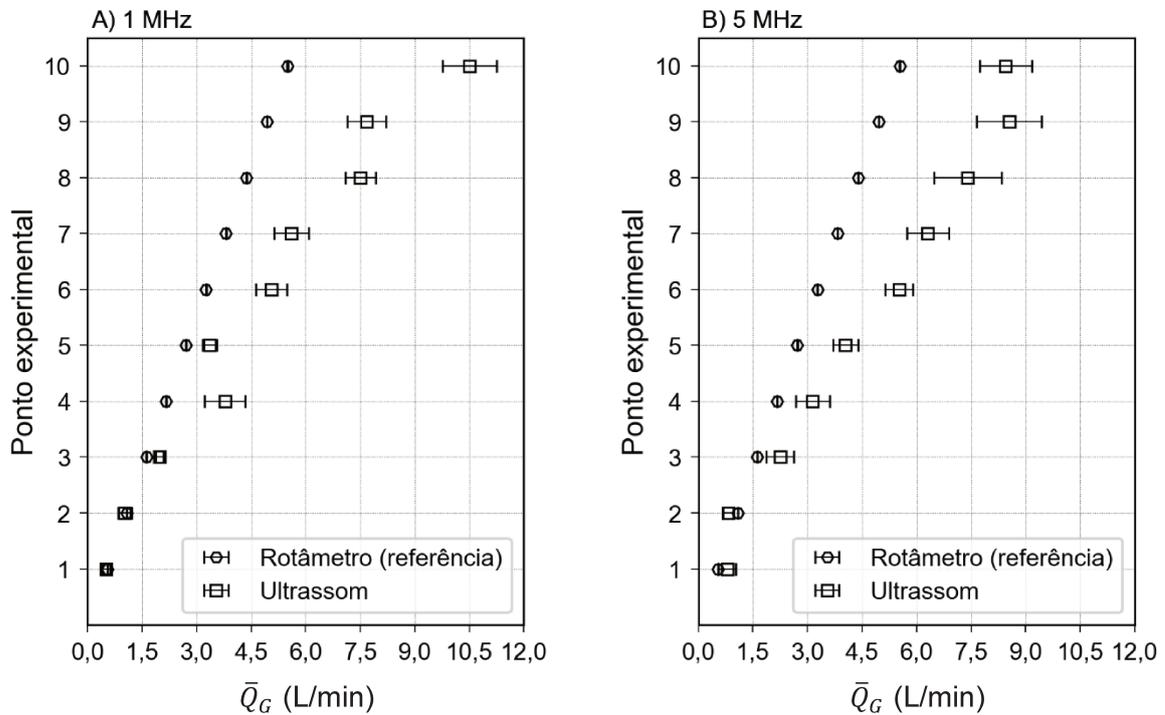
### 5.3 Estimativa da vazão da fase dispersa via medições ultrassônicas

As Figuras 43, 44 e 45 explicitam as estimativas da vazão da fase dispersa via medições ultrassônicas, segundo o método presente em 4.4.5, para as diversas condições de escoamento líquido-gás averiguadas experimentalmente. Os valores de vazão presentes nessas figuras correspondem à média aritmética das setes amostras de vazão estimadas via ultrassom por ponto experimental. Além disso, tais figuras também contêm os valores de referência, isto é, os valores médios de vazão de ar atrelados às medições com o rotâmetro.

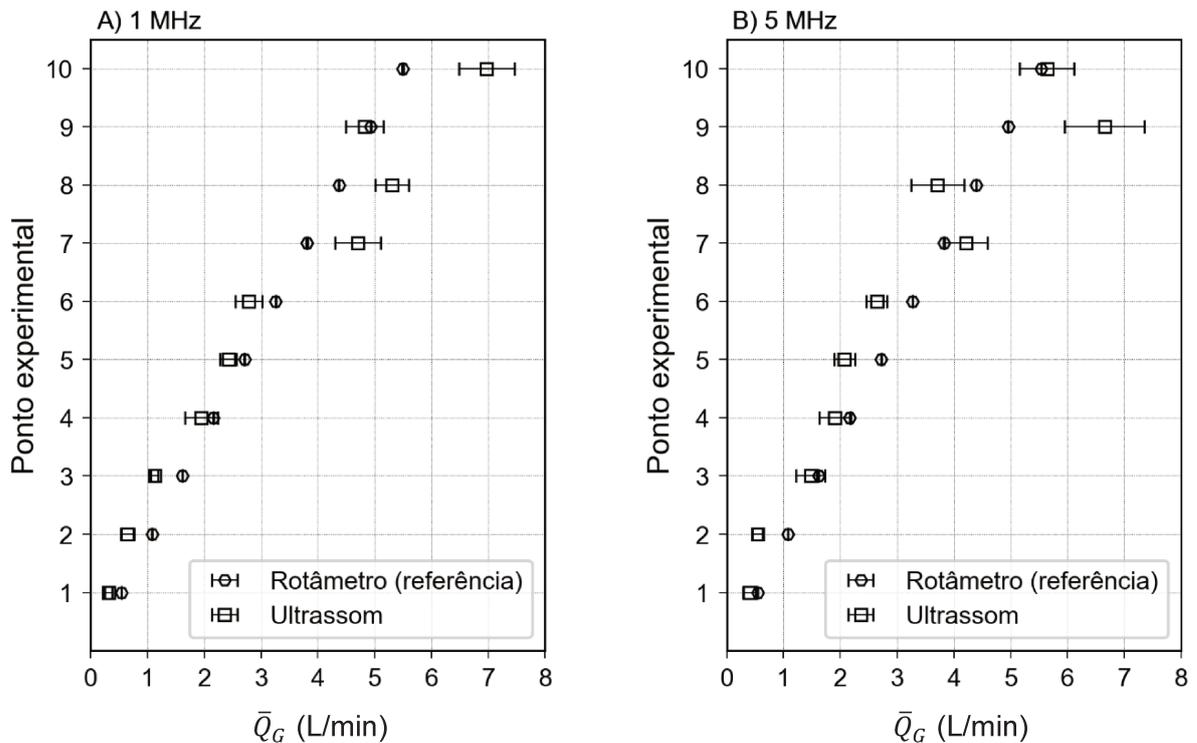
**Figura 43** — Estimativas da vazão de ar por ultrassom, sob condição de partição dos sinais adimensionais em segmentos com 500 pontos. O gráfico A) refere-se aos resultados atrelados às medições com frequência central de 1 MHz e o B) com 5 MHz



**Figura 44** — Estimativas da vazão de ar por ultrassom, sob condição de partição dos sinais adimensionais em segmentos com 1500 pontos. O gráfico A) refere-se aos resultados atrelados às medições com frequência central de 1 MHz e o B) com 5 MHz



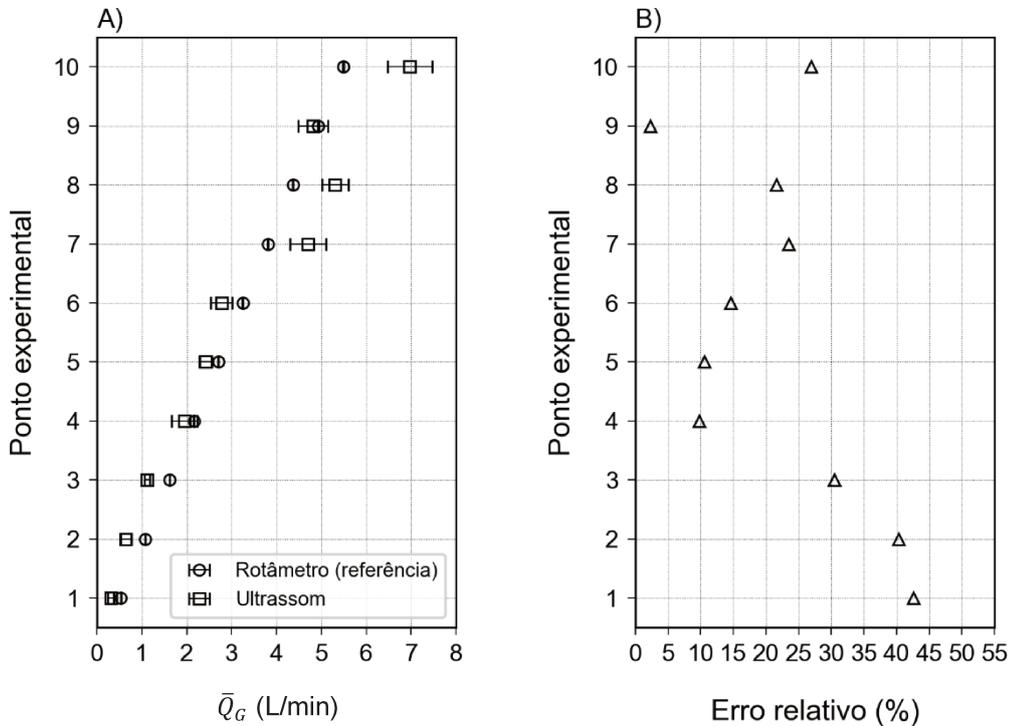
**Figura 45** — Estimativas da vazão de ar por ultrassom, sob condição de partição dos sinais adimensionais em segmentos com 2500 pontos. O gráfico A) refere-se aos resultados atrelados às medições com frequência central de 1 MHz e o B) com 5 MHz



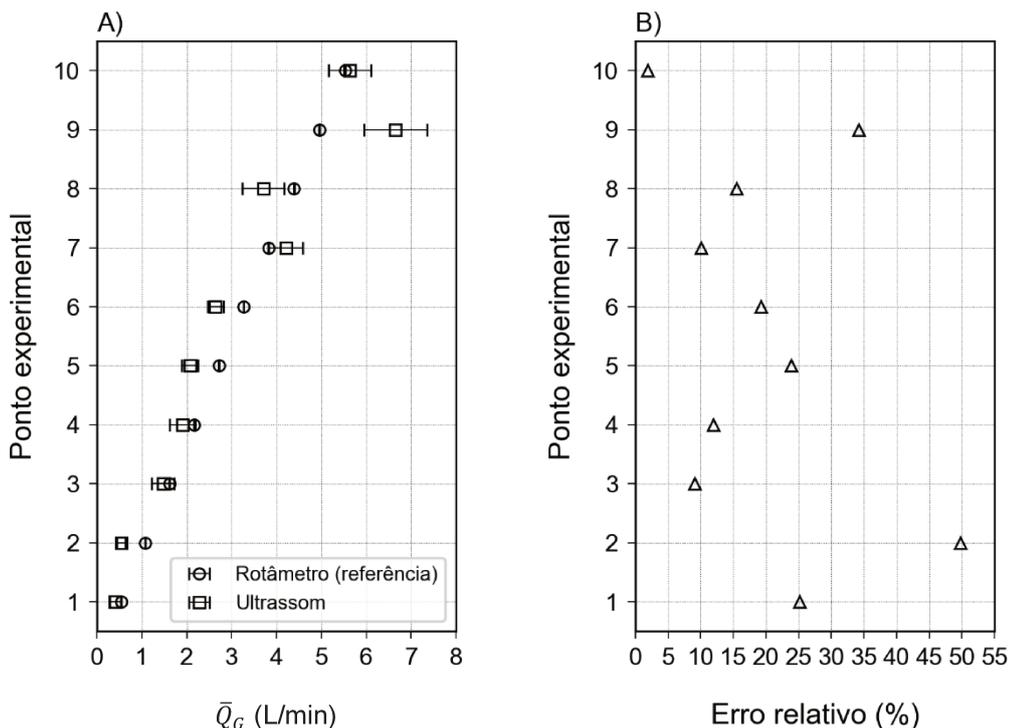
Em termos gerais, os resultados presentes nas Figuras 43, 44 e 45 sugerem que o método proposto para a estimativa da vazão da fase dispersa via medições ultrassônicas tem sensibilidade às variações de vazão de gás nos escoamentos água-ar investigados. Entretanto, nota-se o predomínio de valores de vazão de gás superestimados, via medições ultrassônicas, para os resultados nos quais os sinais adimensionais de energia foram particionados em segmentos com 500 e 1500 pontos, vide Figuras 43 e 44. Segundo Gurau, Vassallo e Keller (2004), há um número mínimo de eventos correspondentes que os sinais correlacionados devem possuir para que a resposta da correlação cruzada resulte no real atraso temporal entre tais sinais. Posto isso, sugere-se que os sinais adimensionais oriundos das estações 1 e 2 — particionados em segmentos com 500 e 1500 pontos — não contêm quantidade suficiente de eventos correspondentes para que a aplicação da correlação cruzada a tais sinais suceda no real atraso temporal entre eles.

Os resultados evidenciados na Figura 45 — relativos à estimativa da vazão sob condição de partição dos sinais em segmentos com 2500 pontos — apresentaram o melhor desempenho em relação àqueles explicitados nas Figuras 43 e 44. Assim sendo, os valores de erro relativo pertinentes aos resultados apresentados na Figura 45 encontram-se ilustrados nas Figuras 46 e 47. Os valores de erro explicitados nessas figuras indicam que as estimativas de vazão de gás via medições ultrassônicas diferem majoritariamente dos valores de referência no intervalo de 10–35%, tanto para as aquisições realizadas com os transdutores de 1 MHz quanto para as medições efetuadas com os transdutores de 5 MHz. Salienta-se que os altos valores de erro atrelados aos dois primeiros pontos experimentais (40–50%), tanto para 1 MHz quanto para 5 MHz, têm significativa contribuição dos valores de fração de vazão estimados mediante o método evidenciado em 5.2.5. A aplicação desse método na determinação dos valores de fração de vazão atrelados aos dois primeiros pontos experimentais decorreu em até 21% de erro relativo.

**Figura 46** — O gráfico A) compara os valores de  $\bar{Q}_G$  estimados via ultrassom com os valores de referência. O gráfico B) evidencia os valores de erro relativo. Os resultados são referentes às medições realizadas com os transdutores de 1 MHz, sob condição de partição dos sinais adimensionais em segmentos com 2500 pontos



**Figura 47** — O gráfico A) compara os valores de  $\bar{Q}_G$  estimados via ultrassom com os valores de referência. O gráfico B) expõe os valores de erro relativo. Os resultados são referentes às medições realizadas com os transdutores de 5 MHz, sob condição de partição dos sinais adimensionais em segmentos com 2500 pontos



Conjectura-se que as bolhas — refletores dos pulsos ultrassônicos — são passíveis de deformações morfológicas, bem como posicionais, ao escoarem entre a primeira e a segunda estação de medição ultrassônica. Logo, quando tais deformações ocorrem, dissimilaridades são introduzidas nos sinais adimensionais de energia oriundos das estações 1 e 2, visto que um mesmo conjunto de bolhas do escoamento bifásico apresenta-se sob diferentes formas para ambas as estações de medição ultrassônica. Ademais, a probabilidade de ocorrência dessas dissimilaridades é acentuada à medida que cresce a distância entre os pontos de tomada de sinais, conforme sugere Bertola (2014). Posto isso, é plausível a existência de quantidade proeminente de eventos dissimilares entre os sinais adimensionais de energia provenientes das estações 1 e 2, devido à distância espacial adotada entre tais estações de medição no carretel ultrassônico (110 mm). Portanto, sugere-se que a diminuição da distância entre os pontos de tomada de sinal no carretel incorra em medições nas quais seus decorrentes sinais adimensionais de energia contenham menos dissimilaridades entre si. Por conseguinte, os valores de vazão de gás decorrentes do cômputo da correlação cruzada entre os sinais adimensionais das estações 1 e 2, sob a diretiva proposta na Seção 4.4.5, serão, possivelmente, caracterizados por menores valores de erro relativo em comparação àqueles evidenciados nas Figuras 46 e 47.

## CAPÍTULO 6 — CONCLUSÃO

Nesta dissertação está evidenciado o desenvolvimento de uma técnica ultrassônica para estimar a fração de vazio e vazão da fase dispersa de escoamentos água-ar no regime bolhas. O modo de operação dessa técnica é não invasivo, assim como não demanda a separação prévia das fases líquida e gasosa para a quantificação das variáveis hidrodinâmicas supracitadas.

Quanto à estimativa da fração de gás livre, a técnica ultrassônica proposta requer o uso de um único transdutor — posicionado ortogonalmente à direção do escoamento bifásico — para emitir os pulsos ultrassônicos e receber os sinais de eco refletidos na interface líquido-gás. Ademais, é necessário realizar calibração prévia para determinação da função de ajuste à relação experimental entre a fração de vazio ( $\bar{\alpha}$ ) e a razão adimensional ( $\overline{RA}$ ), pois é mediante o acoplamento dessa função com medições via ultrassom de escoamentos água-ar que a técnica proposta nesta dissertação realiza a estimativa da variável hidrodinâmica previamente citada. Salienta-se que a razão adimensional é obtida mediante a aplicação do pertinente processamento, proposto nesta dissertação, aos sinais de eco adquiridos via medições ultrassônicas de escoamentos água-ar.

Em comparação à técnica desenvolvida por Figueiredo (2020) para estimar a fração de vazio, a qual utiliza os sinais de energia dos ecos, a técnica proposta nesta dissertação emprega uma variável ultrassônica adimensional —  $\overline{RA}$  — cuja relação com a  $\bar{\alpha}$  não é significativamente influenciada por variações na condição do acoplamento acústico entre o transdutor ultrassônico e a linha de atraso, bem como pelo uso de diferentes cabos e transdutores ultrassônicos. Além disso, devido à sua definição, mediante o uso da  $\overline{RA}$  é possível avaliar qual a tendência da relação quantitativa entre a magnitude das flutuações na concentração e distribuição espacial das bolhas, refletores dos pulsos ultrassônicos, na seção transversal da tubulação e os valores médios dessas características hidrodinâmicas.

De acordo com os resultados, devidamente explicitados na Seção 5.2.5, pode-se afirmar que mediante a aplicação da técnica proposta nesta dissertação é possível obter valores de erro relativo inferiores a 6% para estimativas de fração de vazio no intervalo de 1,5 a 13% — o qual corresponde a uma faixa de medição não explorada na recente pesquisa desenvolvida por Figueiredo (2020). Ademais, presume-se que há viabilidade para utilização de quaisquer frequências centrais de transdutores no

intervalo de 1–5 MHz para quantificação da fração de gás livre mediante o uso dessa técnica ultrassônica, contudo, sob a ressalva de que tal sugestão é válida apenas para medições via ultrassom realizadas em condições de escoamento similares às apresentadas nesta dissertação.

Visto que o intervalo de fração de vazio averiguado experimentalmente foi inferior a 15%, bem como a vazão nominal de líquido empregada nos experimentos foi constante, devido às limitações impostas pelo circuito experimental, sugere-se a realização da seguinte investigação para ampliação da pesquisa científica evidenciada nesta dissertação: a análise da relação entre a  $\bar{\alpha}$  e a  $\overline{RA}$  em condições experimentais nas quais os valores de fração de gás livre sejam superiores a 13%, sob o emprego de água como fase contínua nos escoamentos líquido-gás, como também sob o uso de outros fluidos mais viscosos como fase contínua, tal como o óleo mineral. Nesses casos nos quais fluidos viscosos forem avaliados, é também relevante averiguar a influência da frequência central na detecção das bolhas e, por consequência, no desenvolvimento da função para estimativa da fração de vazio.

Quanto à estimativa da vazão da fase dispersa, a técnica proposta nesta dissertação demanda o uso de dois transdutores, ambos posicionados ortogonalmente à direção do escoamento bifásico e intervalados entre si, ao longo da tubulação, por uma distância fixa. Mediante a aplicação da correlação cruzada — sob a diretiva proposta em 4.4.5 — aos sinais adimensionais de energia provenientes desses pontos de medição ultrassônica defasados espacialmente, é possível determinar o atraso temporal entre tais sinais e, por conseguinte, a velocidade média da fase dispersa. Logo, a vazão de gás é determinada ao combinar tal valor de velocidade com a fração de vazio — estimada via função de ajuste — e a área da seção transversal da linha de transporte de fluidos.

Os resultados, devidamente discutidos na Seção 5.3, evidenciam que mediante a aplicação da técnica ultrassônica proposta nesta dissertação foi possível estimar vazões de gás cujos valores de erro relativo em relação aos valores de referência situam-se, predominantemente, no intervalo de 10–35%, tanto para as medições com os transdutores de 1 MHz quanto para as aquisições com os transdutores de 5 MHz. Sugere-se que a aplicação dessa técnica ultrassônica resultará em estimativas mais exatas, em comparação àquelas evidenciadas nesta dissertação, em situações nas quais a distância entre os pontos de tomada de sinais ultrassônicos seja inferior a 110

mm, valor adotado nas investigações experimentais discutidas nesta dissertação. Posto isso, sugere-se como proposta para investigação futura a análise da influência da distância entre os pontos de tomada de sinais de eco na estimativa da vazão da fase dispersa mediante o uso do método proposto em 4.4.5, como também a avaliação do desempenho desse método na determinação da vazão de gás de escoamentos óleo-ar no regime bolhas.

Por fim, salienta-se que a exatidão das estimativas de vazão por intermédio da técnica ultrassônica proposta nesta dissertação está em concordância com a exatidão atrelada à técnica desenvolvida por Figueiredo (2020), apesar de ambas as técnicas terem sido desenvolvidos para diferentes intervalos de vazão de gás, bem como aplicarem diferentes processamentos aos sinais de eco adquiridos via medições com ultrassom de escoamentos água-ar no regime bolhas.

## REFERÊNCIAS

- ARITOMI, M.; ZHOU, S.; NAKAJIMA, M.; TAKEDA, Y.; MORI, M. Measurement System of Bubbly Flow Using Ultrasonic Velocity Profile Monitor and Video Data Processing Unit, (II) Flow Characteristics of Bubbly Countercurrent Flow. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 34, n. 8, p. 783–791, 1997.
- BERTOLA, V. Two-Phase Flow Measurement Techniques. *In*: BERTOLA, V. (ed.). **Modelling and Experimentation in Two-Phase Flow**. Springer-Verlag Wien GmbH, 2003. p. 310–313.
- CARVALHO, R. D. M.; VENTURINI, O. J.; TANAHASHI, E. I.; NEVES JR., F.; FRANÇA, F. A. Application of the ultrasonic technique and high-speed filming for the study of the structure of air–water bubbly flows. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 33, p. 1065–1086, 2009.
- CHAKRABORTY, S.; KELLER, E.; TALLEY, J.; SRIVASTAV, A. Void fraction measurement in two-phase flow processes via symbolic dynamic filtering of ultrasonic signals. **Measurement Science and Technology**, v. 20, p. 1–6, 2009.
- DIAS, S. G.; FRANÇA, F. A.; ROSA, E. S. Statistical method to calculate local interfacial variables in two-phase bubbly flows using intrusive crossing probes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 26, p. 1797–1830, 2000.
- FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. Amostragem, Instrumentos Digitais e Aquisição de Dados. *In*: **Teoria e Projeto para Medições Mecânicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007b. p. 204–242.
- FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. Características Estáticas e Dinâmicas de Sinais. *In*: **Teoria e Projeto para Medições Mecânicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007a. p. 32–57.
- FIGUEIREDO, M. M. F. Anexo A: Projeto de um Medidor Multifásico Ultrassônico. *In*: FIGUEIREDO, M. M. F. **Desenvolvimento de uma técnica baseada em medidas ultrassônicas e redes neurais para identificação do padrão de escoamento e determinação da fração volumétrica de gás de escoamentos multifásicos da indústria petrolífera**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016b. f. 111–117.
- FIGUEIREDO, M. M. F. **Caracterização de escoamentos verticais bifásicos utilizando ultrassom**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.
- FIGUEIREDO, M. M. F.; GONÇALVES, J. L.; NAKASHIMA, A. M. V.; FILETI, A. M. F.; CARVALHO, R. D. M. 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**, v. 70, p. 29–50, 2016a.

GONG, Z.; ZHAO, A.; ZHAI, L.S.; REN, Y. Y.; JIN, N.D. Ultrasonic method for measuring the gas holdup of gas-liquid bubbly flow in a small-diameter pipe. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 33, p. 1170–1180, 2016.

GOURICH, B.; VIAL, C.; ESSADKI, A. H.; ALLAM, F.; SOULAMI, M. B.; ZIYAD, M. Identification of flow regimes and transition points in a bubble column through analysis of differential pressure signal—influence of the coalescence behavior of the liquid phase. **Chemical Engineering and Processing**, v. 45, p. 214–223, 2006.

GOVIER, G. W.; AZIZ, K. The Vertical Flow of Gas-Liquid and Liquid-Liquid Mixtures in Pipes: Introduction. *In*: GOVIER, G. W.; AZIZ, K. **The flow of complex mixtures in pipes**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1972. p. 322–323.

GURAU, B.; VASSALLO, P.; KELLER, K. Measurement of gas and liquid velocities in an air–water two-phase flow using cross-correlation of signals from a double sensor hot-film probe. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 28, p. 495–504, 2004.

HILLS, J. H. The Operation of a Bubble Column at High Throughputs: I. Gas Holdup Measurements. **The Chemical Engineering Journal**, v. 12, p. 89–99, 1976.

HOLMAN, J. P. Analysis of Experimental Data. *In*: HOLMAN, J. P. **Experimental Methods for Engineers**. 8. ed. McGraw-Hill, 2012a. p. 74–143.

HOLMAN, J. P. Data Acquisition and Processing. *In*: HOLMAN, J. P. **Experimental Methods for Engineers**. 8. ed. McGraw-Hill, 2012b. p. 621–628.

ISHII, M.; HIBIKI, T. Fundamental of two-phase flow: Introduction. *In*: ISHII, M.; HIBIKI, T. **Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow**. 2. ed. New York: Springer, 2011. p. 1–10.

JIA, J.; BABATUNDE, A.; WANG, M. Void fraction measurement of gas–liquid two-phase flow from differential pressure. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 41, p. 75–80, 2015.

KIM, Y. H. Radiation, Scattering and Diffraction. *In*: KIM, Y. H. **Sound Propagation — An Impedance Based Approach**. John Wiley & Sons, 2010. p. 201–213.

KINSLER, E. L.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. Absorption and Attenuation of Sound Waves in Fluids. *In*: KINSLER, E. L.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of Acoustics**. John Wiley & Sons, 1982a. p. 141–162.

KINSLER, E. L.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. Tables of Physical Properties of Matter. *In*: KINSLER, E. L.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of Acoustics**. John Wiley & Sons, 1982c. p. 462–463.

KINSLER, E. L.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. Transmission Phenomena. *In*: KINSLER, E. L.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of Acoustics**. John Wiley & Sons, 1982b. p. 124–133.

LATHI, B. P. Capítulo 1: Sinais e Sistemas. *In*: LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. ed. Bookman, 2007. p. 75–80.

MERCHUK, J. C.; STEIN, Y. Local Hold-Up and Liquid Velocity in Air-Lift Reactors. **AIChE Journal**, v. 27, n. 3, p. 377–388, 1981.

MUDDE, R. F.; SAITO, T. Hydrodynamical similarities between bubble column and bubbly pipe flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 437, p. 203–228, 2001.

OFUCHI, C. Y. Introdução. *In*: OFUCHI, C. Y. **Técnicas Avançadas para Análise de Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Golfadas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011. f. 13–14.

OLYMPUS. **Panometrics — Ultrasonic Transducers: Wedges, Cables, Test Blocks**. USA, 2010. 52 p.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. Discrete-Time Signals and Systems. *In*: PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **Digital Signal Processing: Principles: Principles, Algorithms**. 3. ed. Prentice-Hall, 1996. p. 118–134.

ROCHA, M. S.; SIMÕES-MOREIRA, J. R. Void Fraction Measurement and Signal Analysis from Multiple-Electrode Impedance Sensors. **Heat Transfer Engineering**, v. 29, p. 924–935, 2008.

ROSA, E. S. Conceitos Básicos em Escoamentos Multifásicos. *In*: ROSA, E. S. **Escoamento Multifásico Isotérmico: Modelos de multifluidos e de mistura**. Porto Alegre: Bookman, 2012. p.1–16.

SALGADO, C. M.; PEREIRA, C. M. N. A.; SCHIRRU, R.; BRANDÃO, L. E. B. Flow regime identification and volume fraction prediction in multiphase flows by means of gamma-ray attenuation and artificial neural networks. **Progress in Nuclear Energy**, v. 52, p. 555-562, 2010.

SCHEID, S.; JONH, S.; BORK, O.; PARCHMANN, H.; SCHLÜTER, M.; RÄBINGER, N. Improved model for the calculation of homogeneous gas-liquid flows. *In*: SOMMERFELD, M. (ed.). **Bubbly Flows: Analysis, Modelling and Calculation**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004. p. 67–83.

SHOHAM, O. Fundamentals of Two-Phase Flow. *In*: SHOHAM, O. **Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes**. Spe, 2006. p. 1–17.

STRAVS, A. A.; STOCKAR, V. U. Measurement of interfacial areas in gas-liquid dispersions by ultrasonic pulse transmission. **Chemical Engineering Science**, v. 40, p. 1169-1175, 1985.

TANG, C.; HEINDEL, T. J. Estimating gas holdup via pressure difference measurements in a cocurrent bubble column. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 32, p. 850–863, 2006.

THOME, J. R.; CIONCOLINI, A. Chapter Four — Flow Boiling in Microchannels. *In*: SPARROW, E. M.; ABRAHAM, J. P.; GORMAN, J. M. (ed.). **Advances in Heat Transfer**. Elsevier, 2017. v. 49, p. 178–180.

VATANAKUL, M.; ZHENG, Y.; COUTURIER, M. Application of Ultrasonic Technique in Multiphase Flows. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 43, p. 5681–5691, 2004.

VIAL, C.; PONCIN, S.; WILD, G.; MIDOUX, N. A simple method for regime identification and flow characterisation in bubble columns and airlift reactors. **Chemical Engineering and Processing**, v. 40, p. 135–151, 2001.

WARBITO, M.; OHKAWA, M.; KAWATA, N.; UCHIDA, S. Cross-sectional distributions of gas and solid holdups in slurry bubble column investigated by ultrasonic computed tomography. **Chemical Engineering Science**, v. 54, p. 4711–4728, 1999.

WOJBOR, A. W. Description of Signals. *In*: WOJBOR, A. W. **First Course in Statistics for Signal Analysis**. 2. ed. Springer Nature, 2010. p. 6–9.

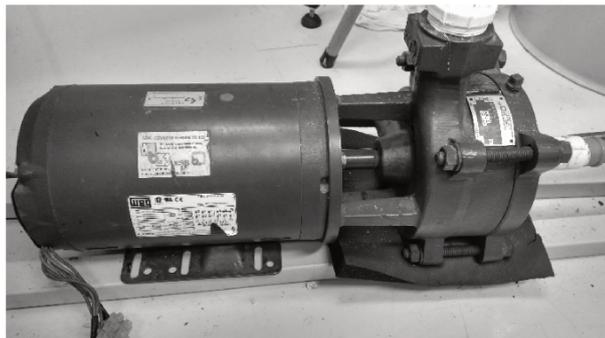
ZAGZEBSKI, J. A. Physics of Diagnostic Ultrasound. *In*: ZAGZEBSKI, J. A. **Essentials of Ultrasound Physics**. Mosby, 1996. p. 7–13.

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

## APÊNDICE A

As imagens presentes neste apêndice correspondem às fotos dos instrumentos, equipamentos e acessórios instalados no circuito experimental construído para execução das investigações experimentais discutidas nesta dissertação.

**Figura 48** — Bomba centrífuga utilizada no bombeamento da fase líquida



**Figura 49** — Inversor de frequência (SY-101) utilizado no controle da rotação da bomba centrífuga



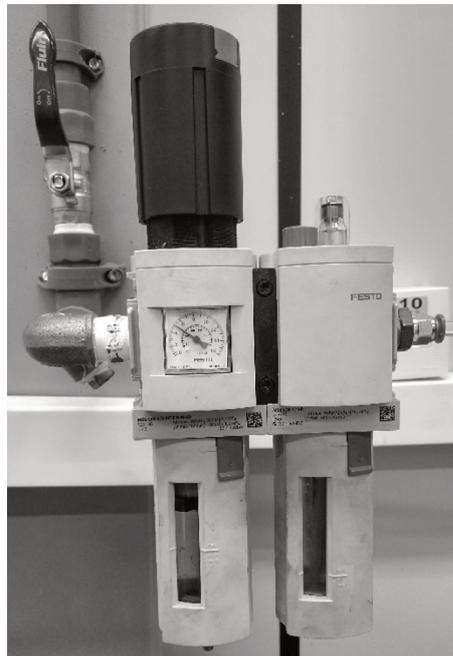
**Figura 50** — Válvula de bloqueio instalada na linha de escoamento de gás



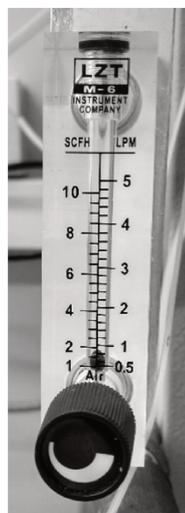
**Figura 51** — Válvula de retenção de líquido instalada na linha de transporte de gás



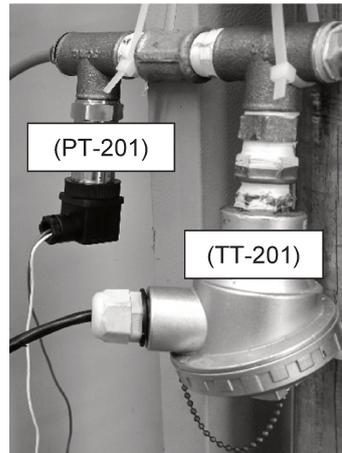
**Figura 52** — Regulador de pressão instalado na linha de escoamento de gás



**Figura 53** — Rotômetro (FI-201) utilizado para medição e controle da vazão de ar no escoamento bifásico



**Figura 54** — Sensores de pressão (PT-201) e temperatura (TT-201) instalados na linha de escoamento de gás



**Figura 55** — Compressor utilizado para fornecimento de ar comprimido para linha de transporte de gás



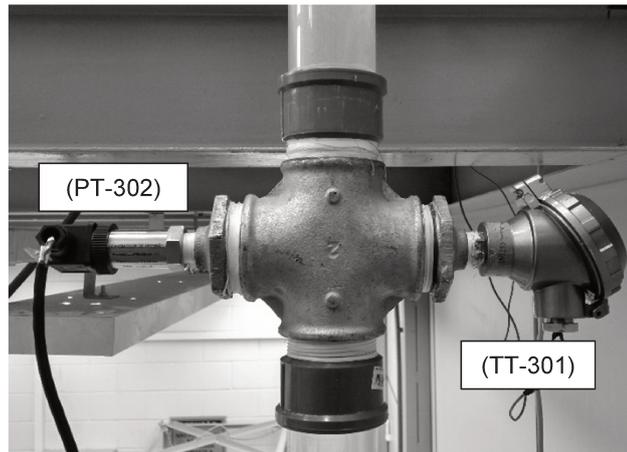
**Figura 56** — Tanque de separação de fases



**Figura 57** — Tanque de armazenamento de líquido



**Figura 58** — Sensores de pressão (PT-302) e temperatura (TT-301) instalados na parte superior da linha de escoamento bifásico



**Figura 59** — Sensor de pressão (PT-301) instalado na parte inferior da linha de escoamento bifásico

