

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

RAFAEL FABRICIO ALVES

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NO
ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO EM GOLFADAS EM DUTOS
HORIZONTAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

RAFAEL FABRICIO ALVES

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NO
ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO EM GOLFADAS EM DUTOS
HORIZONTAIS**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Raul Henrique Erthal, Mestre Eng.

Co-Orientador: Prof. Rigoberto E. M. Morales, Dr.

CURITIBA

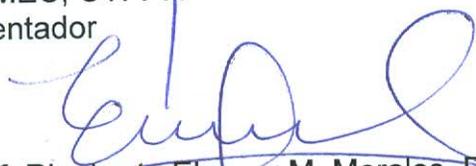
2013

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NO ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO EM GOLFADAS EM DUTOS HORIZONTAIS", realizado pelo aluno Rafael Fabricio Alves, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.



Prof. Raul Henrique Erthal, Mestre Eng.
DAMEC, UTFPR
Orientador



Prof. Rigoberto Eleazar M. Morales, Dr.
DAMEC, UTFPR
Co-Orientador



Prof. Silvio Luiz de Mello Junqueira, Dr.
DAMEC, UTFPR
Avaliador



Prof. Marco José da Silva, Dr.
DAELT, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 6 de Maio de 2013.

DEDICATÓRIA

À memória de minha avó Matilde Bento.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio incondicional de toda a minha família, em especial ao meu pai Almir, à minha Mãe Eliana, à minha irmã Elisangela e aos meus irmãos Ricardo, Guilherme e Gabriel.

Aos meus amigos, que me proporcionaram excelentes momentos e sempre estiveram dispostos a me ajudar.

Ao meu orientador, professor Raul, que forneceu todo o auxílio necessário durante a realização do projeto, agradeço imensamente pelo apoio.

Ao meu co-orientador, professor Rigoberto, que, além do grande apoio durante a realização deste projeto, esteve ao meu lado durante todo o curso.

À toda a equipe do LACIT que teve participação na execução deste projeto, em especial ao Reinaldo, pelo enorme apoio fornecido na realização dos experimentos. Ao César Ofuchi, que forneceu o equipamento de ultrassom e todo o suporte necessário para sua utilização nos testes experimentais.

RESUMO

ALVES, Rafael Fabricio. Estudo Experimental da Influência da Pressão no escoamento Bifásico Gás-Líquido em Golfadas em Dutos Horizontais. 2013. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica. Curitiba, 2013.

Escoamentos bifásicos gás-líquido são muito comuns em aplicações industriais, especialmente nas indústrias de petróleo e gás, química e nuclear. Conforme variam fatores como vazões das fases, dimensões da tubulação e propriedades físicas dos fluidos, ocorrem diferentes configurações geométricas conhecidas como padrões de escoamento. No caso da produção de petróleo o padrão encontrado com maior frequência é o de golfadas, em que se alternam regiões contínuas de líquido (pistões) e regiões de preponderância gasosa (bolhas alongadas), sendo que esses escoamentos normalmente estão submetidos a elevadas pressões. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar experimentalmente a influência da pressão em escoamentos bifásicos gás-líquido no padrão golfadas em tubulações horizontais. Para isso foram produzidos escoamentos sob condições controladas, dos quais foram extraídos alguns parâmetros característicos. Os fluidos usados foram água e ar, e os experimentos foram realizados no circuito de testes do LACIT (Laboratório de Ciências Térmicas da UTFPR), que foi adaptado para fornecer as condições desejadas. A extração dos parâmetros do escoamento foi feita através de duas técnicas distintas: transdutores de ultrassom e uma câmera com alta taxa de aquisição de imagens. Com base nos valores encontrados foi possível perceber que o aumento da pressão manométrica até 6 bar, mantendo-se as velocidades superficiais das fases constantes, não apresenta influência significativa nos parâmetros do escoamento avaliados.

Palavras-chave: Escoamento bifásico. Escoamento em golfadas. Técnicas de medição em escoamentos bifásicos. Escoamento pressurizado.

ABSTRACT

ALVES, Rafael Fabricio. Experimental Study of the Pressure Influence on Two-Phase Liquid-Gas Slug Flow in Horizontal Pipelines. 2013. 92 p. Undergraduate Monograph in Industrial Mechanical Engineering, Federal University of Technology – Paraná, Curitiba, 2013.

Two-phase liquid-gas flow are commonly found in industrial uses, mainly in oil and gas, chemical and nuclear industries. Different geometrical configurations, known as flow pattern, are found in two-phase flows. They occur with the variation of parameters such as flow rate of the phases, dimensions of the pipeline and properties of the fluids. In the oil production the pattern most commonly found is the slug flow, in which regions of continuous liquid (slug) and regions of gas predominance (Taylor bubble) are alternated. Such flow pattern is usually submitted to high pressures. This work aim to experimentally evaluate the influence of the pressure in liquid-gas two-phase flow under the slug pattern in horizontal pipelines. To achieve this goal controlled flows are produced, in which some characteristic parameters are obtained. Water and air are used as work fluids. The experimental setup, adapted to provide the conditions of interest, is located at the LACIT (Thermal Sciences Laboratory of UTFPR). Two different techniques are used in order to extract flow parameters: high speed videometry and ultrasound transducers. Based on the values found it was possible to ascertain that the increase of the gauge pressure to values up to 6 bar, under constant superficial velocities of the phases, do not have significative influence on the flow parameters evaluated.

Keywords: Two-phase flow. Slug flow. Two-phase flow measurement techniques. Pressurized flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Padrões de escoamento em dutos verticais.....	14
Figura 2 – Padrões de escoamento em dutos horizontais	15
Figura 3 – Escoamento em golfadas.....	16
Figura 4 – Mapa de fluxo para escoamentos bifásicos em tubulações horizontais ...	20
Figura 5 - Mapa de fluxo para escoamentos bifásicos em tubulações verticais utilizando coordenadas adimensionais	21
Figura 6 - Representação esquemática do escoamento em golfadas com pistão aerado	22
Figura 7 - Comprimentos da bolha alongada, pistão e célula unitária.....	24
Figura 8 – Representação esquemática da bancada experimental.....	34
Figura 9 – Câmera de alta taxa de aquisição de imagens	36
Figura 10 – Tela principal do <i>software</i> do ultrassom	37
Figura 11 – Painel frontal do programa em <i>LabVIEW</i>	39
Figura 12 – Representação de uma imagem digital	41
Figura 13 – Imagem criada a partir do tratamento	43
Figura 14 – Eliminação e preenchimento de objetos.....	43
Figura 15 – Passos utilizados no tratamento de imagem para a traseira da bolha ...	45
Figura 16 – Procedimento para determinação da posição da frente da bolha	46
Figura 17 – Procedimento para determinação da posição da traseira da bolha	47
Figura 18 – Fluxograma do algoritmo utilizado.....	49
Figura 19 – Grade de testes em um mapa de fluxo para escoamentos horizontais..	51
Figura 20 – Variação da velocidade da bolha com a pressão	53
Figura 21 – Variação do comprimento da bolha com a pressão	53
Figura 22 – Variação do comprimento do pistão com a pressão.....	54
Figura 23 – Variação da frequência com a pressão	54

Figura 24 – Variação do fator de intermitência com a pressão	55
Figura 25 – Velocidade da bolha calculada em relação ao modelo de Bendiksen....	57
Figura 26 – Desvio padrão das medidas de velocidade da bolha	58
Figura 27 – Variação do comprimento da bolha com a relação J_G / J_L	59
Figura 28 – Desvio padrão das medidas de comprimento da bolha.....	60
Figura 29 – Variação do comprimento do pistão com a relação J_G / J_L	61
Figura 30 – Comprimento do pistão relacionado à frequência e as velocidades superficiais	62
Figura 31 – PDF do comprimento do pistão para o ponto com $J_G = 0,75$ (m/s) e $J_L = 1,25$ (m/s) na pressão atmosférica.....	63
Figura 32 – Frequência adimensional obtida experimentalmente comparada com os modelos de Gregory e Scott (1969) e Heywood (1979)	64
Figura 33 – Variação do fator de intermitência com a relação J_G / J	65
Figura 34 – Valores de frequência previstos pelos modelos de Gregory e Scott (1969) e Heywood (1979) em relação a J_G / J_L	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlações para os valores de C_0 e C_∞	26
Tabela 2 – Grade de testes.....	50
Tabela 3 – Resultados dos parâmetros de escoamento medidos.....	52
Tabela 4 – Média e desvio médio percentual.....	55
Tabela 5 – Erro percentual das velocidades medidas em relação ao modelo de Bendiksen (1984)	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contexto do Tema	13
1.2	Objetivos	17
1.3	Justificativa	17
1.4	Conteúdo do Trabalho	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Escoamento bifásico	19
2.2	Escoamento em golfadas	21
2.3	Parâmetros de escoamento	23
2.3.1	Comprimento da bolha alongada e do pistão de líquido	23
2.3.2	Velocidade da bolha alongada	24
2.3.3	Frequência	27
2.3.4	Fator de intermitência	29
2.4	Técnicas de medição em escoamentos bifásicos	30
2.5	Escoamentos bifásicos pressurizados	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Descrição do circuito experimental	33
3.1.1	Circuito de líquido	33
3.1.2	Circuito de gás	34
3.1.3	Circuito bifásico	35
3.1.4	Câmera de alta taxa de aquisição de imagens	36
3.1.5	Ultrassom	36
3.1.6	Seção de testes	38
3.2	Sistema supervisor	38
3.3	Procedimentos de teste	39
3.4	Processamento dos dados da câmera	41
3.4.1	Tratamento de imagem	41
3.4.2	Detecção das posições do nariz e da traseira da bolha	45
3.4.3	Determinação dos parâmetros do escoamento	47
3.4.4	Visão geral do algoritmo	48
4	RESULTADOS	50
4.1	Grade de testes	50
4.2	Análise da influência da pressão nos parâmetros do escoamento	51
4.3	Análise da variação dos parâmetros na pressão atmosférica	56
4.3.1	Velocidade da bolha	56
4.3.2	Comprimento da bolha	59
4.3.3	Comprimento do pistão	60
4.3.4	Frequência	63
4.3.5	Fator de intermitência	64

4.4	Análise da influência da pressão no escoamento com vazões mássicas constantes	65
4.5	Considerações finais	68
5	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DA VAZÃO DE GÁS	73
	APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZAS	82
	APÊNDICE C – RESULTADOS	85
	APÊNDICE D – FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

Escoamentos multifásicos são aqueles em que mais de uma fase está presente simultaneamente, podendo ser com diferentes líquidos, gases ou sólidos. Este tipo de escoamento é comum em meios naturais como, por exemplo, no interior do corpo humano, em transporte de sedimentos nos rios, em correntes marítimas e atmosféricas. Em operações industriais também aparecem frequentemente escoamentos com mais de uma fase, como em motores de combustão interna, geradores de vapor, refrigeradores e diversos outros equipamentos presentes nas indústrias químicas, nucleares e especialmente petrolíferas.

O petróleo é um recurso natural encontrado em camadas profundas, aprisionado em uma estrutura denominada rocha reservatório, que pode estar situada abaixo do solo terrestre (*onshore*) ou abaixo do leito marítimo (*offshore*), este último ocorre com maior frequência no Brasil (THOMAS, 2001). Na atualidade o petróleo é uma das principais fontes energéticas do planeta, e o Brasil, após as descobertas de grandes reservas de petróleo ao longo da sua costa, conhecidas como reservas do pré-sal, consolidou-se como um dos países com maior reserva de petróleo.

Em atividades de exploração petrolífera nos reservatórios marítimos é comum a presença de escoamentos multifásicos, misturas compostas por óleos, água, gás e até mesmo partículas sólidas, como areia. Porém, devido à complexidade na modelagem, normalmente esta situação é simplificada como um escoamento bifásico de líquido e gás. A fase de líquido é formada por óleos e água, e o gás pode ser proveniente da própria bacia de exploração, com a vaporização dos constituintes do petróleo, ou pode ser injetado na bacia. Esta injeção de gás, feita a alta pressão, tem o objetivo reduzir o peso da coluna de óleo dentro do poço para facilitar a elevação do petróleo até a plataforma, técnica de elevação artificial chamada de *gás-lift* (THOMAS, 2001). Essa técnica é bastante utilizada, principalmente em poços abaixo do leito marítimo, pois pode produzir em uma larga faixa de vazão (THOMAS, 2001).

Ao longo do escoamento, desde o poço até a plataforma, a mistura bifásica de líquido e gás pode assumir diferentes formas e distribuições no interior da tubulação, que estão diretamente relacionados com as vazões das fases de escoamento, as propriedades físicas dos fluidos, a geometria do duto e a pressão. Essas distribuições geométricas das fases de escoamento são chamadas de padrões de escoamento ou regimes de escoamento (SHOHAM, 2006). Na Figura 1 e Figura 2 são mostrados os padrões de escoamentos mais comuns em dutos verticais e horizontais, respectivamente.

Na Figura 1 são mostrados os principais padrões em escoamentos verticais: bolhas (*bubble*), golfadas (*slug flow*), agitado (*churn*), anular (*annular*) e bolhas dispersas (*dispersed-bubble*). O padrão anular ocorre para altas vazões de gás e baixas de líquido, o oposto acontece para os padrões bolhas e bolhas dispersas, em que ocorrem altas vazões de líquido e baixas de gás. Nos padrões golfadas e agitado a vazão de líquido é moderada, enquanto que a vazão da fase gasosa é moderada para o primeiro e alta para o segundo (SHOHAM, 2006).

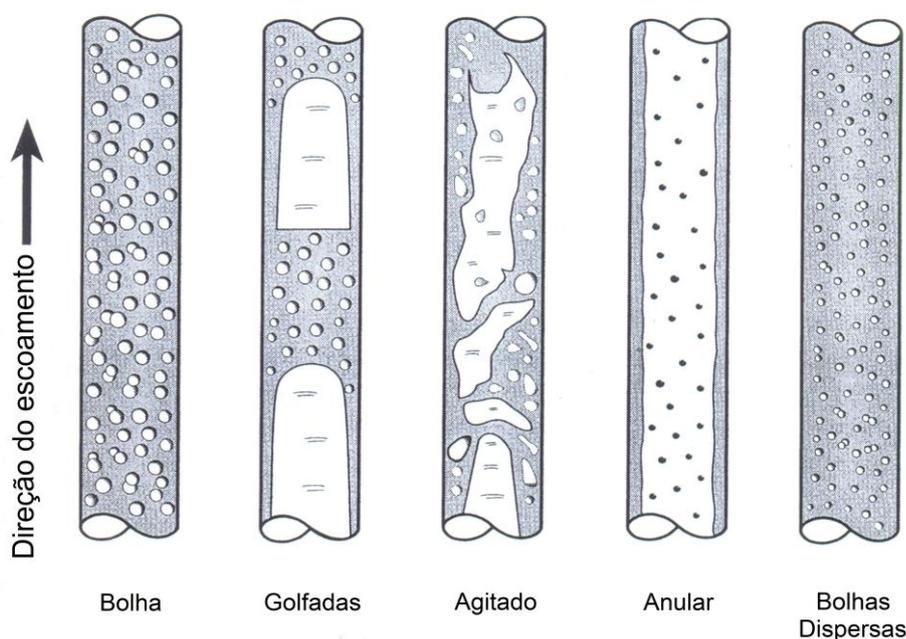


Figura 1 – Padrões de escoamento em dutos verticais

Fonte: adaptado de Shoham, 2006

O escoamento na direção horizontal, ao contrário do vertical, tende a ser assimétrico, pois a gravidade age na direção normal à do escoamento, com isso o

fluido mais denso, no caso o líquido, fica no fundo da tubulação, e o gás, que é o fluido menos denso, fica na parte superior do tubo.

Os padrões de escoamento bifásico horizontal são classificados por Shoham (2006) em quatro configurações básicas, sendo elas: estratificado, intermitente, anular e bolhas dispersas. Dentro desta classificação o padrão estratificado é dividido em liso e ondulado, o intermitente em bolhas alongadas e golfadas, e o anular em anular ondulado e anular. As condições de vazões das fases no escoamento para que ocorram os padrões bolhas dispersas, golfadas e anular são os mesmos que no caso vertical. Escoamento estratificado liso e ondulado acontecem para baixas vazões de líquido e de gás, enquanto que escoamento de bolhas alongadas é observado com vazão da fase líquida moderada e baixa vazão da fase gasosa (SHOHAM, 2006).

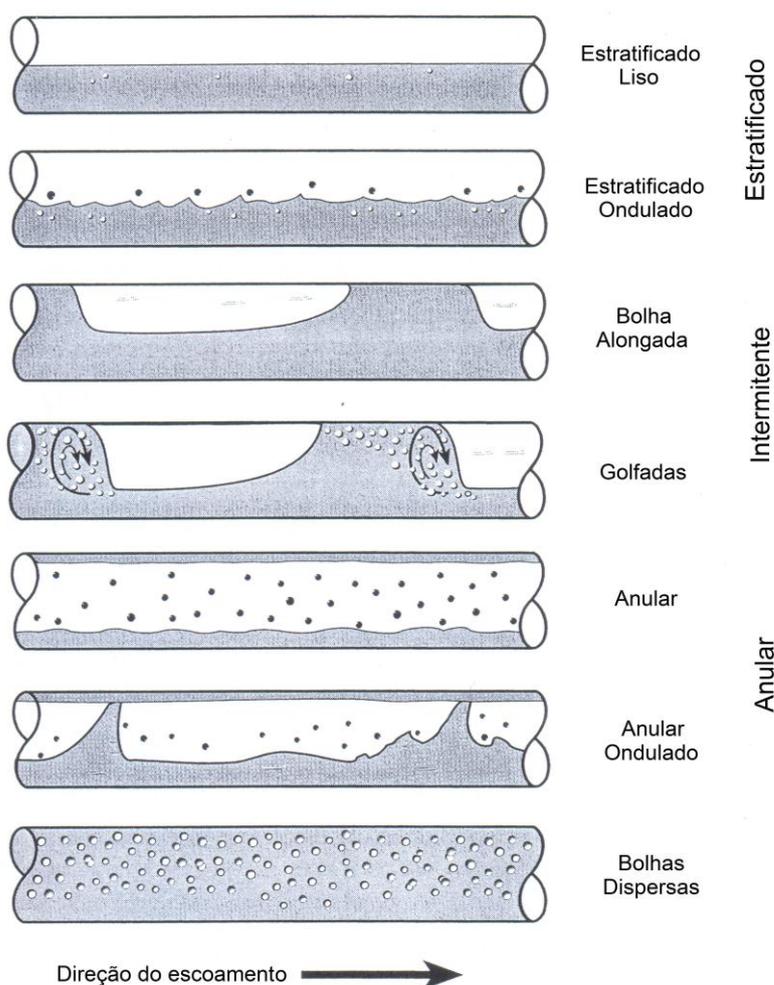


Figura 2 – Padrões de escoamento em dutos horizontais

Fonte: adaptado de Shoham, 2006

Como cada padrão de escoamento possui um comportamento muito peculiar, não há nenhum modelo universal para escoamentos bifásicos, existindo apenas modelagens específicas para cada configuração da distribuição entre as fases.

A partir de observações, verificou-se que, em grande parte das linhas de produção de petróleo e gás em águas profundas, é encontrado o padrão de golfadas. O escoamento em golfadas é caracterizado pela repetição intermitente de duas estruturas: uma delas é composta por uma fase contínua de líquido, chamada de pistão (ou *slug*), que pode conter uma quantidade de gás no formato de bolhas dispersas; a outra é formada por um bolsão de gás, conhecido como bolha alongada ou bolha de Taylor, que ocupa grande parte da seção transversal do duto, adjacente a um filme de líquido. A Figura 3 mostra um esquema do escoamento em golfadas.

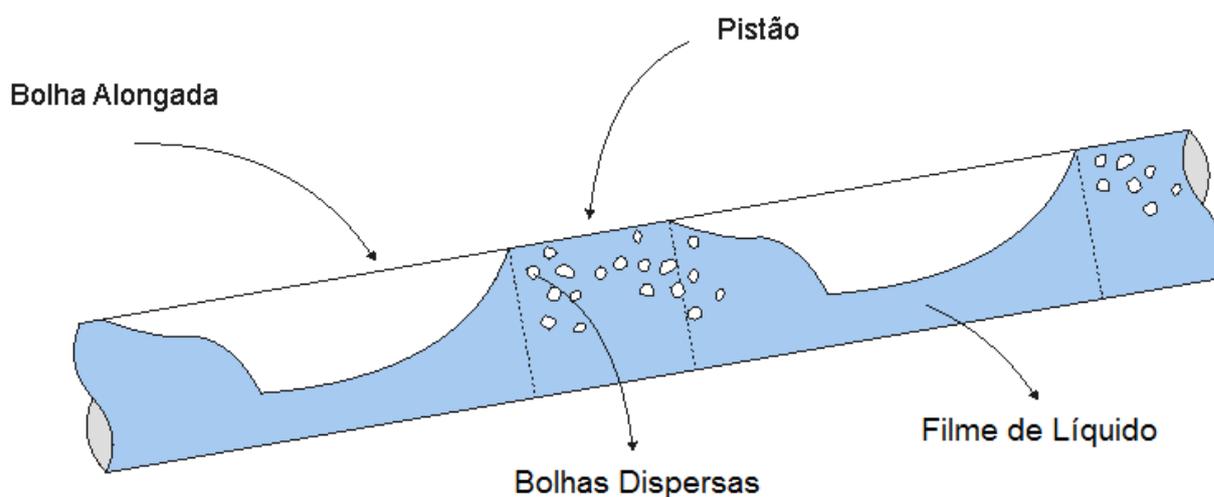


Figura 3 – Escoamento em golfadas

Fonte: adaptado de Chelski, 2010

Como em águas profundas o petróleo e o gás normalmente estão submetidos a altas pressões, estudos que visem compreender a influência da pressão no escoamento em golfadas são de grande importância. O entendimento dos fenômenos envolvidos neste cenário pode, por exemplo, auxiliar no dimensionamento das linhas de produção e separadores líquido-gás.

1.2 Objetivos

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental do escoamento bifásico de água e ar no padrão de golfadas em dutos horizontais pressurizados. Foram combinadas diferentes vazões de água e ar, submetidas a diferentes pressões. A faixa de pressões usada foi de 1 a 6 bar.

Foram extraídos parâmetros importantes do escoamento através de duas técnicas: transdutores de ultrassom e imagens adquiridas com uma câmera de alta velocidade, que foram processadas por um algoritmo implementado em MatLab®. Através da análise dos resultados obtidos foi avaliada a influência da pressão no escoamento.

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT) da UTFPR.

1.3 Justificativa

O entendimento da dinâmica do escoamento em golfadas é de grande importância na criação de modelos matemáticos que visam descrever de maneira realista o fenômeno. Esses modelos estimam parâmetros como velocidade e comprimento da bolha alongada, e podem contribuir na otimização de projetos ou na seleção mais apropriada de equipamentos usados na produção petrolífera.

Com os resultados obtidos nesse trabalho foi avaliada a influência da pressão no escoamento líquido-gás no padrão de golfadas, visando uma melhor compreensão do fenômeno, o que fornecerá informações necessárias para a correta modelagem matemática desse tipo de situação.

A influência da pressão poderá ser melhor avaliada pelo modelo para escoamento bifásico em golfadas, que vem sendo desenvolvido no LACIT, através dos resultados obtidos nesse projeto.

Além disso, os experimentos fornecerão um banco de dados, que futuramente poderá ser útil na validação dos resultados obtidos em simulações.

1.4 Conteúdo do Trabalho

O presente trabalho foi estruturado em um total de cinco capítulos e quatro apêndices.

No primeiro capítulo, foi feita uma introdução sobre escoamento bifásico em golfadas, além de mostrar os objetivos e as justificativas da realização deste estudo.

O segundo capítulo é uma fundamentação teórica dos assuntos relevantes para realização do trabalho. Essa revisão concentrou-se principalmente nas definições básicas de escoamento bifásico, na caracterização dos escoamentos em golfadas, em técnicas de medição em escoamento bifásico, e em estudos sobre escoamentos bifásicos pressurizados.

No terceiro capítulo é feita uma descrição do circuito experimental usado na realização dos testes, é demonstrado o sistema supervisor, são descritos os procedimentos aplicados na realização dos testes e a metodologia utilizada no processamento dos dados da câmera.

No quarto capítulo são apresentadas as análises realizadas sobre os resultados obtidos. E o quinto capítulo é uma conclusão do trabalho.

No Apêndice A é mostrado o processo de calibração da vazão de gás, no Apêndice B é feita uma análise das incertezas contidas no circuito experimental, no Apêndice C são apresentados os resultados completos obtidos nos testes experimentais e no Apêndice D são mostradas as curvas com as distribuições PDF dos resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos necessários para o decorrer do projeto. Primeiramente serão mostradas características gerais do escoamento bifásico, depois será detalhado o escoamento no padrão de golfadas e serão descritos parâmetros importantes na sua determinação. Também serão descritas técnicas de medição usadas em escoamentos bifásicos, e, por fim, será feita uma revisão do que foi publicado sobre escoamentos bifásicos pressurizados.

2.1 Escoamento bifásico

Para calcular determinados parâmetros em escoamentos bifásicos é de fundamental importância o conhecimento do padrão de escoamento que está ocorrendo no duto. Para prever qual será este padrão pode ser empregado um mapa de fluxo, um diagrama no qual o padrão é relacionado com parâmetros do escoamento. As primeiras abordagens para criação destes mapas foram empíricas, feitas através de observações. Normalmente os dados obtidos são aplicados em diagramas bidimensionais, onde são definidas as regiões de transição entre os padrões, sendo que as coordenadas usadas na representação são, na maioria das vezes, escolhidas arbitrariamente. Desta forma, a utilização destes mapas fica restrita às condições em que os experimentos foram realizados, sendo que a extrapolação para outras condições de escoamento é incerta.

Vários sistemas de coordenadas têm sido propostos para construção de mapas de fluxo, a maioria dimensionais, como vazão mássica, propriedades dos fluidos e velocidades superficiais. Baker (1954) apresentou um dos primeiros mapas de fluxo baseado no escoamento bifásico em tubos de pequenos diâmetros usando vários fluidos, sendo que as coordenadas utilizadas por ele envolviam as vazões das fases juntamente com propriedades dos fluidos. Posteriormente Mandhane *et al.* (1974) propuseram mapas com as velocidades superficiais das fases nos eixos, baseado em um grande banco de dados [*the American Gas Association (AGA)-American Petroleum Institute (API) Data Bank*], que conta com 1178 pontos para o sistema água-ar em tubos de pequeno diâmetro (1,27-5,1 centímetros de diâmetro) (SHOHAM, 2006). A Figura 4 mostra este mapa de fluxo.

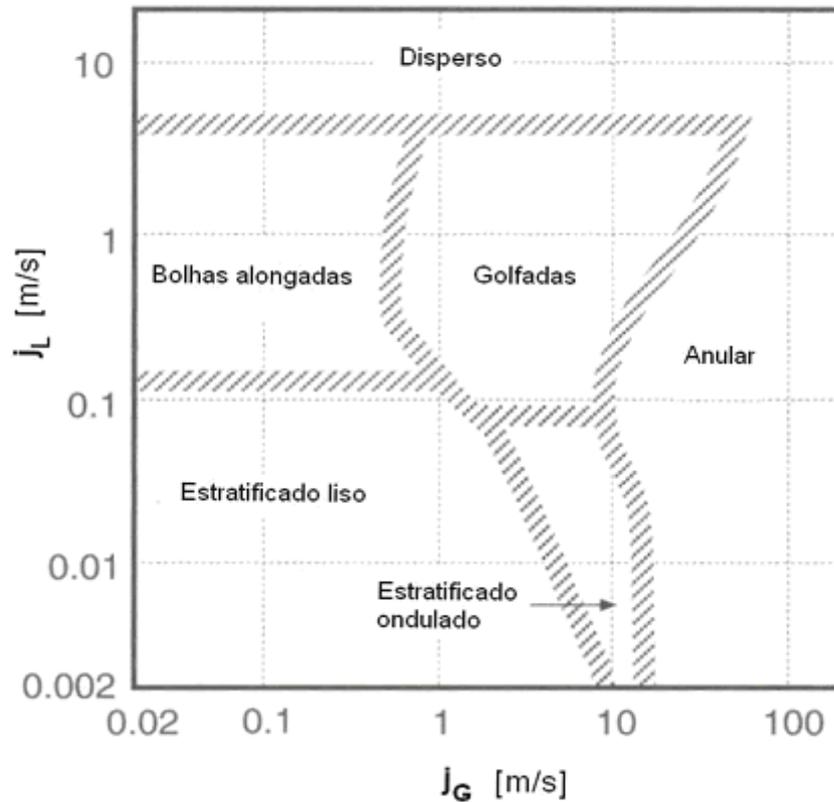


Figura 4 – Mapa de fluxo para escoamentos bifásicos em tubulações horizontais

Fonte: adaptado de Mandhane *et al.*, 1974

Existem também mapas de fluxo que utilizam sistemas de coordenadas adimensionais, feitos com o objetivo de agrupar informações para tornar sua aplicação mais abrangente. Esse tipo de coordenadas é bastante comum na Engenharia em situações que se deseja a generalização de fenômenos complexos usando similaridade. A Figura 5 mostra um exemplo de mapa em que as relações foram feitas entre a velocidade superficial do gás (J_G), adimensionalizada pela velocidade da mistura (J), e o número de Froude ao quadrado ($\frac{J^2}{gD}$), sendo g a aceleração da gravidade e D o diâmetro do tubo.

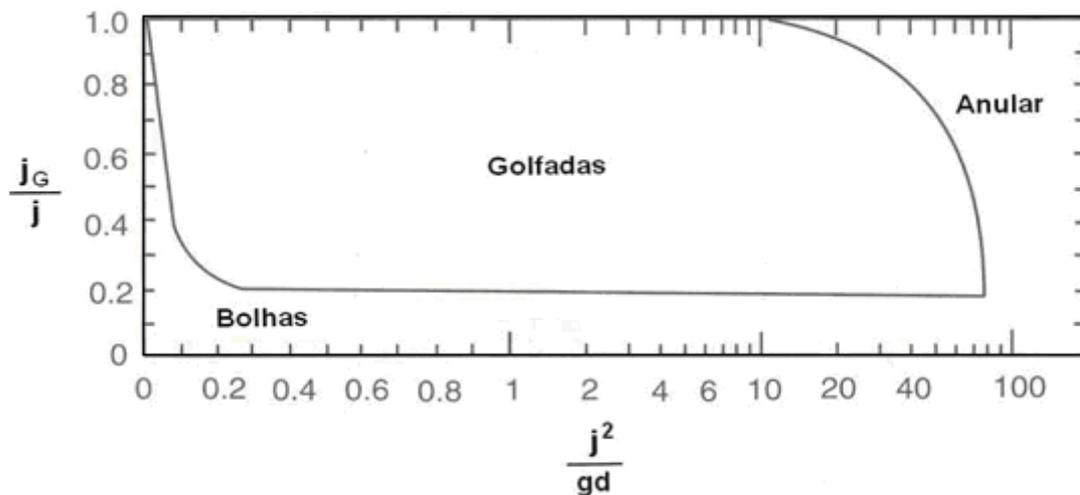


Figura 5 - Mapa de fluxo para escoamentos bifásicos em tubulações verticais utilizando coordenadas adimensionais

Fonte: adaptado de Griffith e Wallis, 1961

2.2 Escoamento em golfadas

Escoamento em golfadas ocorre em dutos horizontais, inclinados e verticais sob uma grande faixa de vazões de líquido e gás. Ele é caracterizado pelo escoamento intermitente de bolhas alongadas e pistões de líquidos.

O pistão poderá conter alguma fração de gás, que aparece no formato de pequenas bolhas dispersas. Em dutos horizontais ou levemente inclinados, a bolha alongada e o filme de líquido são dispostos em uma configuração estratificada, com o gás ocupando a parte superior do duto, enquanto que em tubos verticais a bolha e o filme de líquido dispõem-se num arranjo anular, com o gás ocupando a porção central da seção transversal e o líquido escoando entre a bolha alongada e a parede do tubo (SHOHAM, 2006).

A região que compreende a bolha alongada e o pistão de líquido é chamada de célula unitária. A Figura 6 mostra uma representação esquemática do escoamento em golfadas horizontal, vertical e inclinado, com pistão aerado, destacando-se as regiões da célula unitária, bolha de Taylor e filme de líquido.

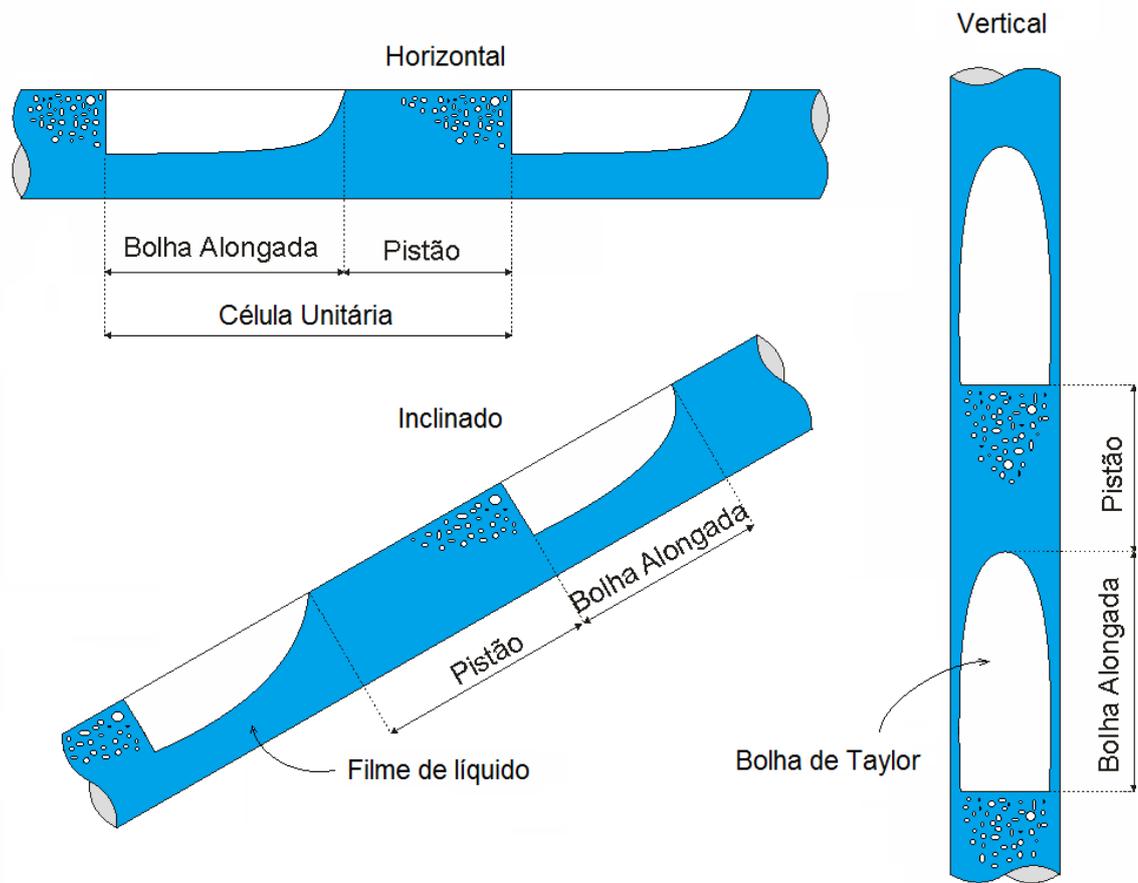


Figura 6 - Representação esquemática do escoamento em golfadas com pistão aerado

Fonte: adaptado de Sturza e Kovalski, 2010

Dukler e Hubbard (1975) desenvolveram um modelo através de uma abordagem fenomenológica, que teve grande contribuição no entendimento do mecanismo de escoamento e no comportamento hidrodinâmico do escoamento em golfadas. O sugerido por eles era que o pistão ocupa toda a seção transversal do tubo e move-se com uma velocidade relativamente alta, enquanto que o filme de líquido a sua frente move-se com velocidade menor. Desta forma o pistão captura líquido do filme a sua frente, que se acelera até a velocidade do pistão e cria uma região de esteira na sua porção frontal, onde ocorre uma elevada queda de pressão, ao mesmo tempo, é cedido líquido ao filme seguinte. Quando a taxa com que o líquido é capturado e cedido são iguais o comprimento de cada pistão permanece constante, e tem-se então um escoamento em regime permanente.

Com relação à formação de golfadas, segundo Taitel e Barnea (2000) existem duas maneiras distintas: golfadas induzidas pela topografia e golfadas hidrodinâmicas horizontais. As induzidas pela topografia ocorrem quando há mudança de inclinação na tubulação, e as hidrodinâmicas horizontais, objeto de estudo deste trabalho, formam-se devido à instabilidade associada à formação de ondas em escoamentos estratificados.

2.3 Parâmetros de escoamento

Normalmente são usados alguns parâmetros para caracterizar escoamentos bifásicos em golfadas. Eles podem ser geométricos, como diâmetro do tubo, comprimento da bolha e do pistão, cinemáticos, como velocidade da frente da bolha e velocidade média do pistão, e cinéticos, como tensões superficiais e atrito com as paredes do duto.

Neste trabalho serão extraídos do escoamento, através de técnicas de medição, os seguintes parâmetros: velocidade e comprimento da bolha alongada, comprimento do pistão de líquido, frequência e fator de intermitência.

2.3.1 Comprimento da bolha alongada e do pistão de líquido

Como a bolha e o pistão transportam, respectivamente, a maior parte do gás e do líquido no escoamento, é de grande importância o conhecimento dos comprimentos da bolha alongada (L_B) e do pistão de líquido (L_S). O comprimento da célula unitária (L_U) é definido com a soma de L_S e L_B . Um esquema que mostra isso pode ser visto na Figura 7.

O volume de gás transportado por uma bolha pode ser calculado pelo produto entre seu comprimento e a área média que ela ocupa na seção transversal do tubo.

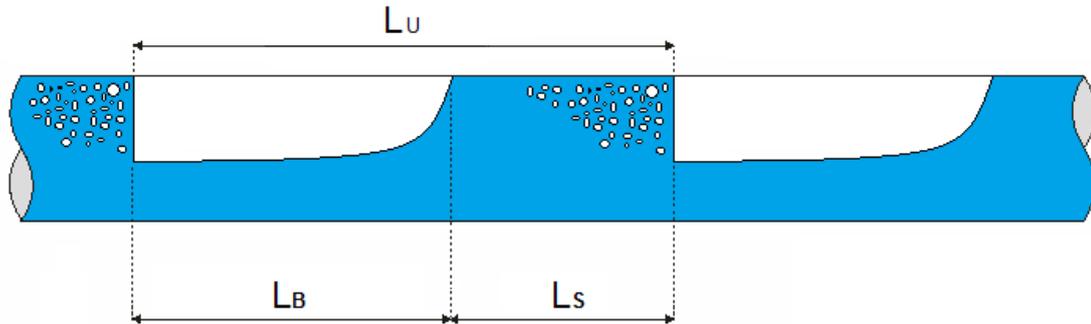


Figura 7 - Comprimentos da bolha alongada, pistão e célula unitária

Fonte: adaptado Sturza e Kovalski, 2010

Como mostrado na Figura 7 o comprimento do pistão é definido pela distância entre duas bolhas consecutivas. Afastando-se da entrada de gás e líquido o pistão tende a atingir um comprimento estável, não permitindo que as bolhas que escoam atrás dele sejam afetadas pela esteira das bolhas que escoam à sua frente. Desta forma, impede as interações entre as estruturas que compõe o escoamento, assim é estabelecido um escoamento desenvolvido (BUENO, 2009). Através de medidas experimentais, percebeu-se que o comprimento estável do pistão de líquido é relativamente insensível às vazões de líquido e gás para uma tubulação de um determinado diâmetro. Dukler e Hubbard (1975) observaram experimentalmente que em escoamentos horizontais o comprimento estável do pistão está entre 12 e 30 vezes o diâmetro do tubo.

2.3.2 Velocidade da bolha alongada

A velocidade da bolha alongada (V_B) é um importante parâmetro do escoamento em golfadas, e seu conhecimento tem grande importância no desenvolvimento de modelos para predição de escoamento. A velocidade está relacionada com a inclinação e o diâmetro do duto, com as velocidades das fases, e com as propriedades dos fluidos, viscosidade, densidade e tensão superficial (BUENO, 2009).

Segundo Taitel e Barnea (1990) a velocidade da bolha alongada pode ser calculada como a superposição de três efeitos: a velocidade de translação de uma

bolha em líquido estagnado; influência da movimentação do líquido à frente da bolha; efeito de esteira que surge da traseira da bolha que está à frente.

O cálculo da velocidade, considerando os três efeitos, pode ser feito através da equação (1).

$$V_B = (C_0 J + C_\infty \sqrt{gD})(1+h) \quad (1)$$

Em que C_∞ , C_0 e h são constantes adimensionais que quantificam a influência dos três efeitos, respectivamente. A aceleração da gravidade é representada por g , o diâmetro do tubo por D e a velocidade da mistura por J . A velocidade da mistura é igual à soma das vazões volumétricas de gás (\dot{Q}_G) e de líquido (\dot{Q}_L) dividido pela área de seção transversal do tubo (A), como mostrado na equação (2).

$$J = \frac{\dot{Q}_G + \dot{Q}_L}{A} \quad (2)$$

Alternativamente, a velocidade da mistura pode ser definida como a soma das velocidades superficiais do líquido (J_L) e do gás (J_G), como mostrado na equação (3).

$$J = J_L + J_G \quad (3)$$

Com os valores de J_L e J_G definidos pelas equações (4) e (5).

$$J_L = \frac{\dot{Q}_L}{A} \quad (4)$$

$$J_G = \frac{\dot{Q}_G}{A} \quad (5)$$

A constante C_∞ , conhecida como parâmetro de deslizamento, quantifica a velocidade da bolha em líquido estagnado. Em escoamentos horizontais, há uma controvérsia sobre sua existência. Alguns pesquisadores consideram que pelo fato

de a força gravitacional não agir na direção do escoamento não há força de empuxo para empurrar a bolha estagnada, e, portanto não há C_∞ , entre eles estão Gregory e Scott (1969) e Dukler e Hubbard (1975). Outros pesquisadores, como Nicholson *et al* (1978) e Bendiksen (1984), apontam que pelo fato de existir deslizamento resultante da diferença de elevação entre o nariz da bolha e o seu corpo existe C_∞ no escoamento horizontal.

O parâmetro de distribuição (C_0) é definido, de forma aproximada, como sendo a razão entre a velocidade máxima e a velocidade média do líquido à frente da bolha na tubulação (Niclin *et al*, 1962; Bendiksen, 1984). Como o regime de escoamento tem influência no perfil de velocidades, encontram-se valores diferentes de C_0 para condições laminares e turbulentas. Quando o líquido, distante do nariz da bolha, apresenta um perfil de velocidades completamente desenvolvido são encontrados, por meio de experimentos, valores em torno de 2,0 e 1,2 para escoamentos laminares e turbulentos, respectivamente (BUENO, 2009).

Bueno (2009), baseado no modelo de Bendiksen (1984), propôs correlações para C_0 e C_∞ , os parâmetros são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Correlações para os valores de C_0 e C_∞

	C_0	C_∞
$Re_j \geq 1000$	$Fr_j \geq 3,5$ 1,2	$\frac{0,345}{\left(1 + \frac{3805}{Eo^{3,06}}\right)^{0,58}} \text{sen}(\theta)$
	$Fr_j < 3,5$ 1,0	$\left(0,542 - \frac{1,76}{Eo^{0,56}}\right) \cos(\theta) + \frac{0,345}{\left(1 + \frac{3805}{Eo^{3,06}}\right)^{0,58}} \text{sen}(\theta)$
$Re_j < 1000$	2,0	$\left(0,542 - \frac{1,76}{Eo^{0,56}}\right) \cos(\theta) + \frac{0,345}{\left(1 + \frac{3805}{Eo^{3,06}}\right)^{0,58}} \text{sen}(\theta)$

Fonte: Bueno, 2009

Sendo que σ e μ_L representam a tensão superficial e a viscosidade do líquido, o valor de θ denota a inclinação do duto em relação à horizontal. O número de Eotvos é representado por Eo , enquanto que os números de Reynolds e Froude da

mistura são, respectivamente, Re_j e Fr_j , podendo ser calculados como mostrado nas equações (6), (7) e (8).

$$Eo = \frac{D^2 g (\rho_L - \rho_G)}{\sigma} \quad (6)$$

$$Re_j = \frac{\rho_L J D}{\mu_L} \quad (7)$$

$$Fr_j = \frac{J}{\sqrt{gD}} \quad (8)$$

A constante de esteira, h , é função da distância entre as bolhas subsequentes, e surge devido à modificação da velocidade máxima do escoamento quando uma bolha está perto da outra (MOISSIS e GRIFFITH, 1962). As correlações para o cálculo de h tem a forma apresentada na equação (9):

$$h = a \exp\left(-b \frac{L_s}{D}\right) \quad (9)$$

Em que variam somente as constantes a e b utilizadas. Grenier (1997) propôs os valores de $a = 0,4$ e $b = 0,5$ para dutos horizontais com escoamento de ar e água.

2.3.3 Frequência

O escoamento intermitente é caracterizado pela passagem de células unitárias, que quando vistas por um observador estacionário ocorrem em intervalos que não são periódicos nem no tempo nem no espaço (BUENO, 2009). Então pode ser calculado um valor de frequência (f) da célula unitária, que é definido como o inverso do tempo que esta unidade leva para passar por uma determinada seção, como mostrado na equação (10).

$$f = \frac{1}{T_B + T_S} \quad (10)$$

Em que T_B e T_S são os tempos que a bolha e o pistão, respectivamente, levam para passar pela seção. Considerando que a célula unitária translada com velocidade V_B chega-se as equações (11) e (12).

$$T_B = \frac{L_B}{V_B} \quad (11)$$

$$T_S = \frac{L_S}{V_B} \quad (12)$$

E substituindo as equações (11) e (12) na equação (10) encontra-se a equação (13).

$$f = \frac{V_B}{L_B + L_S} \quad (13)$$

Também pode ser realizado o cálculo para frequência média. Uma das maneiras é aplicar na equação (13) os valores médios de V_B , L_B e L_S . Outra maneira é através da razão do número de bolhas alongadas, N_B , que passou pela seção transversal do tubo pelo tempo de observação (T), como pode ser visto na equação (14).

$$f = \frac{N_B}{T} \quad (14)$$

Algumas correlações são propostas para determinação da frequência através de parâmetros conhecidos do escoamento, sendo que a maioria delas baseia-se em medidas experimentais, o que restringe a sua aplicação. Estas correlações normalmente são construídas em função das velocidades superficiais do líquido (J_L) e do gás (J_G), das configurações geométricas e propriedades dos fluidos.

Para tubulações horizontais Gregory e Scott (1969) propuseram a correlação apresentada na equação (15).

$$f = 0,0226 \left[\frac{J_L}{gD} \left(\frac{19,75}{J} + J \right) \right]^{1,2} \quad (15)$$

E Heywood (1979) propôs o apresentado na equação (16).

$$f = 0,0434 \left[\frac{J_L}{J} \left(\frac{2,02}{D} + Fr_J \right) \right]^{1,02} \quad (16)$$

2.3.4 Fator de intermitência

O fator de intermitência pondera, em termos médios, a ocorrência das estruturas pistão de líquido e bolha alongada no escoamento (BUENO, 2009). É definido como a razão do tempo que uma bolha alongada leva para passar por uma determina seção pelo tempo que a célula unitária gasta, como mostrado na equação (17).

$$\beta = \frac{T_B}{T_B + T_S} \quad (17)$$

Considerando-se que a unidade translada com a velocidade da bolha alongada (V_B) as equações (11) e (12) são válidas, e podem ser substituídas na equação (17) fornecendo a equação (18).

$$\beta = \frac{L_B}{L_B + L_S} \quad (18)$$

Uma importante característica do fator de intermitência é que ele está limitado matematicamente a valores entre 0 e 1, entretanto um limite físico impede que ele atinja seus extremos, pois quando β tende a 1 o padrão tende a mudar para anular e quando tende a 0 tende a mudar para bolhas dispersas, tecnicamente é comum encontrar para escoamento intermitente valores de β entre 0,2 e 0,95 (BUENO, 2009).

2.4 Técnicas de medição em escoamentos bifásicos

A necessidade de monitoramento e controle dos processos envolvidos na produção de petróleo desperta o interesse no desenvolvimento de técnicas de medição de escoamentos bifásicos. Nos últimos anos vários métodos foram desenvolvidos e aplicados, porém nenhum deles pode ser considerado universalmente aplicável, pois cada um apresenta vantagens e desvantagens para uma condição específica (DA SILVA, 2008).

Além do ultrassom e da análise de imagens de câmera de alta velocidade, que serão utilizados neste trabalho, outras técnicas de medição usadas são: tomografia por raios-X e raio gama (HERVIEU *et al.*, 2002), sensores *wire-mesh* (DA SILVA, 2008), sensores resistivos, técnicas ópticas, dentre outras.

Em experimentos é comum a utilização de técnicas ópticas, como a análise de imagens que será empregada neste estudo, ou como a medida de velocidade a laser PIV. Entretanto, para que estes métodos possam ser empregados são necessárias algumas condições que normalmente não são encontradas em aplicações industriais, como, por exemplo, a tubulação feita com material transparente, o que na produção de petróleo não suportaria as condições de esforços mecânicos, elevadas pressões, solicitação devido a correntes marítimas e condições térmicas.

Uma das maneiras de resolver este problema foi a aplicação do método de medição chamado tomografia, técnica que fornece imagens da seção transversal da tubulação através de diferentes princípios físicos, como raios-X e raio gama. Este método se baseia na atenuação da radiação pela matéria, diferentes para as fases gasosa e líquida, permitindo a obtenção de imagens das frações de vazio. Uma de suas grandes vantagens é o fato de não ser intrusivo, e tem como desvantagem apresentar uma baixa resolução temporal (SOARES, 2010).

Outra técnica não intrusiva usada é o ultrassom, em que a interface entre as fases, e conseqüentemente a fração de vazio, é encontrada através da reflexão de um pulso de ultrassom. Este pulso é refletido na interface devido à diferença de impedância acústica dos meios, que está relacionada com a resistência a passagem do som. Apresenta uma taxa de resolução temporal moderada, pode ser feito em

tubulações opacas, além de ser relativamente fácil de manusear. Como desvantagem pode ser aplicada somente em escoamentos com baixa fração de vazio (DA SILVA, 2008) e a técnica para detectar interfaces entre dois fluidos ainda não foi claramente estabelecida, pois as ondas refletidas nesta situação apresentam um comportamento complexo que depende do tamanho e da forma da interface (Murai *et al*, 2010).

O sensor de malha de eletrodos (*Wire Mesh Sensor*) é formado por uma malha quadrada de eletrodos composta por fios de aço inoxidável inserida na seção transversal da tubulação. Os eletrodos são dispostos perpendicularmente entre si, e em dois planos paralelos, espaçados por poucos milímetros, de forma que os eletrodos situados em um plano funcionam como transmissores, enquanto que os localizados no outro são receptores. Esses eletrodos medem a capacitância da substância que está em contato com eles, como se sabe que este valor varia conforme a permeabilidade elétrica do material, pode-se formar uma imagem diferenciando as fases de escoamento, encontrando dessa forma a fração de vazio naquela seção. Esse método apresenta uma alta resolução temporal e espacial, porém, ao contrário dos métodos de tomografia clássicos, é uma técnica intrusiva (DA SILVA, 2008).

Outra técnica intrusiva usada é o sensor resistivo, que vem sendo bastante utilizado por apresentar um baixo custo e uma alta resolução temporal, além de poder ser empregado em qualquer intervalo de fração de vazio (YANG *et al.*, 2003). Os sensores resistivos são compostos por dois fios de aço inseridos em uma seção transversal da tubulação, medindo a resistência da mistura em contato com eles. Como em um escoamento bifásico a resistência varia de acordo com a distribuição das suas fases, é possível avaliar a fração de vazio em uma determinada seção do escoamento.

2.5 Escoamentos bifásicos pressurizados

A maioria dos trabalhos que foram encontrados na literatura são estudos que avaliam a influência da pressão em escoamentos com mudança de fases, visando avaliar os processos de evaporação e condensação em sistemas de refrigeração e

de geração de vapor na indústria nuclear. Estes estudos objetivam avaliar o impacto dos padrões de escoamento no coeficiente de transferência de calor.

Um estudo com objetivo semelhante ao do presente trabalho foi desenvolvido por Pandolfo (2011). Ele fez uma análise experimental visando avaliar a influência da pressão nos parâmetros do escoamento bifásico em golfadas, as substâncias usadas foram água e ar atmosférico, e os parâmetros foram extraídos com uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens. A análise de resultados foi feita através da comparação de dados obtidos com as mesmas velocidades superficiais, variando-se apenas a pressão, usando valores entre 1 e 5 bar.

Os resultados qualitativos obtidos por Pandolfo (2011), e as análises realizadas por ele foram:

- Comprimento da bolha: O aumento da pressão resultou em uma diminuição do comprimento médio das bolhas, provavelmente devido a uma compressão na fase gasosa;

- Velocidade da bolha: A velocidade da bolha, na maioria dos casos, foi diminuída com o aumento da pressão. As explicações encontradas por Pandolfo (2011) foram que com o aumento da pressão, o perfil da esteira gera menos perturbação no perfil de velocidades que influencia a próxima bolha, e também ocorre uma diminuição no volume específico do gás;

- Comprimento do pistão: Não foi encontrado um padrão simples de variação do comprimento do pistão com o aumento de pressão;

- Frequência: A frequência não apresentou uma tendência sistêmica com o aumento da pressão.

- Fator de intermitência: Embora o comprimento do pistão não tenha apresentado uma tendência bem definida, o comprimento da bolha influenciou predominantemente, e então o fator de intermitência diminuiu com o aumento da pressão.

Com relação à solubilidade da fase gasosa, Magalhães (2011) realizou um estudo que investiga os seus efeitos em um escoamento bifásico horizontal pressurizado. Essa solubilidade mostrou ter influência em alguns parâmetros, diminuindo o comprimento da bolha e a perda de carga, por exemplo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será inicialmente apresentado o circuito experimental com os equipamentos usados na realização nos testes, em seguida serão descritos o sistema supervisorio e os procedimentos para realização dos testes. Por fim, é mostrada a técnica usada no processamento dos dados da câmera.

3.1 Descrição do circuito experimental

Os testes foram realizados no circuito experimental do Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT) da UTFPR, que é formado por tubos de acrílico transparente, uma bomba centrífuga, medidores de vazão e pressão, um compressor e três vasos de pressão. Todos os equipamentos de medição estão conectados a um sistema supervisorio, que faz o monitoramento das condições do escoamento. Adicionalmente, foi instalado um sistema de ultrassom e uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens na seção de testes.

Uma representação esquemática da bancada experimental é mostrada na Figura 8. Para facilitar a compreensão, a bancada será dividida em circuito de líquido, de gás e bifásico, câmera de alta taxa de aquisição de imagens, ultrassom e seção de testes.

3.1.1 Circuito de líquido

O circuito de líquido, representado pela cor azul na Figura 8, conta com um reservatório externo de água, um vaso separador, uma bomba centrífuga e um medidor de vazão.

O reservatório externo é um tanque cuja capacidade é 350 litros, que tem como função fornecer o líquido suficiente para o circuito de testes antes da realização dos experimentos. O vaso de pressão (da marca Engetank, com capacidade para 100 litros e pressão máxima de trabalho de 14 bar) armazena parte da fase líquida durante o experimento, além de promover a separação das fases por gravidade.

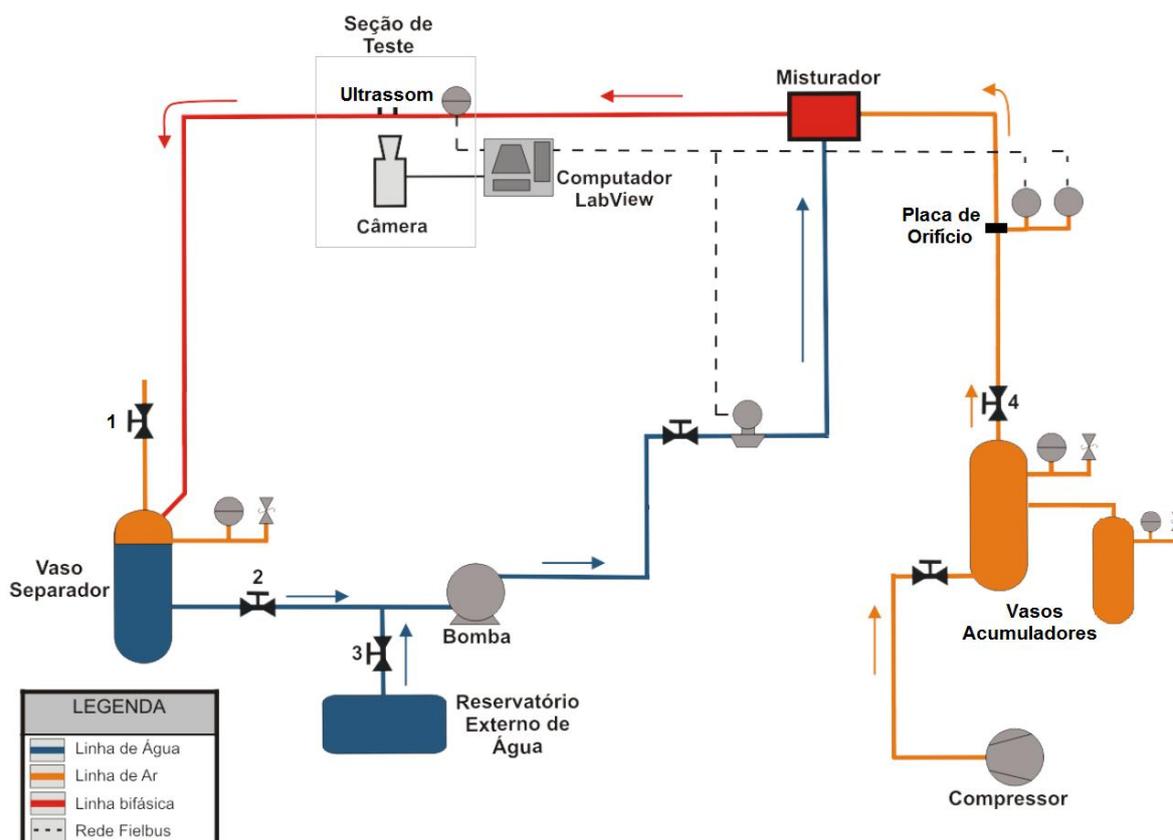


Figura 8 – Representação esquemática da bancada experimental

Fonte: adaptado Pandolfo, 2011

O deslocamento do líquido é feito por uma bomba centrífuga do modelo Fabo Bombas BCIE602/7822, com uma pressão de 20 m de coluna de água, vazão de 15000 l/h e rotação de 3450 rpm, que é alimentada por um motor trifásico WEG de 3CV, e tem o controle de vazão feito por intermédio de um inversor de frequência WEG CFW08. A medição de vazão é feita por um medidor do tipo Coriolis, do modelo Micromotion F050S11, que apresenta compatibilidade com o protocolo *Foundation Fieldbus*, possibilitando dessa forma a comunicação com o sistema supervisão, que será descrito em detalhes na seção 3.2. Após passar pelo medidor de vazão o líquido é conduzido até o misturador, e depois ao tubo de acrílico.

3.1.2 Circuito de gás

O circuito de gás, representado pela cor laranja na Figura 8, é composto por um compressor, dois vasos acumuladores, um medidor de pressão diferencial, um medidor de pressão relativa e uma placa de orifício.

Foi usado um compressor elétrico rotativo da marca PEG, com capacidade de 10 fpm e pressão máxima de 8 bar. Sua função consiste em pressurizar o sistema e circular ar comprimido pelo circuito. Um dos vasos de pressão tem a mesma especificação do usado no circuito de líquido, enquanto que o outro difere apenas em sua capacidade, que é de 500 litros.

A vazão de gás é medida por um sistema com uma placa de orifício. O medidor de pressão diferencial Rosemount 2051CD (que mede pressões entre 0 e 250 polegadas de água) avalia a diferença de pressão entre as duas tomadas na placa de orifício, e o medidor de pressão relativa Rosemount 3051TG (que mede pressões entre 0 e 150 psi) avalia a pressão na entrada da placa. No Apêndice A é descrito em detalhes todo o processo de calibração da placa de orifício, bem como o cálculo da velocidade superficial de gás na seção de testes. É importante ressaltar que os medidores de pressão utilizados possuem compatibilidade com o protocolo *Foundation Fieldbus*, proporcionando sua comunicação com o sistema supervisor. Depois de passar pelo sistema de medição de vazão, o gás é conduzido ao misturador e posteriormente à tubulação de acrílico.

3.1.3 Circuito bifásico

A mistura bifásica, representada pela cor vermelha na Figura 8, inicia-se no misturador, desenvolve-se pela tubulação horizontal, passando pela seção de testes, e então é descarregada no vaso separador.

O misturador promove a interação entre as fases injetando na tubulação as correntes de líquido e gás de forma paralela, estando o gás acima do líquido. A tubulação é fabricada em acrílico transparente, com 9 m de comprimento e 26 mm de diâmetro interno. Na seção de testes, descrita com mais detalhes na seção 3.1.6, foi instalado um medidor de pressão do modelo Rosemount 3051TG (que mede pressões entre 0 e 10 bar), compatível com o protocolo *Foundation Fieldbus*.

A mistura bifásica é despejada no interior do vaso separador, onde, pela ação da gravidade, o líquido tende a ocupar a região inferior e o gás a região superior. A sucção da bomba é feita pela região inferior do vaso separador, retirando o líquido ainda pressurizado. O gás é retirado pela região superior, e liberado para atmosfera após passar pela válvula que faz o controle da vazão de gás no escoamento.

3.1.4 Câmera de alta taxa de aquisição de imagens

A câmera utilizada foi a IDT X-Series MotionPro X3, mostrada na Figura 9. Ela pode proporcionar uma taxa de aquisição máxima de 1040 imagens por segundo com uma resolução de 1280x1024, um tempo de exposição mínimo de 1 μ s e conta com 4 GB de memória disponível para armazenamento de dados.



Figura 9 – Câmera de alta taxa de aquisição de imagens

A câmera conta com um *software* próprio (Motion Studio), no qual podem ser ajustados parâmetros da filmagem, tais como a taxa de aquisição de imagens, o tempo de exposição, a região que será efetivamente filmada, e o número de quadros que serão adquiridos. O ajuste do foco é realizado através da manipulação sobre a lente da câmera.

Para cada ponto experimental foi gravada uma série de imagens no formato TIFF com resolução 380 pixels de altura e 1280 pixels de comprimento. A taxa de aquisição utilizada foi de 200 quadros por segundo, e o tempo de escoamento filmado, limitado pela memória da câmera, foi de 30 segundos, o que corresponde a 6000 imagens. Um tempo de exposição de 150 μ s foi escolhido.

3.1.5 Ultrassom

A sonda ultrassônica utilizada nos testes foi desenvolvida na UTFPR, no Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado – LASCA por Ofuchi (2011). Ela é composta por um *hardware* para geração e aquisição de pulsos de ultrassom, e um *software* para controle de parâmetros do sistema. A Figura 10 mostra a tela principal do *software*, com os parâmetros utilizados nos experimentos.

Foi instalado um par de transdutores Panametrics™ do tipo duplo elemento – sensores que possuem um emissor e um receptor no mesmo encapsulamento. A frequência utilizada pelos transdutores foi de 5 MHz, a uma taxa de repetição de 500 Hz. O tempo de aquisição de cada medida foi de 30 segundos, para que o ultrassom capture o mesmo período que a câmera. Os transdutores foram posicionados abaixo da tubulação, de modo que o pulso de ultrassom atinja a fase líquida antes da fase gasosa no escoamento em golfadas. Isso possibilitou a utilização da técnica pulso eco na determinação dos parâmetros de interesse do escoamento. O uso de um par de transdutores, espaçados por uma distância conhecida, é necessário para que seja possível o cálculo da velocidade da bolha.

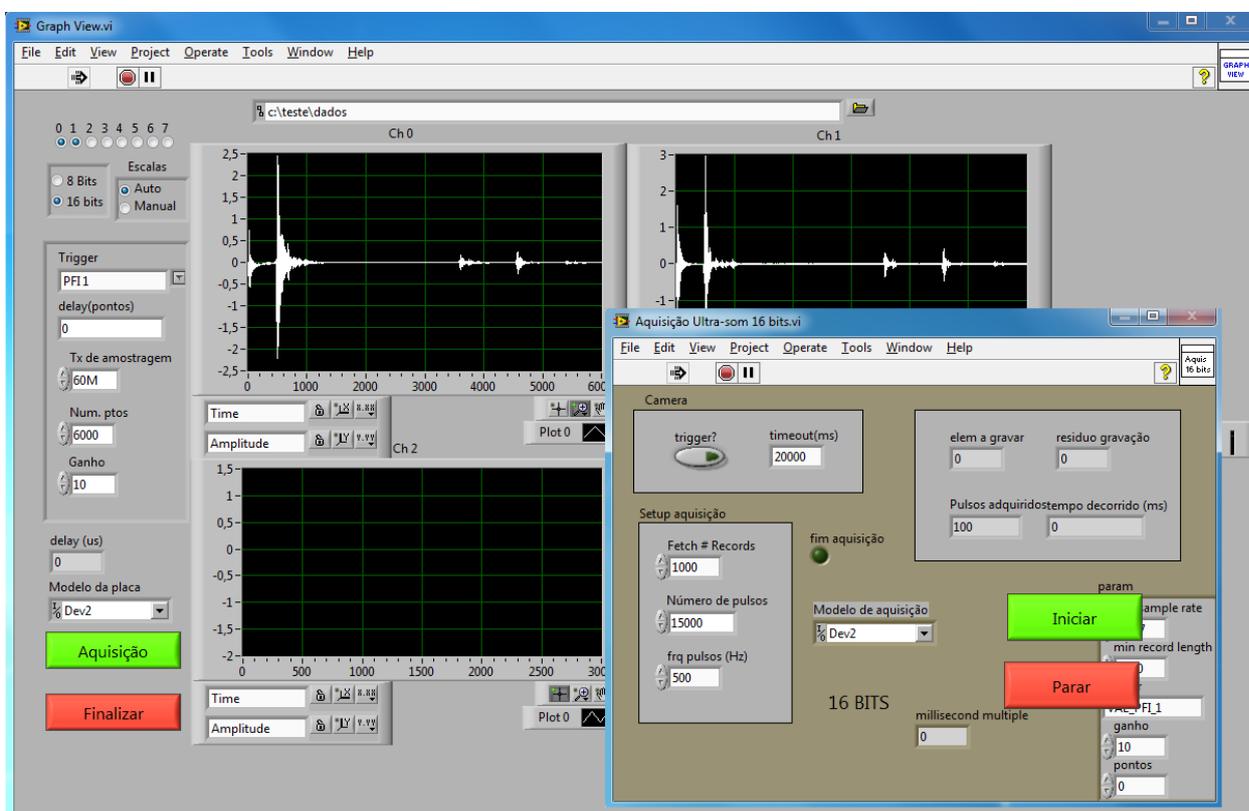


Figura 10 – Tela principal do software do ultrassom

Os sinais ultrassônicos pulso eco adquiridos foram processados por um software, também desenvolvido no LASCA, para fornecer os parâmetros de interesse. Como resultado do processamento tem-se: os valores da velocidade da bolha (V_B), comprimento da bolha (L_B) e comprimento do pistão (L_S), para cada bolha e pistão do escoamento, e seus valores médios; o valor da frequência da

célula unitária (f), calculada através da razão do número de bolhas alongadas, N_B , que passou pela seção transversal do tubo pelo tempo de observação (T), como pode ser visto na equação (14). O fator de intermitência (β) foi calculado com os valores médios de L_B e L_S utilizando a equação (18).

3.1.6 Seção de testes

A seção de testes ficou localizada a uma distância de 7,5 m do misturador. Nela foi instalado um medidor de pressão utilizado para efetuar a correção no cálculo da velocidade superficial do gás (mostrada no Apêndice A), e extrair o valor da pressão utilizado nas análises do escoamento.

Uma caixa retangular de acrílico transparente, preenchida com água, envolveu a região do tubo em que foram feitas as medidas. Ela serviu para reduzir as distorções da imagem e os efeitos de aquecimento relativos à radiação da lâmpada, e também possibilitou que o ultrassom fosse posicionado na mesma seção em que foi realizada a filmagem.

Os dois transdutores de ultrassom foram instalados na parte inferior da caixa de acrílico (sustentados por um suporte que permitia ajustes de altura e profundidade), ficando alinhados com o centro do tubo e distantes 62,5 mm entre si. Para melhorar o acoplamento acústico entre as partes, foi aplicada uma camada de vaselina na interface do transdutor com o acrílico.

A iluminação na seção de testes foi feita com uma lâmpada de halogênio com 150 W colocada próxima da caixa de acrílico. Para garantir uma iluminação uniforme, importante na etapa de processamento das imagens, foi colocada uma superfície difusora entre a lâmpada e a caixa.

3.2 Sistema supervisório

A aquisição de dados no circuito experimental é feita através de uma rede de comunicação que utiliza o protocolo *Foundation Fieldbus*, cabos de transmissão e uma placa de aquisição tipo PCI da marca *National Instruments* acoplada a um computador.

A rede *Fieldbus* possibilita a conexão dos medidores de pressão vazão e temperatura com a placa de aquisição através de sinais digitais. Esses sinais obtidos

pela placa podem ser visualizados e armazenados no computador através do software *LabVIEW*, também da *National Instruments*.

O sistema supervisor consiste em um programa criado no *LabVIEW*, cujo painel frontal é mostrado na Figura 11, que serve para monitorar os valores de pressões e das velocidades superficiais das fases, além de gravar os dados adquiridos da planta.



Figura 11 – Painel frontal do programa em *LabVIEW*

A velocidade superficial de gás e as pressões têm seus valores instantâneos monitorados, enquanto que a velocidade superficial do líquido é ajustada pelo programa, que, através de um sistema de controle, utiliza um inversor de frequência para variar a rotação da bomba de modo a fornecer a velocidade desejada.

3.3 Procedimentos de teste

O primeiro passo a ser realizado é transferir a quantidade de líquido adequada do reservatório externo para o circuito de testes, isso é feito através da abertura da

válvula 3 e fechamento da válvula 2 (a numeração utilizada nesta seção refere-se a Figura 8), permitindo que a bomba desloque o fluido do reservatório até a vaso separador. Havendo a quantidade suficiente para realização dos experimentos, a válvula 2 é aberta e a válvula 3 fechada, fazendo com que o líquido passe a percorrer um circuito fechado.

Outro passo importante é ligar o compressor, mantendo a válvula 4 fechada, para que tanto o compressor quanto os vasos acumuladores iniciem os experimentos completamente preenchidos com ar a pressão de 8 bar (pressão máxima atingida pelo compressor). Isso é feito porque a vazão máxima fornecida pelo compressor muitas vezes não é suficiente para alcançar a velocidade superficial do gás desejada, fazendo com que a quantidade de ar armazenada, e consequentemente a pressão, nos vasos acumuladores tenda a diminuir.

Os *softwares* da câmera e do ultrassom são iniciados e então ajustados de acordo com o descrito em seções anteriores. No sistema supervisorio deve ser feita a seleção da placa de orifício que será utilizada.

Antes de partir para a realização efetiva dos testes, é necessário adquirir algumas imagens de referência que serão utilizadas no processamento dos dados da câmera. Uma imagem deve ser feita com uma régua próxima ao tubo, que será usada para posterior determinação do tamanho correspondente de cada pixel em metros. Uma sequência de imagens, agora focalizando somente a região de interesse do tubo, deve ser feita apenas com vazão de líquido passando pela seção de testes, o que será útil para diferenciar as fases no tratamento de imagem.

As velocidades superficiais e a pressão para um ponto experimental devem então ser ajustadas. A velocidade superficial do líquido é inserida no sistema supervisorio, que ajusta a rotação da bomba de forma a alcançá-la e mantê-la. O controle da pressão é feito através da abertura da válvula reguladora de pressão (válvula 4), e o controle da velocidade superficial de gás é feito pela abertura e fechamento da válvula 1. Essas duas variáveis devem ser controladas em conjunto, pois uma exerce influência sobre a outra. É importante que o compressor permaneça ligado durante a realização dos testes para diminuir a taxa de redução da pressão nos vasos acumuladores.

Quando todas as variáveis atingem o valor desejado, e ficam estáveis por um período de tempo, é feita a aquisição de dados com a câmera, com o ultrassom e com o sistema supervisor, sendo o início da gravação da câmera e do ultrassom sincronizado por um sinal *trigger*. Ao final da aquisição, os dados armazenados na memória da câmera devem ser transferidos para o disco rígido do computador. Depois disso, podem-se iniciar os ajustes para o próximo ponto experimental seguindo o mesmo procedimento.

3.4 Processamento dos dados da câmera

O processamento dos dados obtidos com a câmera é feito através de um algoritmo implementado em MatLab, o qual pode ser dividido em três etapas: tratamento de imagem, detecção das posições do nariz e da traseira da bolha e determinação dos parâmetros do escoamento.

3.4.1 Tratamento de imagem

A câmera fornece imagens digitais em escalas de cinzas, a qual pode ser considerada como uma matriz com M linhas e N colunas, com cada ponto MN , chamado de pixel, assumindo um valor entre 0 e 255 para representar sua tonalidade de cinza. Nessa representação 0 indica que o ponto é preto, 255 indica que é branco, e os valores intermediários denotam o nível de cinza da imagem. A Figura 12 mostra a representação de uma imagem digital em escala de cinza.

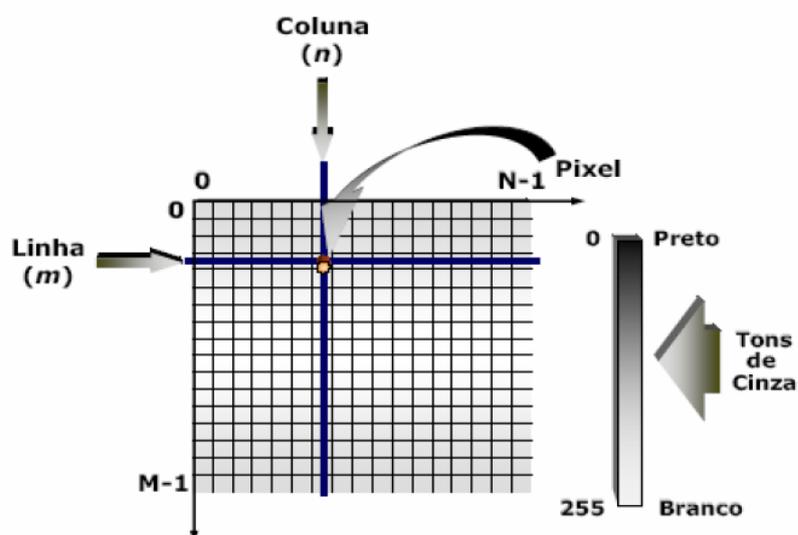


Figura 12 – Representação de uma imagem digital

Fonte: Souza e Correia, 2007

Outra maneira de representar uma imagem é na forma binária, em que ela continua sendo considerada uma matriz, porém os pixels podem assumir apenas dois valores, 0 para preto e 1 para branco. Uma imagem como essa é bastante desejada quando se tem a intenção de diferenciar objetos.

Portanto, o objetivo do tratamento de imagem neste trabalho é transformar a imagem em escala de cinzas, fornecida pela câmera, em binária, de forma que sejam diferenciadas as bolhas alongadas do resto do escoamento. Foi definido que o preto representará a bolha e o branco o líquido.

Devido à aeração que pode aparecer no pistão logo atrás da traseira da bolha, foi necessário desenvolver duas técnicas distintas de tratamento de imagem, uma para determinação do nariz e outra para determinação da traseira da bolha alongada.

3.4.1.1 Tratamento de imagem para o nariz da bolha

O tratamento para o nariz da bolha é baseado na comparação entre uma imagem padrão e a que se deseja tratar. Uma sequência de imagens é adquirida com vazão apenas de líquido no tubo, e a média entre elas é considerada o padrão. Essa média busca minimizar os efeitos das possíveis variações de iluminação.

O processo de tratamento consiste na criação de uma imagem com as mesmas dimensões da que está sendo tratada. Cada pixel da nova imagem assume o valor 0 se a diferença entre os pixels correspondentes da imagem tratada e da imagem padrão for maior que um determinado valor, e assume o valor 1 se a diferença for menor ou igual. O valor utilizado foi igual a 20, determinado empiricamente.

Como resultado desse processo, espera-se conseguir uma imagem em que o preto represente o gás e o branco o líquido. A Figura 13 mostra a imagem criada a partir da real e da padrão.

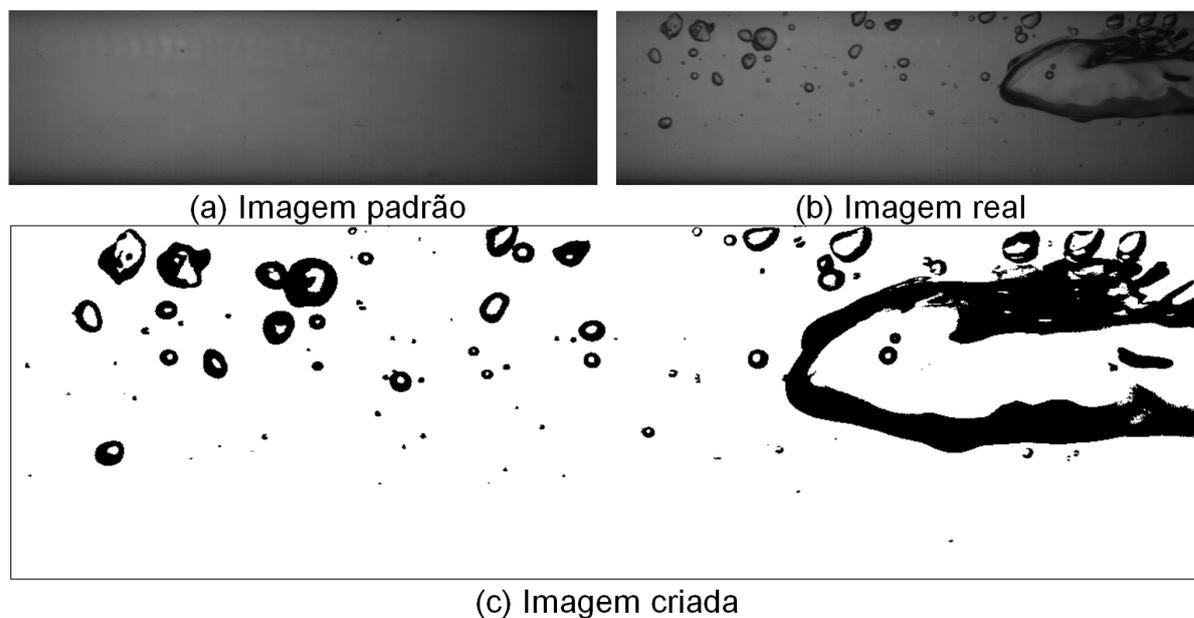


Figura 13 – Imagem criada a partir do tratamento

Agora é necessário distinguir a bolha alongada do restante do gás contido na imagem. Isso é feito eliminando os objetos que não estão em contato com as fronteiras laterais ou superior da imagem, e preenchendo os objetos restantes. Dessa forma as bolhas dispersas no escoamento, que influenciariam na detecção do nariz da bolha são eliminadas. Esse processo é feito com a utilização da função *imfill*, contida na biblioteca de tratamento de imagens do Matlab. O resultado pode ser visto na Figura 14.

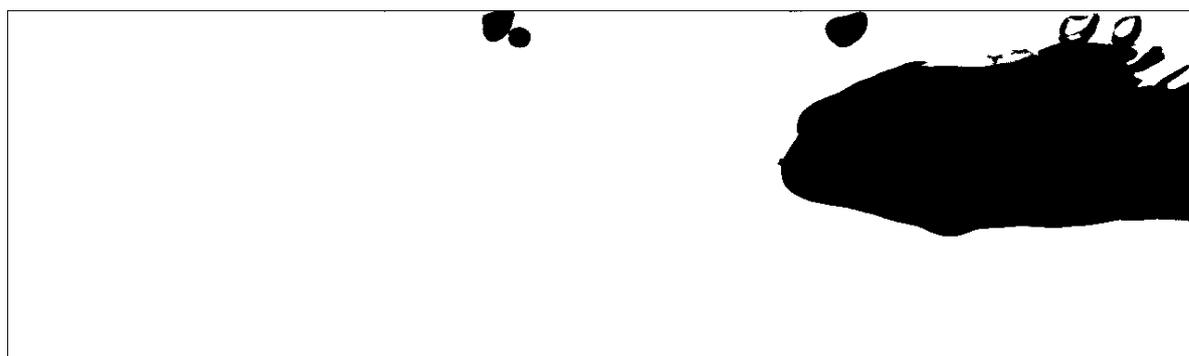


Figura 14 – Eliminação e preenchimento de objetos

A Figura 14 é o produto final do tratamento de imagem, em que o preto deve representar somente a bolha alongada. É possível observar na região superior

algumas bolhas dispersas, porém elas não terão efeito sobre a determinação da posição do nariz da bolha.

3.4.1.2 Tratamento de imagem para a traseira da bolha

Como o tratamento apresentado para determinação da posição do nariz da bolha não foi capaz de determinar a posição da traseira, devido a grande quantidade de bolhas dispersas que aparecem em determinadas vazões, foi necessária outra abordagem mais complexa e mais dispendiosa computacionalmente, que se baseou na transformada de *watershed*.

Transformada de *watershed* é uma abordagem de morfologia matemática que transforma uma imagem em escala de cinzas em uma superfície topográfica, onde o valor de cada pixel correspondente a sua elevação. Ela funciona como uma inundação, em que a água preenche os valores mínimos das escalas de cinza da imagem, quando a inundação de dois mínimos se encontra é construída uma barragem para identificar a fronteira entre eles (PRATIKAKIS, 1999).

São necessários pré-processamentos para garantir que a utilização da transformada seja eficiente, a Figura 15 (a-f) mostra a sequência usada nesse projeto. Na Figura 15 (g) pode ser visto o resultado obtido com a aplicação da transformada de watershed após o pré-processamento escolhido. Ele mostrou-se eficiente, pois é possível diferenciar na imagem a região pertencente à bolha alongada das bolhas dispersas.

Finalmente, é necessário fazer com que o programa reconheça a região que representa a bolha alongada. Isso é feito de maneira que seja escolhida a maior região, exceto o fundo, que toque a fronteira esquerda da imagem. A região escolhida pode ser vista na Figura 15 (h). O resultado final deste tratamento é a imagem binária mostrada na Figura 15 (i).

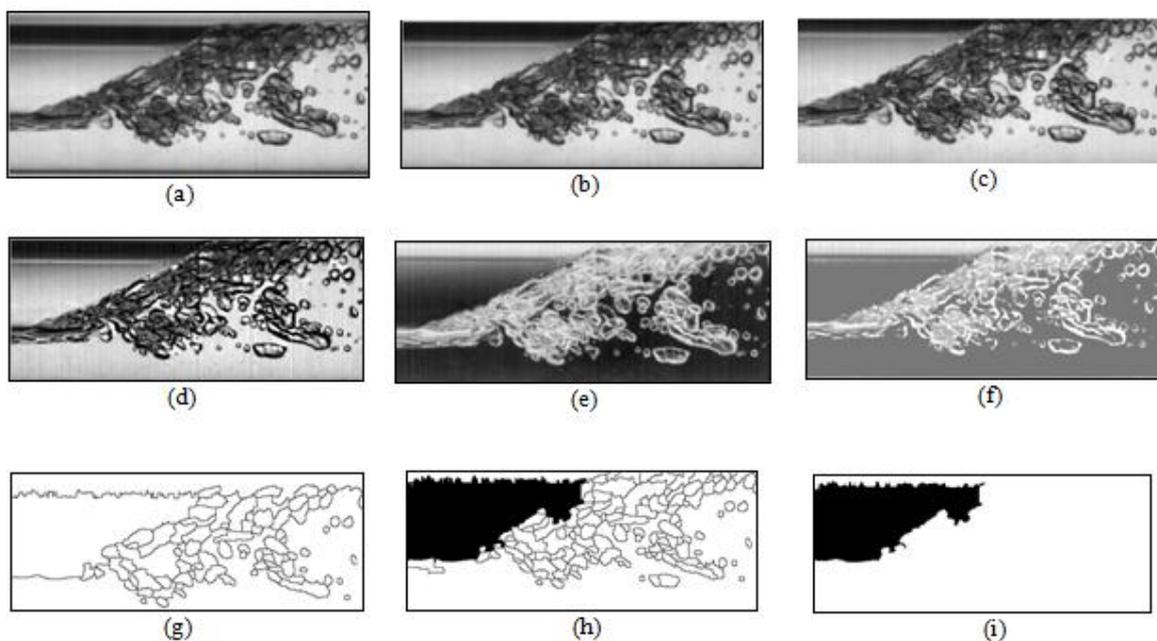


Figura 15 – Passos utilizados no tratamento de imagem para a traseira da bolha

3.4.2 Detecção das posições do nariz e da traseira da bolha

Com a bolha alongada identificada pelos tratamentos descritos na seção 3.4.1, é necessário determinar as posições em que se encontram o seu nariz e a sua traseira. A seguir são mostradas as técnicas usadas nessa determinação.

3.4.2.1 Detecção da posição do nariz da bolha

Dois sensores virtuais são posicionados próximos à extremidade direita da imagem, com o objetivo de verificar a presença de uma bolha alongada. Eles funcionam medindo a altura de líquido nas seções em que estão inseridos. Isso é feito através fixação de uma coluna e da varredura, linha por linha, de baixo para cima na imagem verificando o valor de cada pixel, ao encontrar o primeiro pixel preto é definida então a altura de líquido como a distância entre ele e a parte inferior da imagem. Quando a altura de líquido encontrada pelos dois sensores é menor que 65% do diâmetro do tubo, considera-se que uma bolha alongada está presente na imagem.

Após a detecção da existência de uma bolha, é iniciada a busca pela posição do seu nariz. Esse processo consiste em uma varredura da direita para a esquerda,

partindo do segundo sensor, medindo a altura de líquido em cada coluna da imagem. Quando a diferença do valor encontrado para uma coluna com o da coluna anterior é maior que 5% o diâmetro do tubo, considera-se esta como sendo a posição do nariz da bolha. Um esquema desse procedimento pode ser observado na Figura 16.

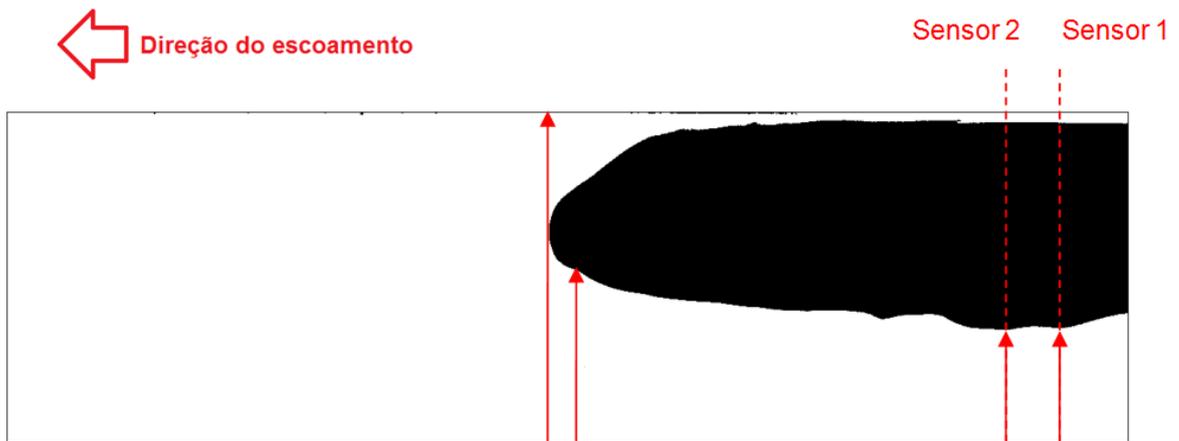


Figura 16 – Procedimento para determinação da posição da frente da bolha

Esse processo é repetido nas imagens seguintes, até que o nariz da bolha não esteja mais visível na seção filmada.

3.4.2.2 Detecção da posição da traseira da bolha

A detecção da posição da traseira da bolha é feita de maneira semelhante ao descrito para o nariz da bolha. Os dois sensores virtuais são posicionados no mesmo local, e quando ambos medem um valor de altura de líquido igual ao diâmetro do tubo, considera-se que a traseira da bolha está presente na imagem.

Então é iniciada a busca pela posição da traseira da bolha. Isso é feito também através de uma varredura da direita para a esquerda, partindo do segundo sensor, medindo a altura de líquido em cada coluna da imagem. Porém agora, quando a altura de líquido em uma coluna é menor que o diâmetro do tubo, considera-se esta como sendo a posição da traseira da bolha. A Figura 17 mostra um esquema desse processo.

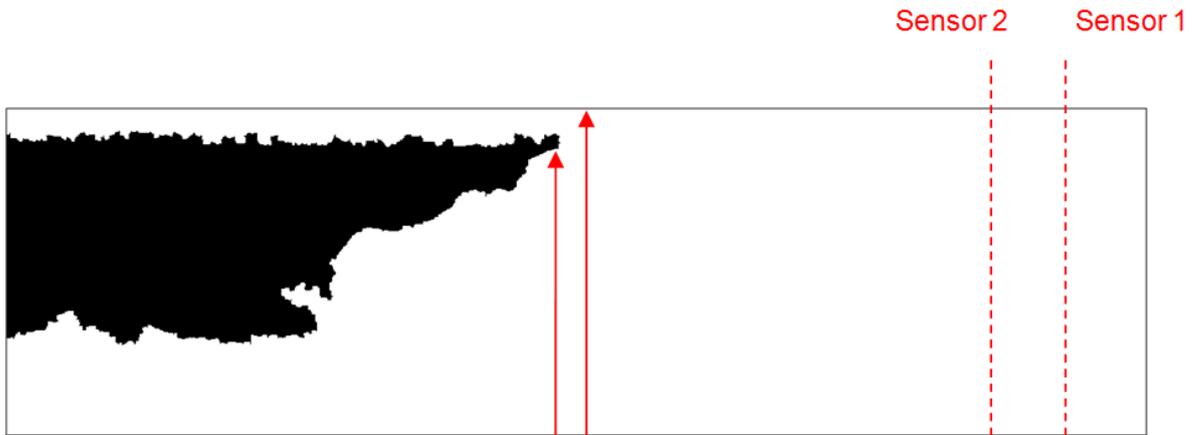


Figura 17 – Procedimento para determinação da posição da traseira da bolha

3.4.3 Determinação dos parâmetros do escoamento

Os parâmetros do escoamento avaliados foram a velocidade (V_B) e o comprimento da bolha alongada (L_B), o comprimento do pistão (L_S), a frequência (f) e o fator de intermitência (β).

A velocidade da bolha alongada foi calculada conforme mostrado na equação (19).

$$V_B = \frac{\Delta X_p}{\Delta Img} \cdot (T_p) \cdot (F_R) \quad (19)$$

Sendo ΔX_p a diferença da posição em que está o nariz da bolha de quando ela entra a quando ela sai do campo de visão da câmera (pixels), ΔImg o número de imagens em que a frente da bolha aparece (imagens), T_p o tamanho de cada pixel da imagem (m/pixel) e F_R a taxa de aquisição de imagens (imagens/s). O valor de T_p é determinado a partir de uma imagem padrão feita com uma régua próxima ao tubo.

Com o valor calculado para velocidade e as posições determinadas da frente (seção 3.4.2.1) e da traseira da bolha (seção 3.4.2.2), além dos parâmetros conhecidos de filmagem como taxa de aquisição e tamanho de cada pixel, é

possível a determinação do comprimento da bolha analisada através da equação (20).

$$L_B = T_p(X_T - X_F) + \left(\frac{V_B}{F_R}\right) \cdot (\Delta Img) \quad (20)$$

Com X_T e X_F representando respectivamente a posição da traseira e da frente da bolha nas imagens em que cada uma aparece, F_R a taxa de aquisição de imagens (imagens/s), T_p o tamanho de cada pixel (m/pixel), V_B a velocidade da bolha (m/s) e ΔImg o número de imagens de diferença entre calda e nariz.

O comprimento do pistão é determinado de forma similar ao apresentado no cálculo do comprimento da bolha. Porém no cálculo do comprimento do pistão, mostrado na equação (21), as posições consideradas como seu início e final são, respectivamente, a da traseira da bolha anterior a ele X_{T_A} e a da frente da bolha posterior a ele X_{F_p} .

$$L_S = T_p(X_{F_p} - X_{T_A}) + \left(\frac{V_{B_p}}{F_R}\right) \cdot (\Delta Img) \quad (21)$$

Aplicando-se os resultados encontrados para V_B , L_B e L_S nas equações (13) e (18), repetidas abaixo, chega-se aos valores da frequência e do fator de intermitência.

$$f = \frac{V_B}{L_B + L_S} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{L_B}{L_B + L_S} \quad (18)$$

3.4.4 Visão geral do algoritmo

O algoritmo inicia procurando a primeira imagem do escoamento em que não há a presença de uma bolha alongada. A partir desta imagem, ele percorre as seguintes até encontrar o próximo quadro com a existência de uma bolha, então

determina a posição de seu nariz no quadro atual e em todos os seguintes no qual ele aparece. Com essas posições determinadas é feito o cálculo de V_B .

Depois disso, as imagens seguintes são percorridas até encontrar a presença da traseira da bolha, sua posição é determinada, permitindo o cálculo do valor de L_B . Na sequência é determinada a posição do nariz da próxima bolha, o que permite o cálculo dos valores de L_S , f e β .

O processo é repetido até que tenham sido analisadas todas as imagens do escoamento. Esse procedimento é ilustrado pelo fluxograma mostrado na Figura 18.

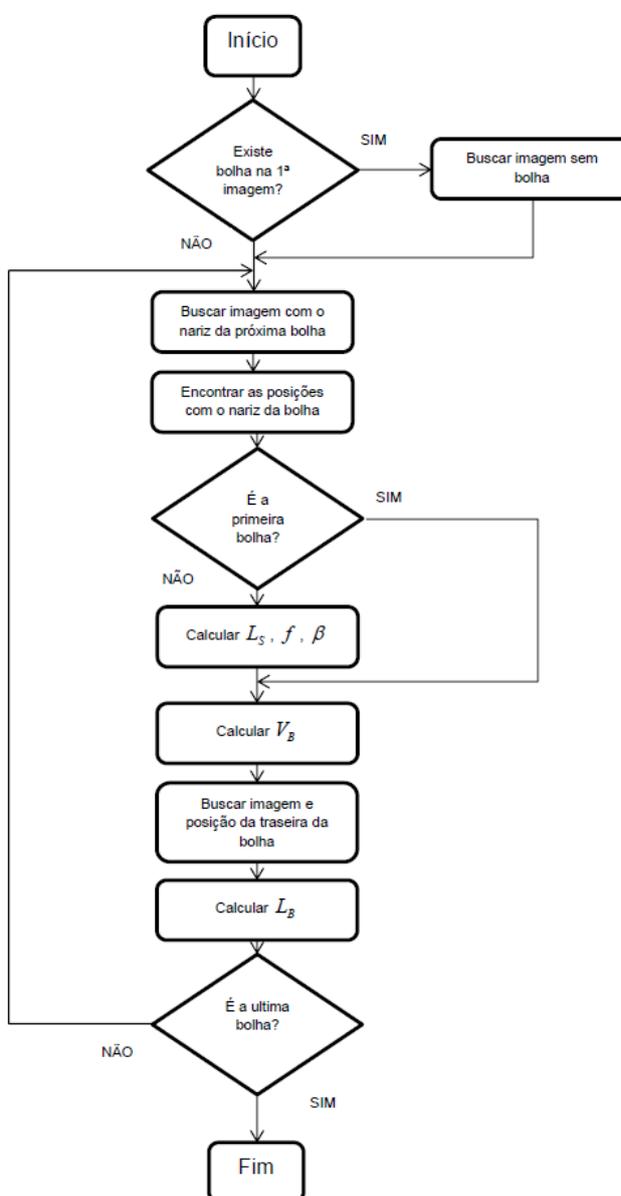


Figura 18 – Fluxograma do algoritmo utilizado

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentadas as análises dos resultados obtidos nos testes experimentais. Inicialmente é mostrada a grade de testes escolhida, em seguida é avaliada a influência da pressão nos parâmetros de escoamento. Depois disso, o comportamento dos parâmetros na pressão atmosférica é investigado. Uma análise qualitativa é feita sobre como o escoamento seria influenciado pela pressão, mantendo-se as vazões mássicas constantes. Por fim, são feitas algumas considerações sobre a solubilidade da fase gasosa.

4.1 Grade de testes

As velocidades superficiais de líquido e gás foram definidas de forma a proporcionar escoamento em golfadas na pressão atmosférica. Foram escolhidas 11 combinações diferentes, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Grade de testes

$J(m/s)$	$J_G(m/s)$	$J_L(m/s)$
1,00	0,30	0,70
	0,50	0,50
	0,70	0,30
1,50	0,50	1,00
	0,75	0,75
	1,00	0,50
2,00	0,50	1,50
	0,75	1,25
	1,00	1,00
	1,25	0,75
	1,50	0,50

Essas combinações são mostradas no mapa de fluxo proposto por Taitel e Dukler (1976) para escoamentos horizontais à pressão atmosférica, representado pela Figura 19.

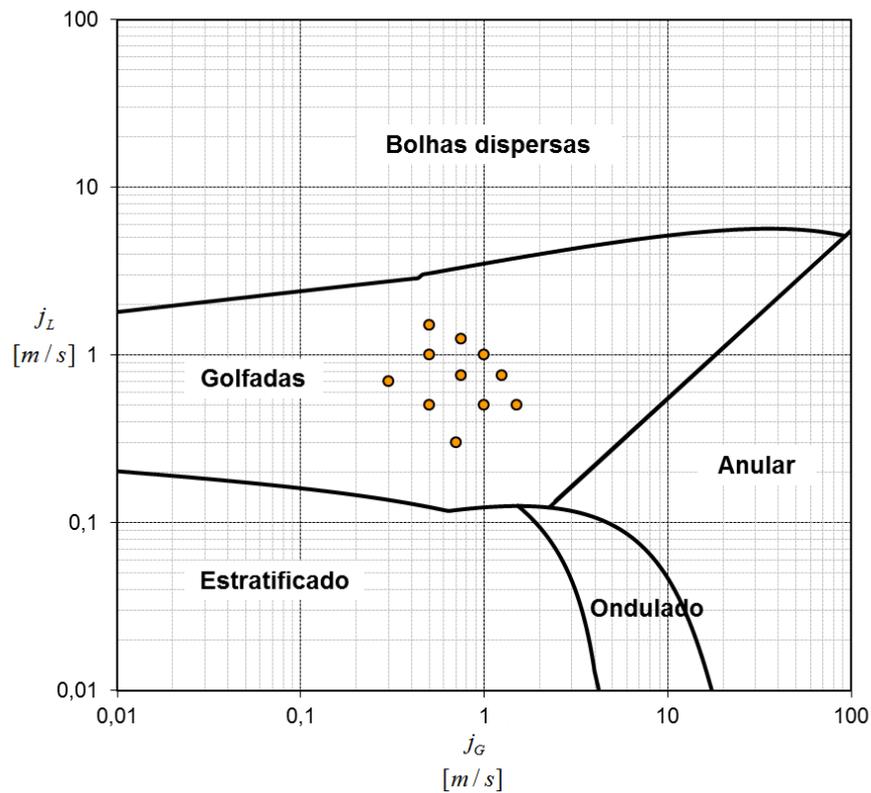


Figura 19 – Grade de testes em um mapa de fluxo para escoamentos horizontais

Fonte: adaptado Taitel e Dukler, 1976

Os testes foram feitos para essas combinações de velocidades superficiais, com pressões variando da atmosférica até 6 bar manométrico, em intervalos de 1 bar, totalizando 77 pontos de medição.

4.2 Análise da influência da pressão nos parâmetros do escoamento

Os resultados completos obtidos nos experimentos são apresentados no Apêndice C. Porém, como todos os pontos tiveram um comportamento semelhante com o aumento da pressão, para facilitar a visualização dos resultados, esta seção apresentará discussões sobre três deles. Sendo eles as combinações de $(j_G ; j_L)$ em (m/s): $(0,5 ; 0,5)$, $(0,5 ; 1,0)$ e $(0,75 ; 1,25)$, cada um representando uma velocidade da mistura. A Tabela 3 mostra os parâmetros de escoamento medidos nesses pontos para cada valor de pressão, com a câmera e com o ultrassom.

Tabela 3 – Resultados dos parâmetros de escoamento medidos

JG	JL		0 bar		1 bar		2 bar		3 bar		4 bar		5 bar		6 bar	
			Câm.	Ultras.	Câm.	Ultras.	Câm.	Ultras.	Câm.	Ultras.	Câm.	Ultras.	Câm.	Ultras.	Câm.	Ultras.
0,50	0,50	VB (m/s)	1,276	1,249	1,240	1,198	1,284	1,260	1,262	1,250	1,234	1,248	1,254	1,260	1,269	1,261
		LB (m)	0,595	0,555	0,507	0,515	0,585	0,572	0,514	0,521	0,554	0,545	0,564	0,546	0,519	0,512
		LS (m)	0,461	0,395	0,432	0,373	0,352	0,374	0,382	0,360	0,391	0,359	0,425	0,353	0,310	0,305
		f (Hz)	1,441	1,200	1,591	1,300	1,440	1,300	1,725	1,367	1,450	1,333	1,431	1,367	1,766	1,500
		β	0,578	0,584	0,573	0,580	0,595	0,605	0,583	0,591	0,596	0,603	0,595	0,608	0,622	0,627
		JG Real	0,503		0,504		0,508		0,500		0,501		0,492		0,503	
		JL Real	0,499		0,501		0,500		0,499		0,500		0,500		0,500	
		P Real	0,028		1,057		1,981		2,907		4,061		4,863		6,037	
		0,50	1,00	VB (m/s)	1,826	1,792	1,821	1,750	1,832	1,808	1,837	1,831	1,840	1,804	1,835	1,723
LB (m)	0,208			0,227	0,221	0,211	0,211	0,216	0,215	0,209	0,226	0,209	0,226	0,229	0,187	0,196
LS (m)	0,273			0,239	0,242	0,229	0,244	0,215	0,216	0,206	0,235	0,224	0,223	0,209	0,225	0,202
f (Hz)	4,302			3,734	4,547	4,000	4,756	4,100	4,855	4,367	4,416	3,967	4,830	3,900	5,077	4,334
β	0,448			0,487	0,493	0,480	0,496	0,500	0,513	0,503	0,508	0,483	0,525	0,524	0,459	0,492
JG Real	0,500			0,494		0,508		0,500		0,501		0,500		0,493		
JL Real	1,000			1,000		1,001		1,000		1,000		1,000		1,000		
P Real	0,045			1,028		1,939		2,877		4,016		4,945		5,469		
0,75	1,25			VB (m/s)	2,471	2,503	2,422	2,412	2,441	2,407	2,457	2,614	2,444	2,432	2,485	2,419
		LB (m)	0,260	0,296	0,283	0,309	0,300	0,317	0,266	0,319	0,209	0,300	0,205	0,316	0,280	0,314
		LS (m)	0,312	0,245	0,275	0,247	0,298	0,238	0,309	0,244	0,357	0,227	0,367	0,227	0,280	0,220
		f (Hz)	4,953	4,300	4,765	4,200	4,632	4,234	4,788	4,167	4,898	4,467	4,750	4,000	5,072	4,467
		β	0,477	0,547	0,518	0,556	0,516	0,571	0,459	0,566	0,387	0,569	0,371	0,582	0,519	0,588
		JG Real	0,745		0,749		0,750		0,753		0,743		0,758		0,756	
		JL Real	1,250		1,250		1,250		1,250		1,250		1,250		1,250	
		P Real	0,097		1,009		1,883		2,696		3,587		5,075		5,531	

Os valores de JG Real, JL Real e P Real representam as velocidades superficiais e a pressão medida pelo sistema supervisorio durante a aquisição de dados.

Da Figura 20 a Figura 24 é mostrada a variação da velocidade da bolha, comprimento da bolha, comprimento do pistão, frequência e fator de intermitência, com o aumento da pressão.

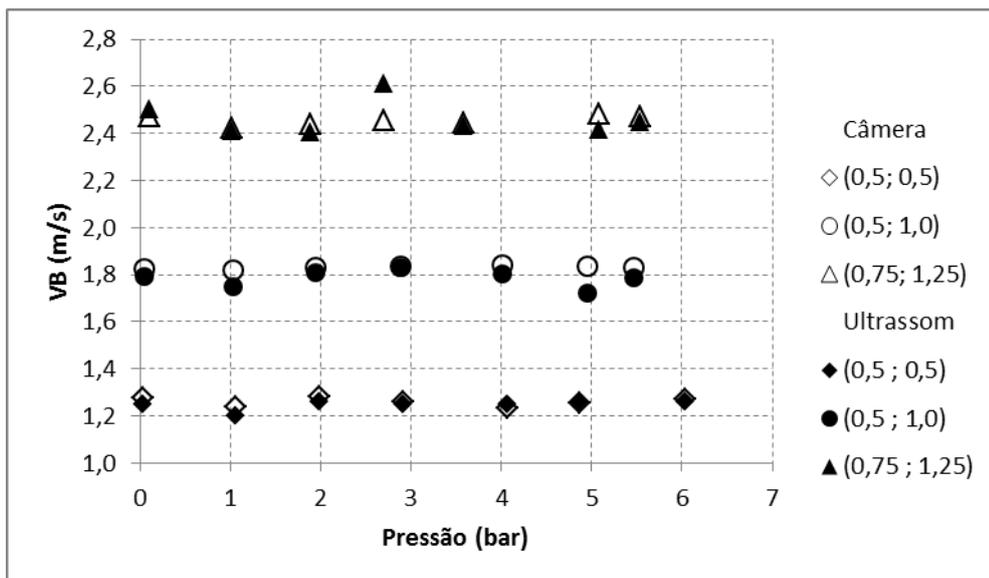


Figura 20 – Variação da velocidade da bolha com a pressão

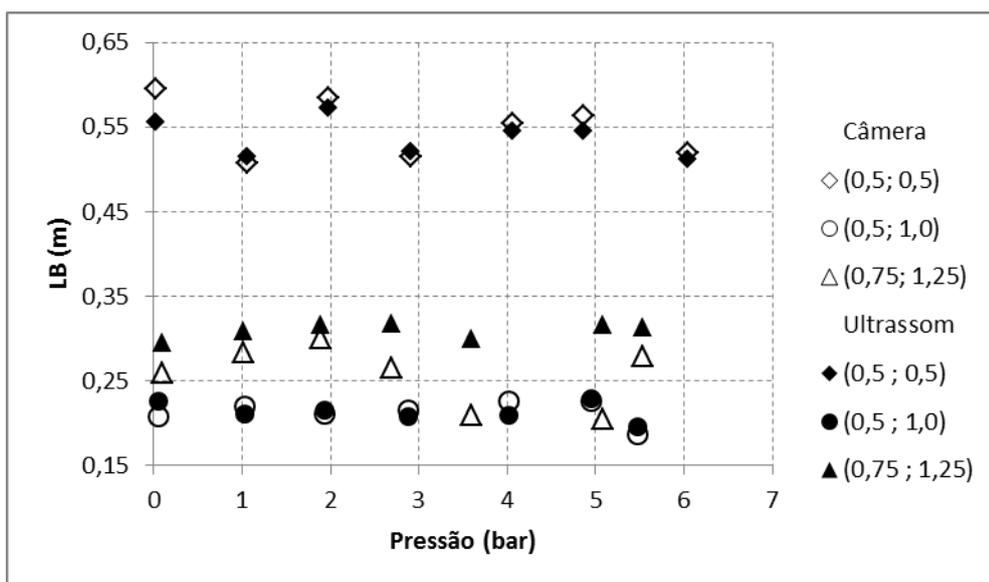


Figura 21 – Variação do comprimento da bolha com a pressão

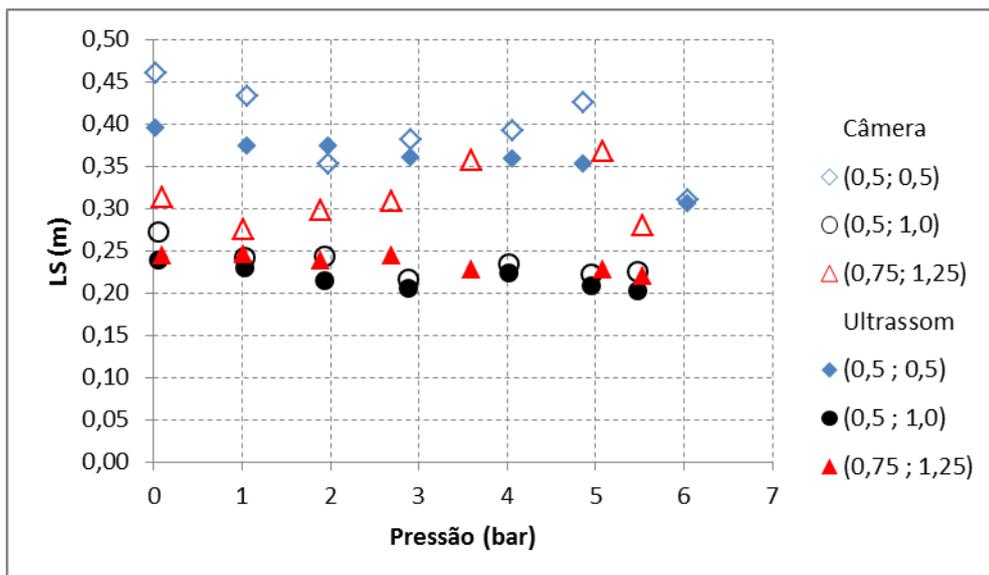


Figura 22 – Variação do comprimento do pistão com a pressão

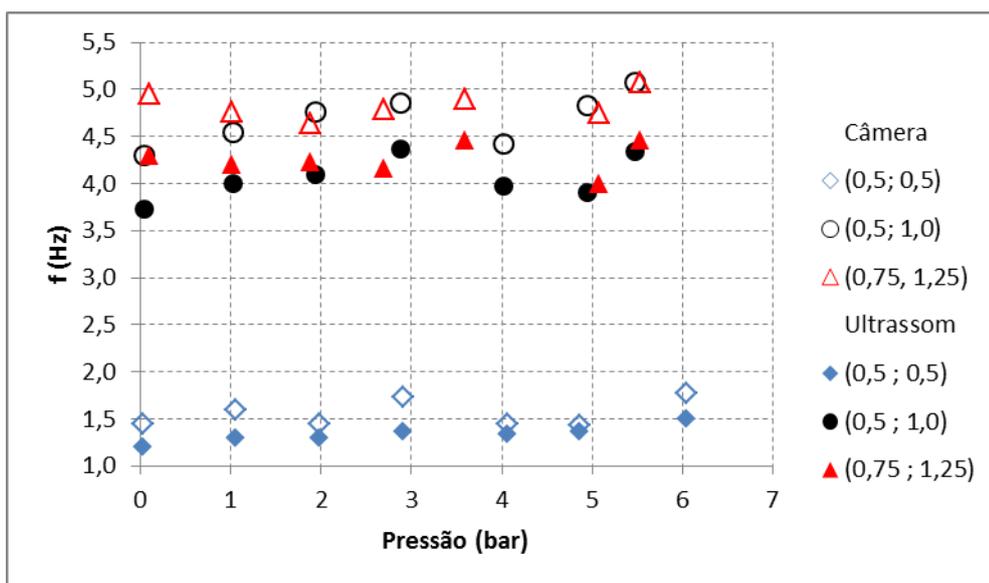


Figura 23 – Variação da frequência com a pressão

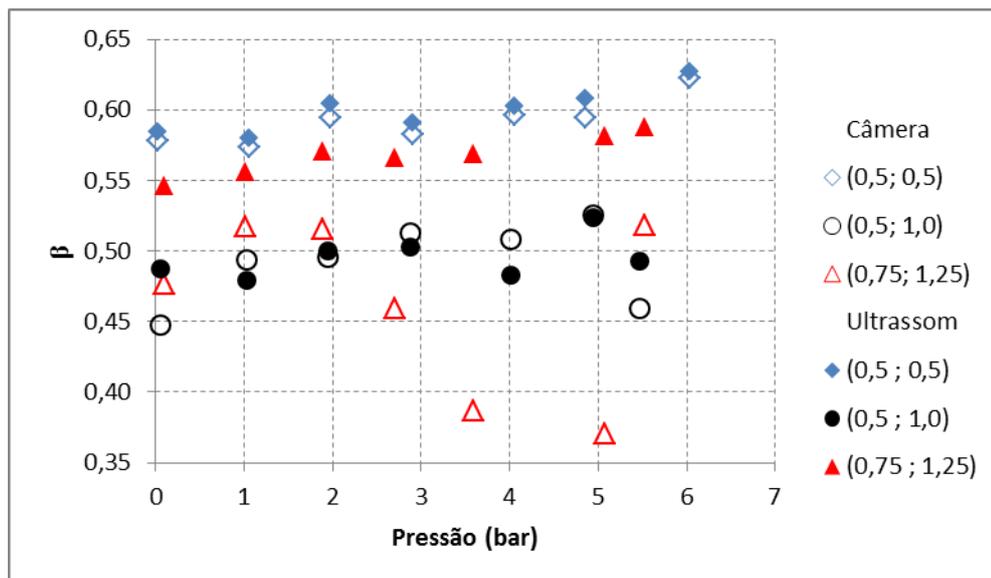


Figura 24 – Variação do fator de intermitência com a pressão

O desvio médio percentual dos valores obtidos nas diferentes pressões para cada combinação de $(J_G ; J_L)$ são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Média e desvio médio percentual

JG	JL		Desvio Médio percentual
0,50	0,50	VB (m/s)	1,1%
		LB (m)	4,5%
		LS (m)	8,6%
		f (Hz)	8,1%
		β	2,1%
0,50	1,00	VB (m/s)	1,5%
		LB (m)	4,3%
		LS (m)	6,2%
		f (Hz)	7,4%
		β	3,3%
0,75	1,25	VB (m/s)	1,5%
		LB (m)	10,1%
		LS (m)	14,3%
		f (Hz)	6,3%
		β	10,3%

Observando-se as Figuras 20-24, juntamente com os desvios mostrados na Tabela 4, é possível notar que os parâmetros tendem a permanecer constantes com o aumento da pressão.

O ponto (0,75 ;1,25) apresentou um maior desvio em relação à média para os valores do comprimento da bolha, comprimento do pistão, e fator de intermitência. Porém, não há uma tendência de variação com a pressão, o que causa esse desvio são os valores obtidos pela câmera para as pressões de 4 e 5 bar que possivelmente apresentaram alguma falha no processamento.

Para as demais combinações de velocidades superficiais, como pode ser observado no Apêndice C, o aumento da pressão também não causou influência significativa nos valores médios dos parâmetros do escoamento.

Gráficos com as funções densidade de probabilidade (PDF) da velocidade da bolha, comprimento da bolha e comprimento do pistão para os 77 pontos analisados são apresentadas no Apêndice D.

Assim como os valores médios, as distribuições dos parâmetros de escoamento não foram significativamente alteradas com o aumento da pressão. Apenas os valores obtidos pela câmera para a velocidade da bolha, que apresentaram uma leve tendência de diminuição na dispersão dos resultados com o aumento da pressão, o que pode ser observado também nos desvios padrão, apresentados no Apêndice C. Porém, os valores obtidos pelo ultrassom não confirmaram essa tendência.

4.3 Análise da variação dos parâmetros na pressão atmosférica

Visto que o aumento da pressão não causou influência significativa nos parâmetros de escoamento, nesta seção será realizada a análise do escoamento para os pontos obtidos na pressão atmosférica, e essa análise pode ser estendida para as demais pressões.

4.3.1 Velocidade da bolha

Na Figura 25 são mostrados os valores médios de velocidade, obtidos pela câmera e pelo ultrassom, comparados com o modelo proposto por Bendiksen (1984)

(apresentado na seção 2.3.2). É demarcada na imagem a fronteira que representa 10% de erro para facilitar a visualização.

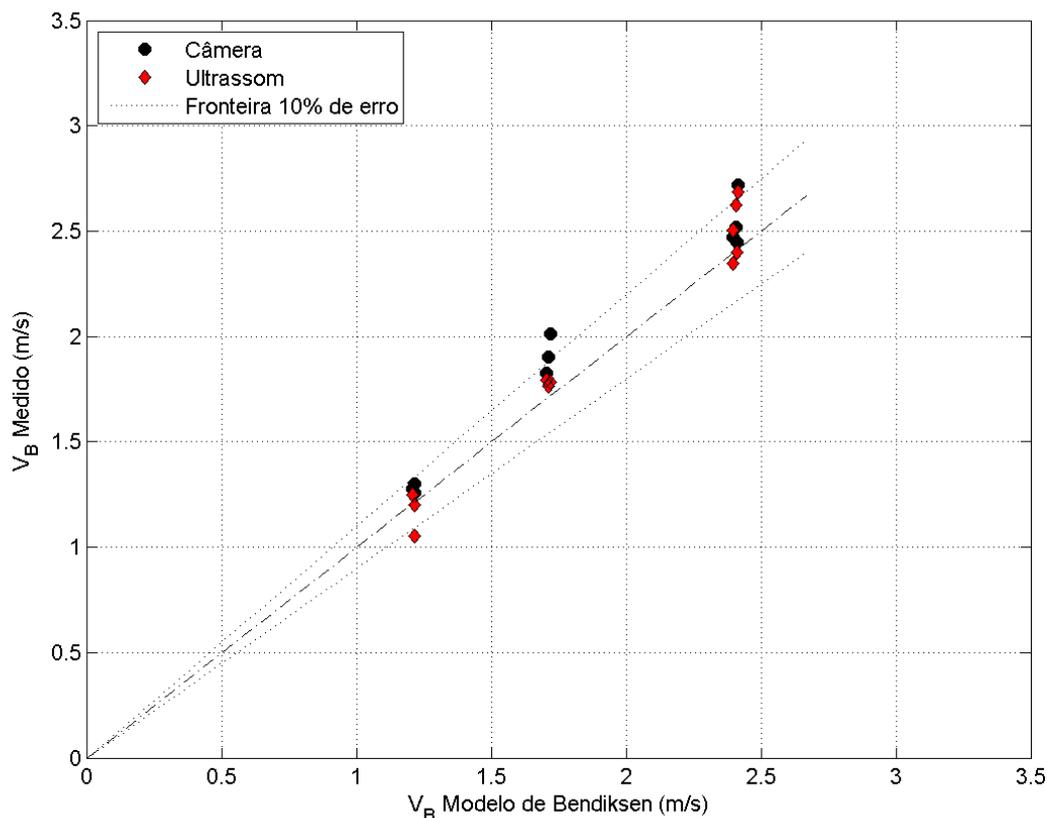


Figura 25 – Velocidade da bolha calculada em relação ao modelo de Bendiksen

É possível observar uma boa correlação dos resultados obtidos com os previstos pelo modelo, chegando-se a uma diferença média de 4,6%. Na Tabela 5 são mostradas as diferenças encontradas para as demais pressões.

Tabela 5 – Erro percentual das velocidades medidas em relação ao modelo de Bendiksen (1984)

	1 bar	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar
Ultrassom x Modelo	-1,9	0,2	3,3	-2,7	-3,8	1,7
Câmera x Modelo	4,4	5,3	5,0	5,6	5,6	5,7
Câmera e Ultrassom x modelo	1,3	2,8	4,1	1,4	0,9	3,7

O erro médio das medidas da câmera comparado com o ultrassom foi de 5,1% na pressão atmosférica, sendo que o ultrassom apresentou uma melhor correlação com o modelo, atingindo 2,1% de erro médio, enquanto que a câmera chegou a 7,0%. Essa tendência manteve-se para as outras pressões, como pode ser observado na Tabela 5.

A Figura 26 mostra o desvio padrão para cada ponto do escoamento, na pressão atmosférica, medido com a câmera e com o ultrassom.

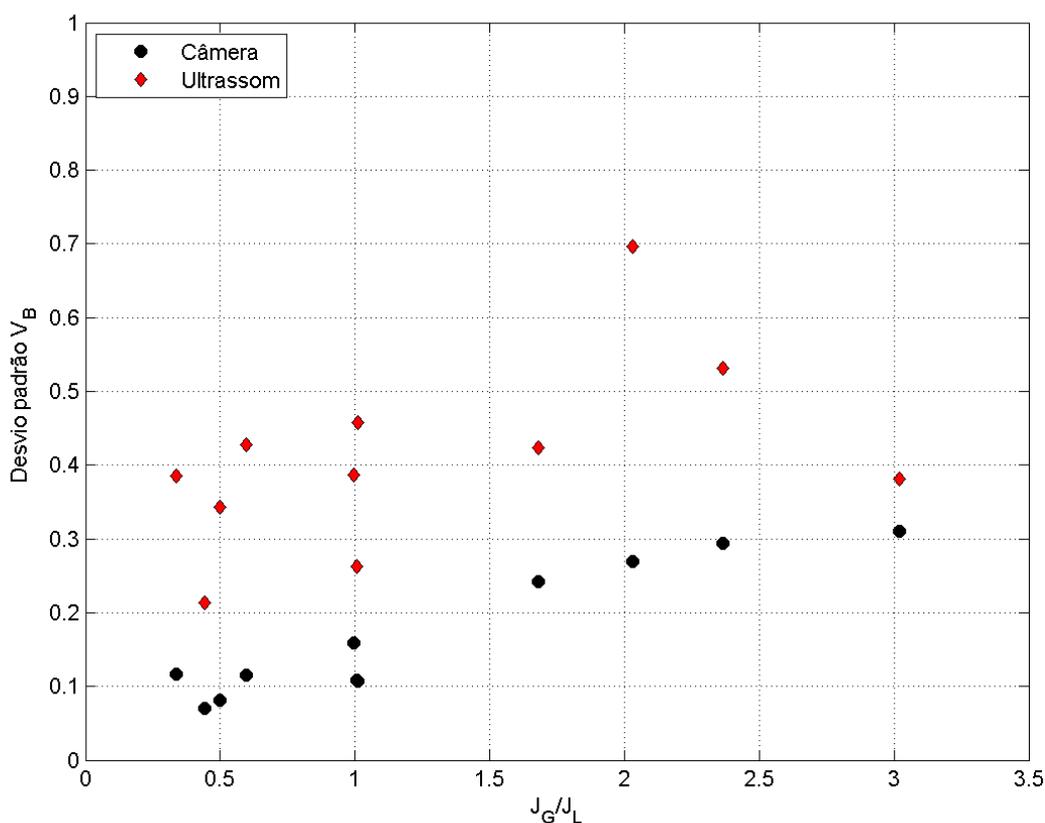


Figura 26 – Desvio padrão das medidas de velocidade da bolha

Nos dados da câmera é possível observar uma tendência de aumento no desvio padrão, ou seja, no espalhamento dos dados, com a relação J_G/J_L . Já nos dados do ultrassom não é encontrada uma tendência bem definida. Além disso, um valor menor de desvio padrão é encontrado pela câmera, em relação ao ultrassom, para todos os pontos analisados, incluindo as demais pressões.

4.3.2 Comprimento da bolha

Na Figura 27 é mostrado o comprimento médio da bolha em função da razão de velocidades J_G / J_L para os pontos analisados.

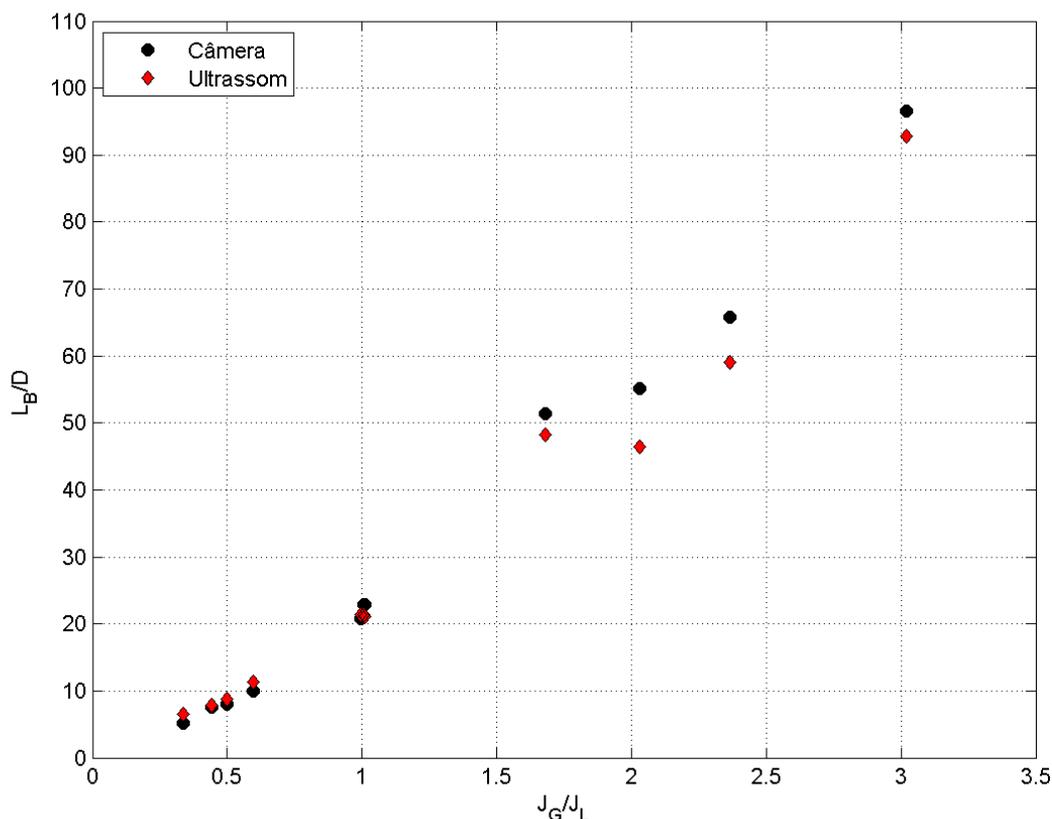


Figura 27 – Variação do comprimento da bolha com a relação J_G / J_L

Através da observação da Figura 27 é possível perceber que o comprimento da bolha não depende exclusivamente da vazão de gás, mas sim da razão gás-líquido. Pode-se observar um crescimento linear de L_B com a relação J_G / J_L , para valores menores que 1,5. Para valores de J_G / J_L maiores que 1,5 o crescimento continua linear, porém agora com uma inclinação diferente, e com um espalhamento maior nos dados experimentais.

A diferença média encontrada dos valores da câmera em relação aos do ultrassom foi de 0,7%. Os desvios padrão calculados pelos dois métodos são mostrados na Figura 28.

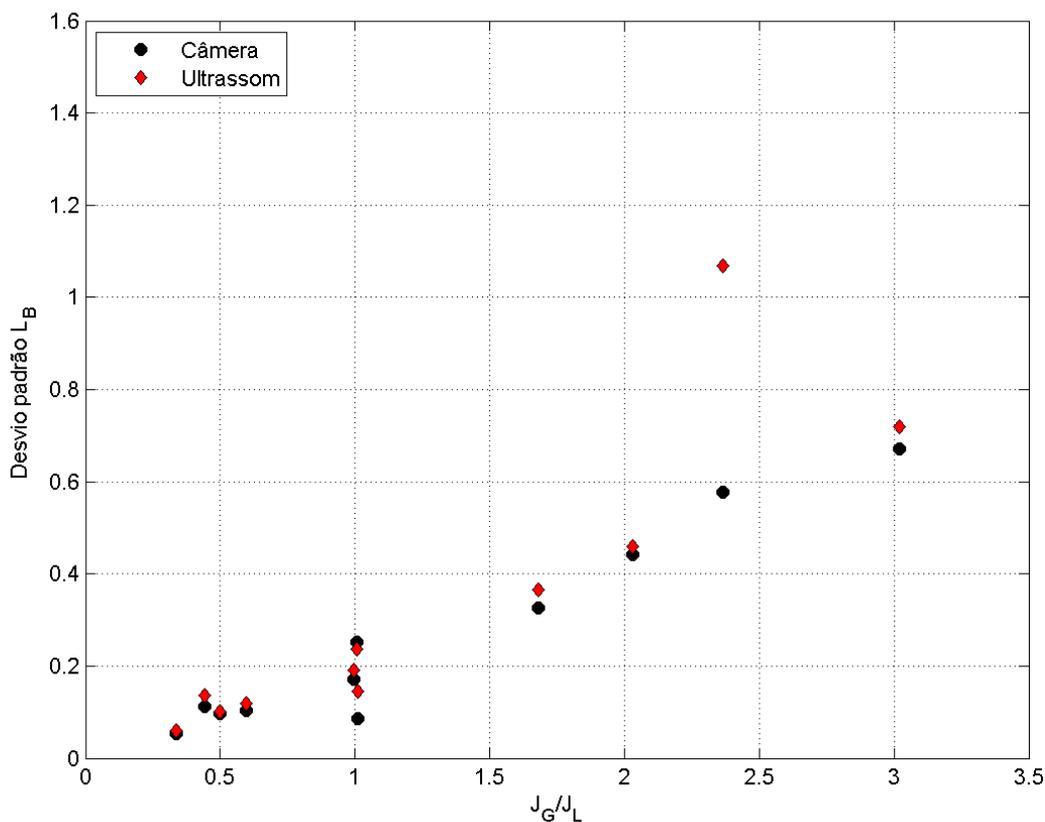


Figura 28 – Desvio padrão das medidas de comprimento da bolha

É possível observar uma tendência de aumento linear no desvio padrão com a relação J_G/J_L . Ambos os métodos apresentaram esse comportamento, com exceção de um ponto medido pelo ultrassom, que apresentou problemas no processamento.

4.3.3 Comprimento do pistão

A Figura 29 mostra a variação do comprimento médio do pistão em função da razão de velocidades J_G/J_L .

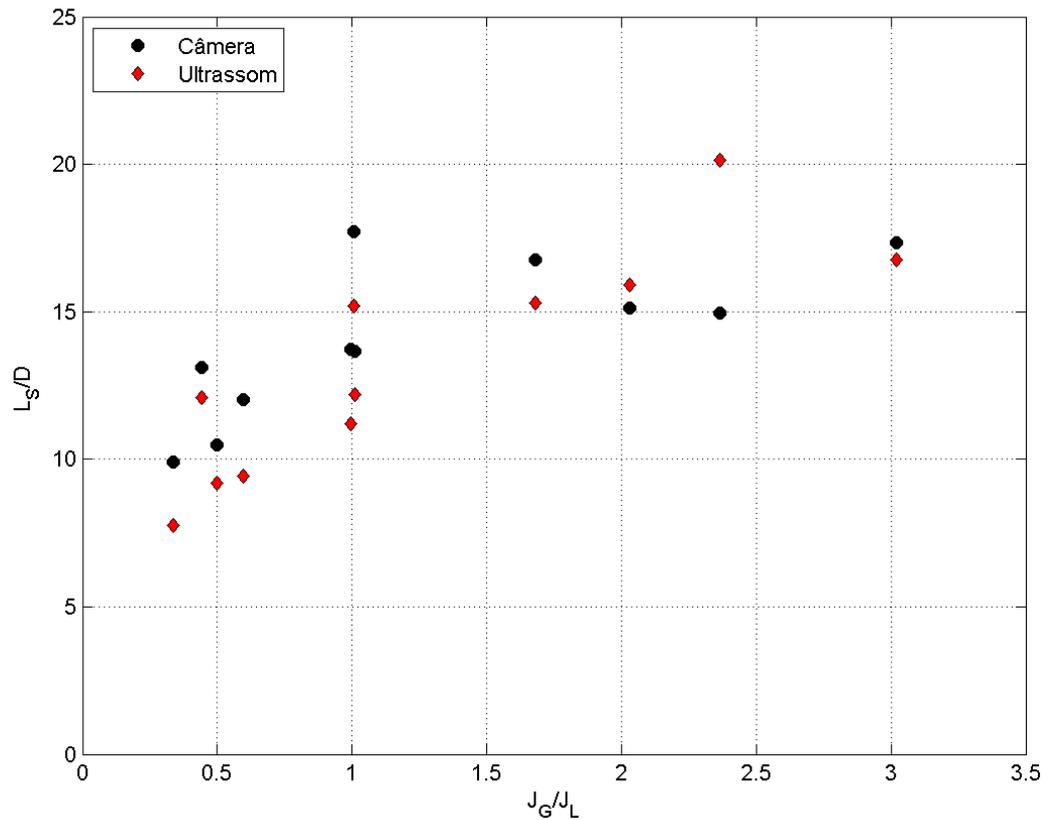


Figura 29 – Variação do comprimento do pistão com a relação J_G/J_L

O valor de L_s não apresentou uma tendência clara de variação com o aumento de J_G/J_L . Porém, os valores do comprimento do pistão e da frequência estão fortemente acoplados. Através de um balanço volumétrico numa unidade de pistão seguido de uma bolha, Bueno (2009) chegou à relação apresentada na equação (22).

$$\frac{L_s \cdot f}{J_G} \cong \left[\left(\frac{J_G}{J_L} \right) \cdot (1 - \alpha_s) \right]^{-1} \quad (22)$$

Com α_s representando a fração de vazio no pistão. Na Figura 30 são mostrados os valores de $L_s \cdot f / J_G$ pela relação J_G/J_L .

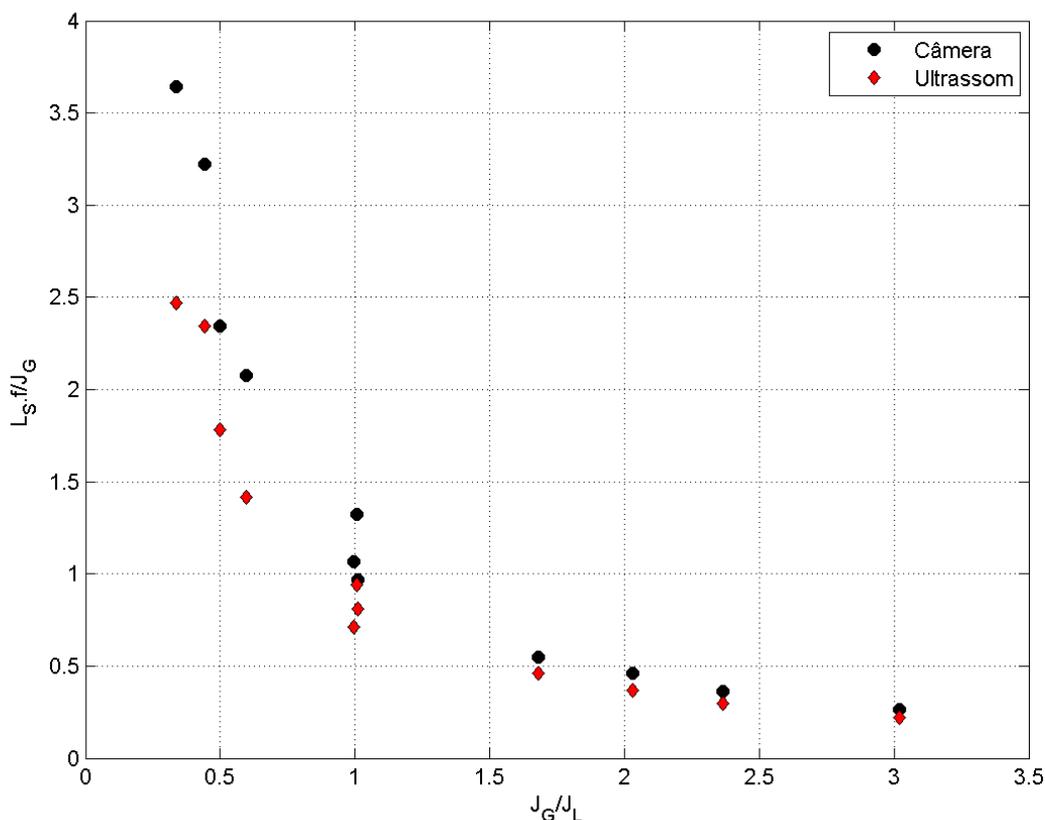


Figura 30 – Comprimento do pistão relacionado à frequência e as velocidades superficiais

Observa-se que $L_S.f / J_G$ é proporcional a uma potência negativa de J_G / J_L , na forma $L_S.f / J_G = a(J_G / J_L)^{-1}$, como previsto na equação (22). Nota-se também uma mudança na constante a para valores de J_G / J_L acima de 1,5, devido a um aumento na aeração do pistão, ou seja, um aumento no valor de α_s .

Adicionalmente, as PDF's tendem a apresentar um perfil assimétrico com obliquidade positiva (o que pode ser observado no Apêndice D), segundo Brill *et al.* (1981), para comprimentos de pistões estáveis, as curvas podem ser representadas por uma distribuição log-normal. A Figura 31 mostra a distribuição PDF de L_S para o ponto com $J_G = 0,75$ (m/s) e $J_L = 1,25$ (m/s) na pressão atmosférica, onde é possível observar a semelhança com uma distribuição log-normal.

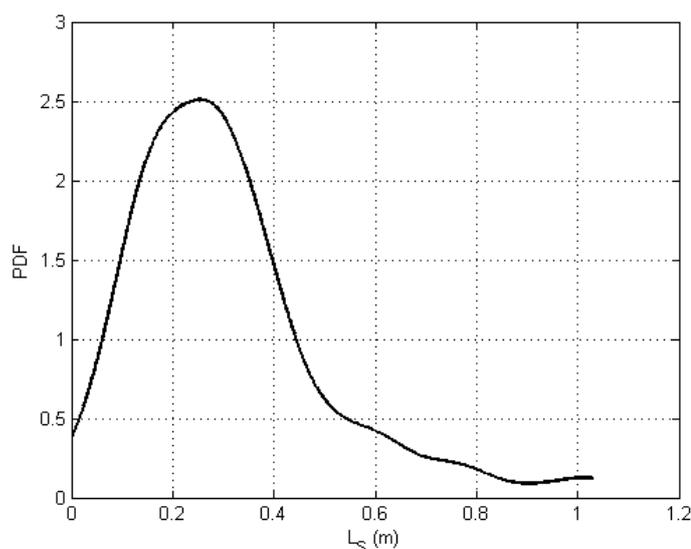


Figura 31 – PDF do comprimento do pistão para o ponto com $J_G = 0,75$ (m/s) e $J_L = 1,25$ (m/s) na pressão atmosférica

4.3.4 Frequência

Na Figura 32 é mostrada a variação da frequência adimensional fD/J_G com o valor de J_G/J_L . São plotados os dados experimentais juntamente com os modelos de Gregory e Scott (1969) e Heywood (1979) (apresentados na seção 2.3.3).

Observa-se nos dados experimentais uma tendência exponencial assim como o previsto pelos modelos analisados. O ponto com menor valor J_G/J_L apresentou um grande desvio em relação aos modelos, tanto no valor calculado pelo ultrassom, quanto no calculado pela câmera. Com exceção desse ponto, os valores medidos apresentaram erros médios de -1,7% e 10,1% em relação aos modelos de Gregory e Scott (1969) e Heywood (1979), respectivamente. Observa-se também que os valores determinados pela câmera são sempre maiores que os determinados pelo ultrassom, apresentando uma grande diferença para valores de J_G/J_L menores que 1.

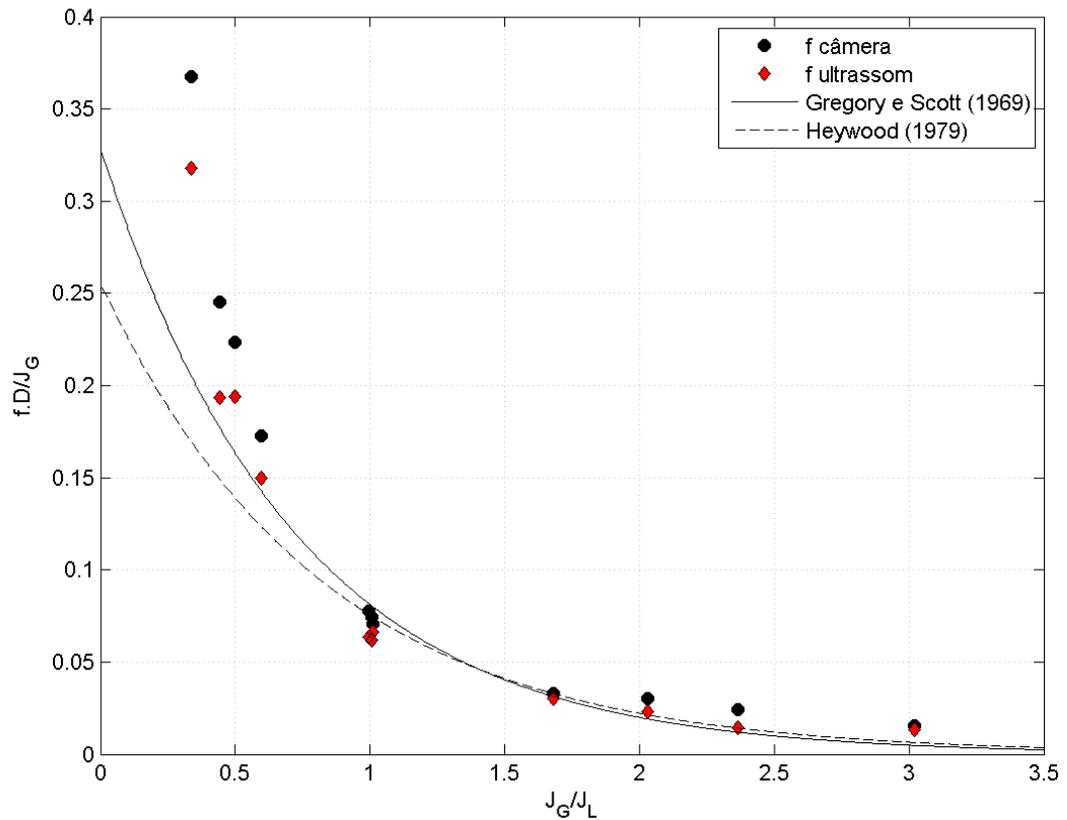


Figura 32 – Frequência adimensional obtida experimentalmente comparada com os modelos de Gregory e Scott (1969) e Heywood (1979)

4.3.5 Fator de intermitência

O fator de intermitência apresenta uma dependência com as variáveis V_B , α_S , α_B , J_G e V_{GS} da forma apresentada na equação (23).

$$J_G = V_B \left[(1 - \beta) \cdot \alpha_S + \beta \cdot \alpha_B \right] - (V_B - V_{GS}) \cdot \alpha_S \quad (23)$$

Sendo α_B a fração de vazio na bolha e V_{GS} a velocidade do gás em forma de bolhas dispersas no pistão. Considerando um pistão não aerado ($\alpha_S = 0$) chega-se a equação (24).

$$J_G = V_B \cdot \beta \cdot \alpha_B \quad (24)$$

Sabendo se que V_B é proporcional a J , como mostrado na equação (1), conclui-se que β é proporcional a relação J_G / J . Portanto, na Figura 33 é mostrada a variação do fator de intermitência com a relação J_G / J para os pontos analisados.

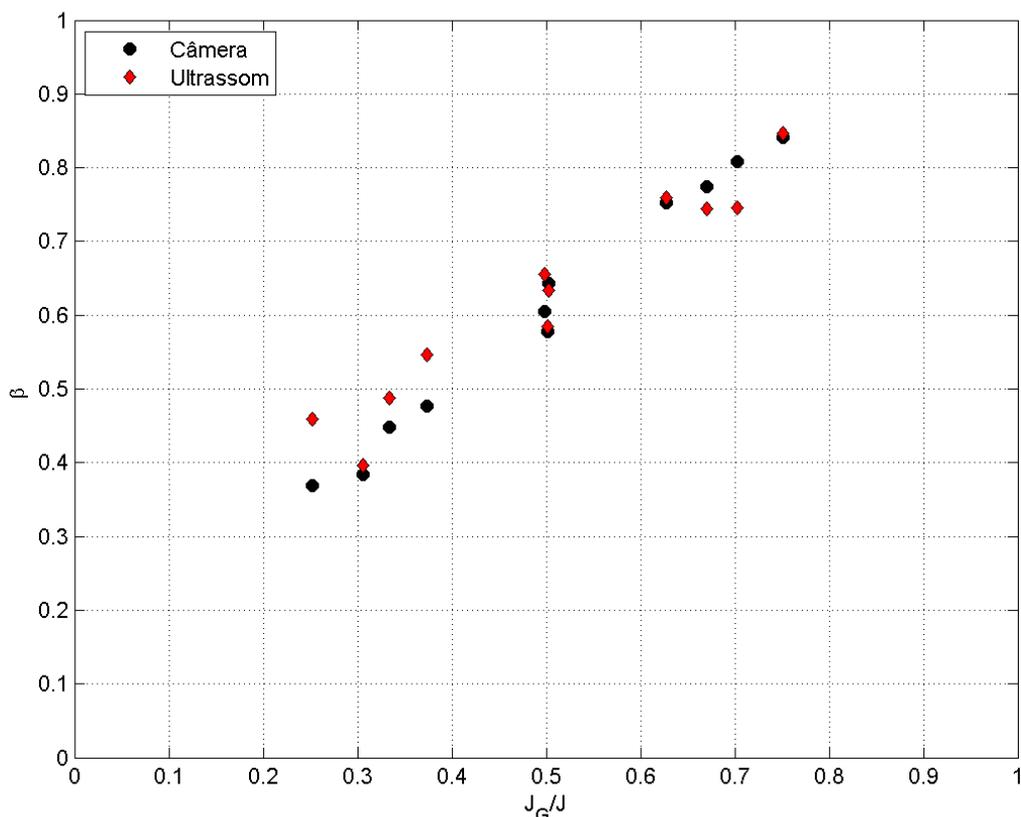


Figura 33 – Variação do fator de intermitência com a relação J_G / J

Na Figura 33 fica confirmado que β é proporcional à razão J_G / J . O erro médio dos valores encontrados pela câmera em relação ao ultrassom foi de -3,7%.

4.4 Análise da influência da pressão no escoamento com vazões mássicas constantes

Os testes experimentais foram conduzidos aumentando-se a pressão e mantendo os valores das velocidades superficiais do líquido e do gás constantes, ou seja, as vazões volumétricas das fases na seção de testes foram mantidas.

Nesta seção será desenvolvida uma análise qualitativa dos efeitos causados pelo aumento da pressão nos parâmetros de escoamento, porém agora com as vazões mássicas mantidas constantes.

Para realização desta análise, serão considerados os resultados apresentados na seção 4.2, que, em linhas gerais, mostram que os valores dos parâmetros avaliados, para uma determinada combinação de J_G e J_L , não são sensíveis ao aumento de pressão até 6 bar. Também serão consideradas as análises de como variam os parâmetros para diferentes combinações de J_G e J_L , apresentadas na seção 4.3.

Inicialmente toma-se um ponto com valores de J_G e J_L determinados na pressão atmosférica, então é aumentada a pressão, mantendo-se as vazões mássicas constantes. O valor do J_L permanecerá constante, pois a água é considerada incompressível, já o valor de J_G será alterado devido à compressibilidade do gás. A equação (25) escreve o J_G em função da vazão mássica do gás (\dot{m}_G), da sua massa específica (ρ_G) e da área da seção transversal do tubo.

$$J_G = \frac{\dot{m}_G}{\rho_G \cdot A} \quad (25)$$

Como o aumento na pressão leva a um aumento no valor de ρ_G , e os valores de \dot{m}_G e A permanecem constantes, é possível perceber que o valor de J_G diminuirá.

Então, apoiando-se nos resultados obtidos na seção 4.2, o efeito do aumento da pressão, mantendo-se as vazões mássicas constantes, pode ser resumido como uma redução no J_G com um valor de J_L constante. Portanto há uma diminuição nas razões J_G / J_L , J_G / J e na velocidade da mistura (J).

A velocidade da bolha alongada pode ser escrita como apresentado na equação (1), repetida abaixo por conveniência.

$$V_B = (C_0 J + C_\infty \sqrt{gD})(1+h) \quad (1)$$

Com a diminuição no valor de J ocorreria conseqüentemente uma diminuição na velocidade da bolha.

A redução na razão J_G / J_L levaria a uma redução no comprimento da bolha, como pode ser observado na Figura 27.

Como pode ser visto na Figura 33, a diminuição na razão J_G / J levaria a uma redução no valor do fator de intermitência.

A Figura 34 mostra o valor da frequência previsto pelos modelos de Gregory e Scott (1969) e Heywood (1979) em relação à razão J_G / J_L .

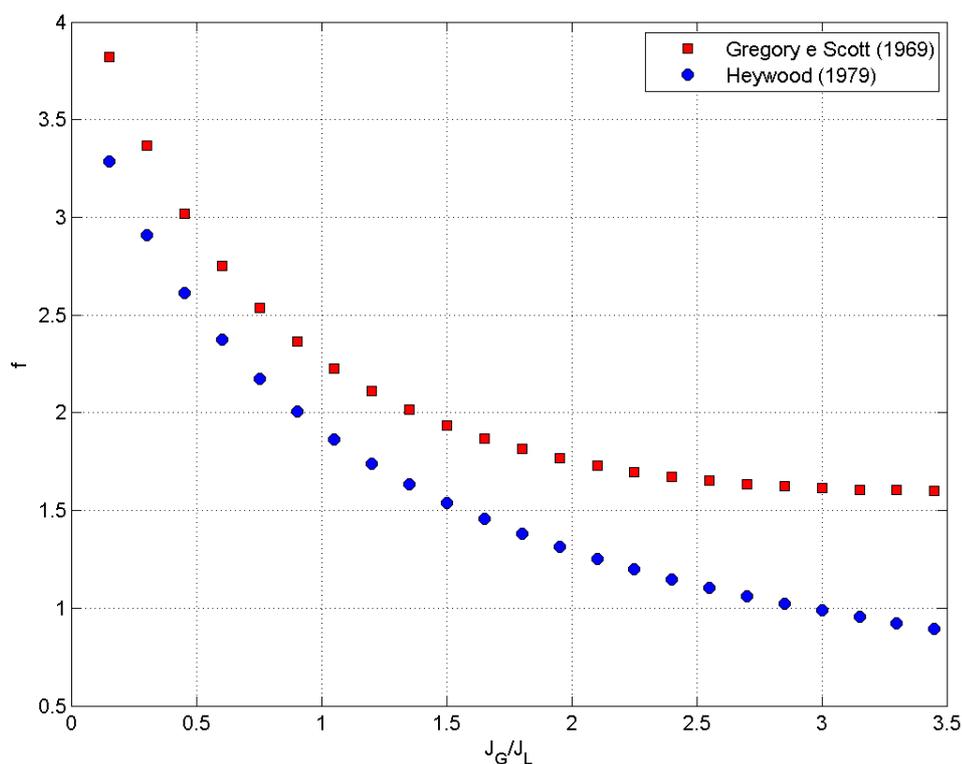


Figura 34 – Valores de frequência previstos pelos modelos de Gregory e Scott (1969) e Heywood (1979) em relação a J_G / J_L

Considerando os modelos analisados, encontra-se que a diminuição da relação J_G / J_L resultaria em um aumento da frequência, como pode ser observado na Figura 34.

Como o comprimento do pistão não apresenta uma relação direta com as velocidades superficiais, não é possível determinar qual seria sua tendência com a diminuição do J_G .

4.5 Considerações finais

Com relação à variação na solubilidade da fase gasosa para diferentes pressões, considera-se que ela não tenha causado influência nos resultados obtidos, pois o líquido percorre um circuito fechado, e permanece pressurizado o tempo todo, não havendo grandes variações de pressão entre o misturador e a seção de testes. Dessa forma, quando o escoamento é estabilizado, não ocorre considerável desprendimento ou solubilização de fase gasosa no líquido, fazendo com que a vazão de gás medida antes do misturador não se altere até chegar à seção de testes.

Caso houvesse uma grande despressurização do líquido desde a injeção de gás até a seção de testes, gás se desprenderia do líquido aumentando o valor de J_G efetivo na seção de testes, causando nos parâmetros de escoamento um efeito oposto ao descrito na seção 4.4. Caso o líquido fosse injetado a uma pressão consideravelmente menor que o gás, uma quantidade de gás se dissolveria no líquido, diminuindo o valor real de J_G na seção de testes, causando nos parâmetros de escoamento o mesmo efeito descrito na seção 4.4

Os experimentos foram conduzidos até a pressão de 6 bar. Não foi possível atingir maiores pressões, pois, nessas condições, a vazão máxima fornecida pelo compressor, somada à quantidade de gás armazenado nos vasos de pressão, não seria suficiente para alcançar altos valores de J_G e mantê-los até a estabilização do sistema.

Para permitir testes em pressões mais altas, seria necessário um maior volume para armazenamento de ar, ou um compressor capaz de fornecer uma vazão e uma pressão maior.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada uma metodologia experimental para avaliar a influência da pressão em escoamentos bifásicos no padrão golfadas em dutos horizontais. Um circuito de testes foi instrumentado de forma a coletar informações para definir os parâmetros de escoamento importantes. Dentre a instrumentação não convencional, foram utilizados transdutores de ultrassom e uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens. Além disso, foi feito um levantamento das incertezas contidas no circuito experimental.

A análise dos resultados indicou que, mantendo-se as vazões volumétricas das fases constantes, os parâmetros de escoamento não sofrem influência significativa do aumento da pressão até 6 bar.

Com a avaliação do comportamento dos parâmetros na pressão atmosférica, foi possível perceber que os resultados obtidos, por ambos os métodos, apresentaram-se condizentes com o que existe na literatura.

Baseando-se nas análises realizadas, foi previsto qual seria o comportamento dos parâmetros com o aumento da pressão, porém mantendo-se as vazões mássicas constantes. O aumento da pressão levaria a um aumento na frequência e a uma diminuição na velocidade, comprimento da bolha e fator de intermitência. O comprimento do pistão não teve uma tendência determinada.

Devido à configuração experimental, considerou-se que a mudança na solubilidade da fase gasosa em diferentes pressões não teve influência sobre os resultados obtidos.

Para a velocidade da bolha, as curvas função densidade de probabilidade obtidas pela câmera apresentaram uma menor dispersão em relação às obtidas pelo ultrassom. Para os comprimentos da bolha e do pistão, as curvas obtidas pelos dois métodos foram semelhantes, sendo que para o comprimento da bolha elas tenderam a uma distribuição normal, e para o comprimento do pistão tenderam a uma distribuição log-normal.

REFERÊNCIAS

BAKER, O. **Simultaneous Flow of oil and gas**. Oil & gas Journal, p. 185, 1954.

BENDIKSEN, Kjell H. **An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes**. Int. J. Multiphase Flow, Vol. 10, No. 4, p. 467, 1984.

BRILL, J.P., SCHMIDT, Z., COBERLY, W.A., HERRING, J.D., MOORE, D.W. **Analysis of two-phase test in large-diameter flow lines in Prudhoe Bay field**. Soc. Petr. Eng. J. 271, pp. 363-378, 1981.

BUENO, Luis G. G. **Estudo experimental de escoamentos intermitentes em tubulações inclinadas**. 2009. 171 f. Tese de mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

CHELSKI, Alisson. **Estudo experimental dos escoamentos em golfadas com mudança de direção**. 2010. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

DA SILVA, Marco. **Impedance Sensors for fast multiphase flow measurement and imaging**. 2008. 170 f. Tese de doutorado - Technische Universität Dresden, Alemanha, 2008.

DUKLER, Abraham E.; HUBBARD, Martin G. **A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes**. Ind. Eng., Fundam., Vol 14, No. 4, p.337, 1975.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., p. 504, 2001.

GREGORY, G. A.; SCOTT, D. S. **Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal concurrent gas-liquid slug flow**. AIChE Journal, No.6, p. 933, 1969.

GRENIER, P. **Evolution des longueurs de bouchons en écoulement intermittent horizontal**. 1997. 137 f. Tese de doutorado – Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 1997.

GRIFFITH, P.; WALLIS, G. B. **Two-phase slug flow**. J. Heat Transfer, p. 307, 1961.

HERVIEU E, JOUET E, DESBAT L. **Development and validation of an X-ray tomograph for two-phase flow**. Annals of the New York Academy of Sciences 972, p.87, 2002.

HEYWOOD, N. **Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: Determination of liquid holdup by γ - ray absorption**. Chemical Engineering Science, p.17, 1979.

MAGALHÃES, Guilherme R. **Estudo experimental de um escoamento bifásico horizontal considerando os efeitos da solubilidade da fase gasosa**. 2011. 114 f. Tese de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MANDHANE, J.M.; GREGORY, G. A.; AZIZ, K. **Flow-pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes**. Intl. J. Multiphase flow, p. 537, 1974.

MOISSIS, R; GRFFITH, P. **Entrance Effects in a two-phase slug flow**. Journal of Heat Transfer, p. 29, 1962.

MURAI, Yuichi; TASAKA, Yuji; NAMBU, Yuichi; TAKEDA, Yasushi; GONZALEZ, Roberto S. A. **Ultrasonic detection of moving interfaces in gas-liquid two-phase flow**. Flow Measurement and Instrumentation 21, p. 356, 2010.

NICHOLSON, K.; AZIZ, K.; GREGORY, G. A. **Intermittent two-phase flow in horizontal pipes, predictive models**. Cdn. J. Chem. Eng., p. 653, 1978.

NICKLIN, D. J.; WILKES, M. A.; DAVIDSON, J. F. **Two-phase flow in vertical tubes**. Trans. Instn Chem. Engrs, Vol. 40, p. 61, 1962.

OFUCHI, César Yutaka. **Técnicas Avançadas para Análise de Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Golfadas**. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PANDOLFO, Diego. **Estudo da influência da pressão no escoamento bifásico gás-líquido em golfadas em dutos horizontais**. 2011. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PRATIKAKIS, I.E., SAHLI, H., CORNELIS, J. **Low level image partitioning guided by the gradient watershed hierarchy.** Signal Processing, vol 75, p.173-195, 1999.

RODRIGUES, Hendy T. **Simulação numérica do escoamento bifásico gás-líquido no padrão de golfadas utilizando um modelo lagrangeano de seguimento de pistões.** 2010. 195 f. Tese de mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

SHOHAM, Ovadia. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes.** 1. ed. Texas-USA: Society of Petroleum Engineers, 2006.

SOARES, Murilo A. **Caracterização do escoamento bifásico gás-líquido utilizando o sensor de malha de eletrodos - *wire-mesh sensor*.** 2010. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SOUZA, T, CORREIA, S. **Estudo de técnicas de realce de imagens digitais e suas aplicações.** Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba, João Pessoa, 2007.

STURZA, Arthur C.; KOVALSKI, Sidney A. **Visualização do escoamento em golfadas com mudança de direção.** 2010. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso 1 (graduação) - Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TAITEL, Yehuda; BARNEA, Dvora. **Two-phase slug flow.** Advances in Heat Transfer, Harnett J. P. and Irvine Jr. T. F. ed., Vol 20, p. 83, 1990.

TAITEL, Yehuda; BARNEA, Dvora. **Slug-tracking model for hilly terrain pipelines.** SPE Journal, Vol. 5, No. 1, p. 102, 2000.

TAITEL, Yehuda; DUKLER, A. E. **A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow.** *AICHE Journal*, 1976.

THOMAS, José E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**, 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

YANG, H.; KIM, D. K.; KIM, M. H. **Void fraction measurement using impedance method.** Flow Measurements and Instrumentation, Vol. 14, 2003.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DA VAZÃO DE GÁS

Neste apêndice será descrito o processo de calibração da placa de orifício para medir a vazão de gás no circuito, e, posteriormente, o cálculo da velocidade superficial do gás e do líquido na seção de testes.

Calibração da placa de orifício

A calibração da placa de orifício foi feita utilizando dois rotômetros como padrão. Os rotômetros utilizados são da marca Rheotest Haake com os códigos 96044 e 96049, que têm suas tabelas de calibração apresentadas, respectivamente, na Tabela A1 e na Tabela A2.

Tabela A1– Tabela de calibração de rotômetro 96044

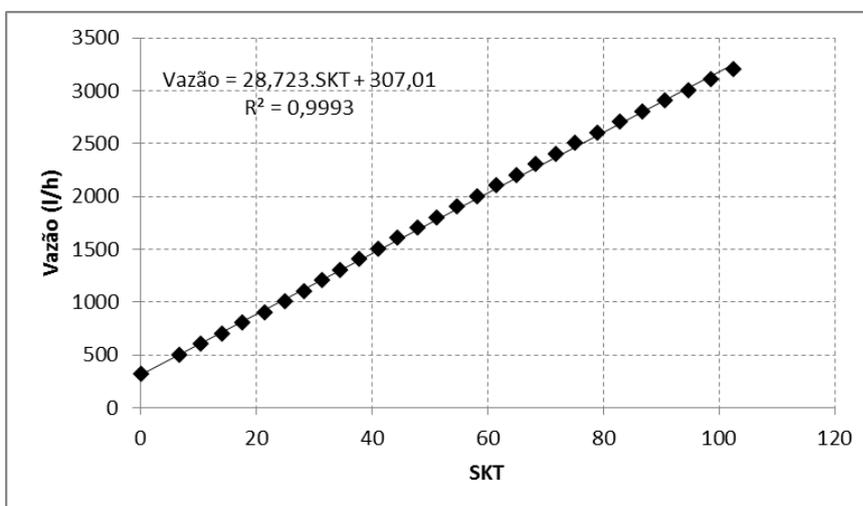
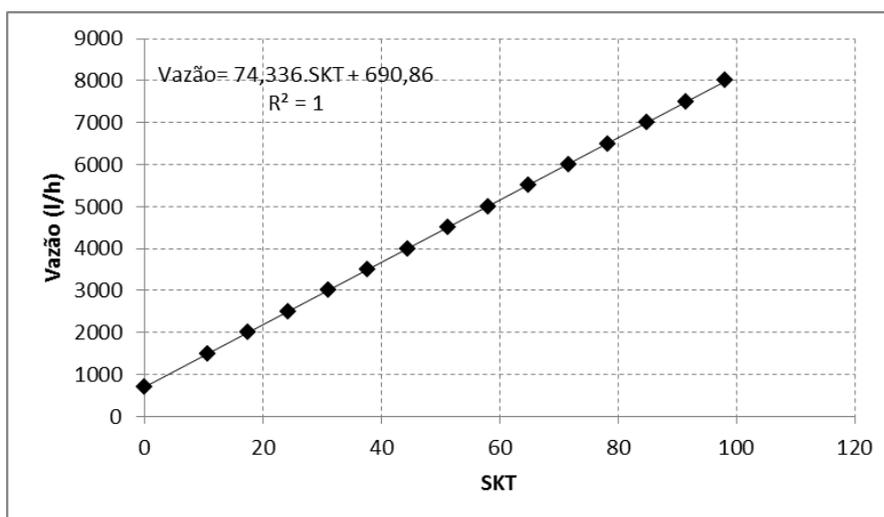
SKT	Vazão (l/h)	SKT	Vazão (l/h)
0,2	320	54,8	1900
6,8	500	58,2	2000
10,5	600	61,6	2100
14,2	700	65	2200
17,8	800	68,4	2300
21,5	900	71,8	2400
25,1	1000	75,2	2500
28,3	1100	79,1	2600
31,5	1200	83	2700
34,7	1300	86,9	2800
37,9	1400	90,8	2900
41,2	1500	94,8	3000
44,6	1600	98,7	3100
48	1700	102,6	3200
51,4	1800		

Em que *SKT* representa a escala marcada no rotômetro, o qual é relacionado com uma vazão em litros por hora. Essas tabelas são válidas para as condições de calibração dos rotômetros: temperatura de 20,0 °C e pressão de 101,325 kPa.

Observando-se que a relação entre *SKT* e vazão é linear, os dados foram colocados em um gráfico, e uma reta que os interpola foi encontrada, tendo assim uma relação entre *SKT* e vazão nas condições de calibração. Na Figura A1 e na Figura A2 são mostradas as curvas encontradas para os dois rotômetros.

Tabela A2– Tabela de calibração de rotâmetro 96049

SKT	Vazão (l/h)	SKT	Vazão (l/h)
0	700	58,1	5000
10,8	1500	64,8	5500
17,6	2000	71,6	6000
24,3	2500	78,2	6500
31,1	3000	84,8	7000
37,8	3500	91,5	7500
44,6	4000	98,1	8000
51,3	4500		

**Figura A1 – Curva de calibração do rotâmetro 96044****Figura A2 – Curva de calibração do rotâmetro 96049**

Logo, a vazão de gás nos rotômetros pode ser aproximada pela equação (A1) e equação (A2).

$$\dot{Q}_{Rot44} = 28,723.SKT + 307,01 \quad (A1)$$

$$\dot{Q}_{Rot49} = 74,336.SKT + 690,86 \quad (A2)$$

Como o gás é compressível, é necessário corrigir a vazão lida no rotômetro (\dot{Q}_{Rot}) com a pressão e a temperatura do gás para encontrar a vazão real nas condições de teste. A equação (A3) mostra a aplicação dessa correção.

$$\dot{Q}_{Real} = \dot{Q}_{Rot} \sqrt{\frac{P_{Cal}}{(P_{Rot} + P_{atm})} \cdot \frac{(T + 273,15)}{(T_{cal} + 273,15)}} \quad (A3)$$

Em que T indica a temperatura de gás, P_{atm} a pressão atmosférica, P_{Rot} a pressão no rotômetro, \dot{Q}_{Rot} a vazão calculada no rotômetro através da equação (A1) ou (A2) (dependendo de qual rotômetro está sendo usado), P_{Cal} e T_{Cal} a pressão e temperatura de calibração dos rotômetros, que são 101,325 kPa e 20,0 °C. O valor de \dot{Q}_{Real} representa a vazão volumétrica de gás, em litros por hora, que está passando no rotômetro nas condições de teste.

Na Figura A3 é mostrado um esquema de um escoamento em uma placa de orifício.

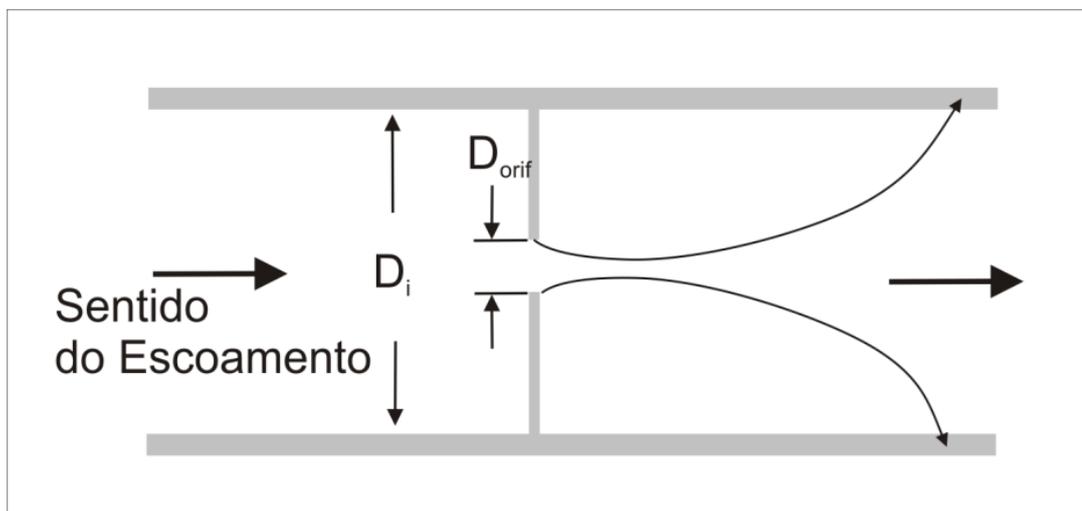


Figura A3 – Esquema de uma placa de orifício

A vazão volumétrica na placa de orifício é calculada pela equação (A4).

$$\dot{Q}_{Po} = C_d Y \frac{A_{orif}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_G}} \quad (A4)$$

Em que ΔP representa a diferença de pressão na placa de orifício, β é a razão entre o diâmetro do orifício e do diâmetro do tubo em que a placa está inserida, A_{orif} é a área do orifício. O valor de β e A_{orif} são calculados de acordo com as equações (A5) e (A6).

$$\beta = \frac{d_{orif}}{d_i} \quad (A5)$$

$$A_{orif} = \frac{\pi d_{orif}^2}{4} \quad (A6)$$

O valor de ρ_G representa a massa específica do gás na pressão de testes, que, considerando o ar como um gás ideal, pode ser calculada como mostrado na equação (A7).

$$\rho_G = \frac{28,97 \cdot (P_{Po} + P_{atm})}{8314 \cdot (T + 276,15)} \quad (A7)$$

Em que P_{Po} é a pressão à montante da placa de orifício.

O valor de Y representa o fator de expansão do ar, que pode ser representado pela equação (A8).

$$Y = 1 - \frac{(0,41 + 0,35 \cdot \beta^4)}{k} \left[1 - \frac{(P_{Po} + P_{atm} - \Delta P)}{(P_{Po} + P_{atm})} \right] \quad (A8)$$

Com k valendo 1,4 para o ar.

O valor de C_d , chamado coeficiente de descarga do medidor, é uma constante determinada experimentalmente.

O processo de calibração consiste em encontrar o valor do coeficiente de descarga para cada placa de orifício. Para isso, isola-se C_d na equação (A4), chegando-se à equação (A9).

$$C_d = \frac{\dot{Q}_{Po}}{\left(Y \frac{A_{orif}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_G}} \right)} \quad (A9)$$

Então foi montada uma bancada em que ar pressurizado passa pela placa de orifício, e posteriormente pelo rotâmetro. Como as pressões são iguais, a vazão volumétrica que passa rotâmetro é igual a que passa na placa, e o valor de \dot{Q}_{Real} , obtido na equação (A3), pode ser substituído no valor de \dot{Q}_{Po} na equação (A9), chegando-se à equação (A10)

$$C_d = \frac{\dot{Q}_{Rot} \sqrt{\frac{P_{Cal}}{(P_{Rot} + P_{atm})} \cdot \frac{(T + 273,15)}{(T_{cal} + 273,15)}}}{\left(Y \frac{A_{orif}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_G}} \right)} \quad (A10)$$

Observando-se a equação (A10) percebe-se que C_d depende da vazão no rotâmetro, da densidade do gás, das características da placa, da temperatura, da pressão e do diferencial de pressão na placa.

Foram calibradas três placas com o diâmetro do orifício iguais a 2 mm, 3 mm e 4mm. O procedimento usado na calibração foi o seguinte:

1. Seleciona-se a placa que será calibrada e o rotâmetro que apresenta escala de vazão compatível.
2. Regula-se uma pressão.
3. Regula-se uma vazão.
4. Calcula-se o valor C_d com a equação (A10).
5. Armazena-se o valor de C_d e da pressão.

6. Retorna-se ao passo 2 até que todas as combinações de pressão e vazão tenham sido realizadas.

7. Retorna-se ao passo 1 até que todas as placas tenham sido calibradas.

Ao analisar os resultados obtidos, foi possível perceber que o valor de C_d varia somente com a pressão (P_{po}). Além disso, foi possível perceber que o produto $\frac{C_d \cdot (P_{po} + P_{atm})}{P_{cal}}$ varia linearmente com o aumento da pressão, nas Figuras de (A4) a (A6) são mostrados os ajustes para as três placas utilizadas nos experimentos.

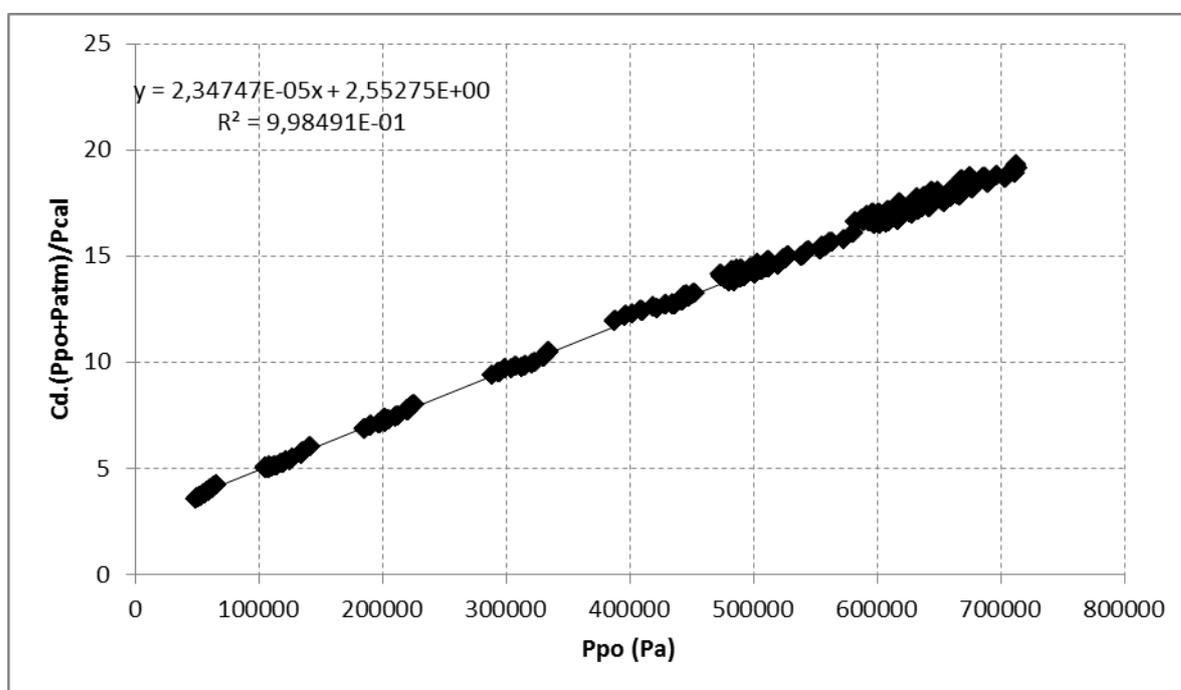


Figura A4 – Ajuste linear de C_d para a placa de 2mm

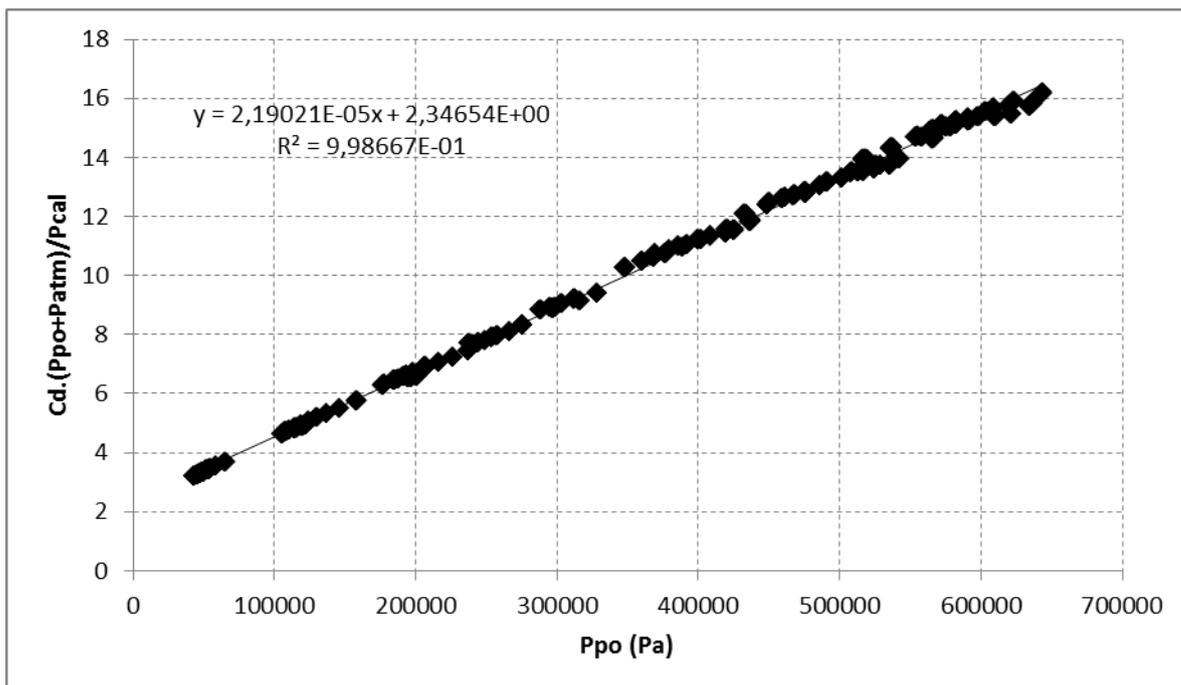


Figura A5 – Ajuste linear de C_d para a placa de 3mm

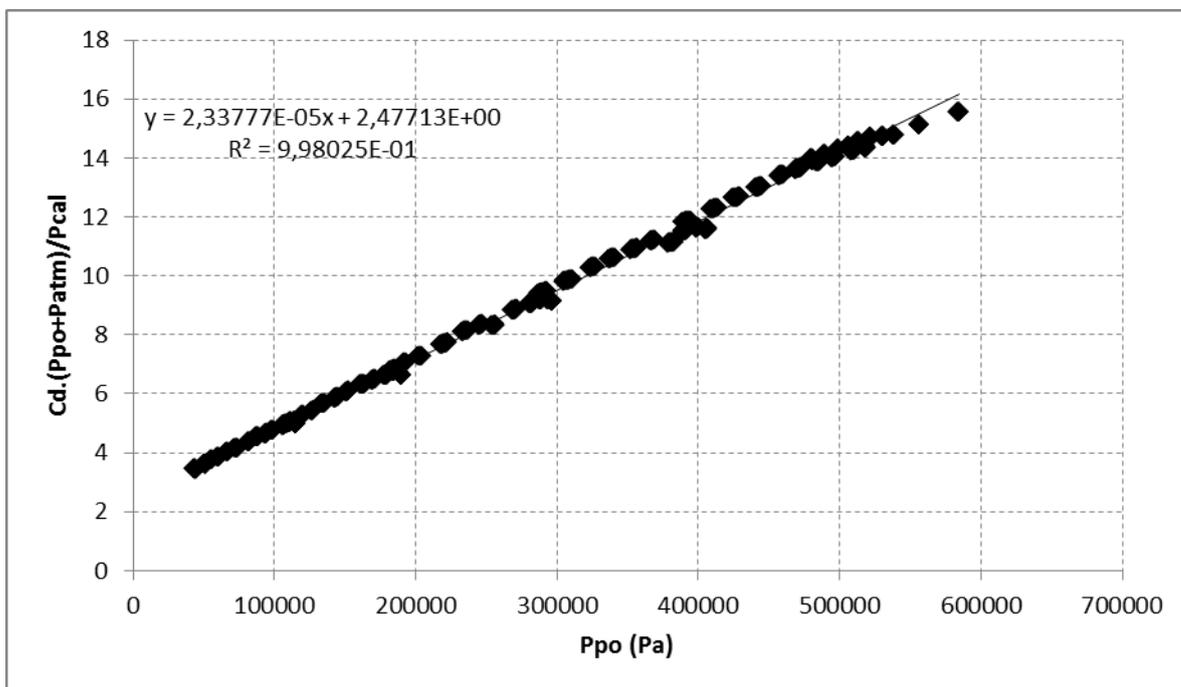


Figura A6 – Ajuste linear de C_d para a placa de 4mm

Chegando-se dessa forma aos valores de C_d para cada uma das placas de orifício. As equações (A11), (A12) e (A13) mostram, respectivamente, os valores encontrados para as placas de 2 mm, 3 mm e 4 mm.

$$C_{d2} = (2,34747 \cdot 10^{-5} \cdot P_{Po} + 2,55275) \cdot \frac{P_{cal}}{(P_{Po} + P_{atm})} \quad (A11)$$

$$C_{d3} = (2,19021 \cdot 10^{-5} \cdot P_{Po} + 2,34654) \cdot \frac{P_{cal}}{(P_{Po} + P_{atm})} \quad (A12)$$

$$C_{d4} = (2,33777 \cdot 10^{-5} \cdot P_{Po} + 2,47713) \cdot \frac{P_{cal}}{(P_{Po} + P_{atm})} \quad (A13)$$

Então, substituindo o valor do C_d na equação (A4) determina-se a vazão volumétrica na placa através das medidas de pressão, não sendo mais necessário o uso do rotâmetro.

Cálculo da velocidade superficial do gás na seção de testes

A velocidade superficial do gás na seção de testes é definida como a razão entre a vazão volumétrica de gás e a área transversal do tubo nesta seção, como mostrado na equação (A14).

$$J_G = \frac{\dot{Q}_T}{A_{Tubo}} \quad (A14)$$

Como a fase gasosa é compressível, a vazão volumétrica em duas seções do escoamento com pressões diferentes não é a mesma, porém a vazão mássica é constante. Então, definindo um volume de controle em que as superfícies estejam localizadas na saída da placa de orifício e na entrada da seção de testes, e aplicando a conservação de massa, chega-se a equação (A15).

$$\rho_{G_{Po}} \cdot \dot{Q}_{Po} = \rho_{G_T} \cdot \dot{Q}_T \quad (A15)$$

Onde $\rho_{G_{PO}}$ e ρ_{G_T} são respectivamente as massas específicas do gás na placa de orifício e na seção de teste, \dot{Q}_{PO} e \dot{Q}_T são as vazões volumétricas nas mesmas regiões. Isolando o valor de \dot{Q}_T na equação (A15) e substituindo na equação (A14) chega-se a equação (A16).

$$J_G = \frac{\rho_{G_{PO}}}{\rho_{G_T}} \cdot \frac{\dot{Q}_{PO}}{A_{Tubo}} \quad (A16)$$

Considerando que o ar se comporta como um gás ideal, as massas específicas podem ser escritas como mostrado nas equações (A17) e (A18).

$$\rho_{G_{PO}} = \frac{P_{PO}}{R.T_{PO}} \quad (A17)$$

$$\rho_{G_T} = \frac{P_T}{R.T_T} \quad (A18)$$

Como a temperatura permanece praticamente constante entre a placa de orifício e a seção de testes, a substituição das equações (A17) e (A18) na equação (A16) fornece a equação (A19), a qual é usada na medição da velocidade superficial do gás.

$$J_G = \frac{P_{PO}}{P_T} \cdot \frac{\dot{Q}_{PO}}{A_{Tubo}} \quad (A19)$$

Cálculo da velocidade superficial de líquido na seção de testes

Como o líquido é incompressível, sua vazão volumétrica em todas as seções do escoamento é constante, e sua velocidade superficial na seção de testes pode ser calculada pela razão entre a vazão volumétrica medida pelo instrumento (\dot{Q}_L) e a área da seção transversal do tubo, como mostrado na equação (A20).

$$J_L = \frac{\dot{Q}_L}{A_{Tubo}} \quad (A20)$$

APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZAS

Neste apêndice será realizada uma análise das incertezas contidas no circuito experimental, visando avaliar a incerteza das medidas obtidas para as velocidades superficiais do líquido e do gás. Essa análise será baseada no descrito por Fox e McDonnald (2001).

Em geral uma variável R pode ser expressa por $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$. O efeito sobre R de um erro em uma medição x_i pode ser estimado pela equação (B1).

$$\delta R_i = \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \quad (\text{B1})$$

A equação (B2) mostra a variação relativa em R .

$$\frac{\delta R_i}{R} = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\delta x_i}{x_i} \quad (\text{B2})$$

Através da equação (B2) é possível estimar a incerteza no resultado devido às variações em x_i . Então é definida a incerteza relativa como mostrado na equação (B3).

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} u_{x_i} \quad (\text{B2})$$

Uma maneira de estimar a incerteza relativa em R causada pelos efeitos combinados das incertezas relativas em todos os x_i é mostrada na equação (B3)

$$u_R = \pm \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B3})$$

As incertezas relativas das variáveis envolvidas na medição das velocidades superficiais do líquido e do gás serão avaliadas de acordo com a equação (B3).

Inicialmente é necessário definir quais são as incertezas relativas dos instrumentos de medição de vazão, pressão, temperatura e na medição dos diâmetros. Os valores utilizados são apresentados na Tabela B1.

Tabela B1– Incerteza relativa dos instrumentos utilizados

Variável	Incerteza Relativa
d_t	$\pm 0,10\%$
d_i	$\pm 0,20\%$
d_{orif}	$\pm 0,05\%$
P_{Po}	$\pm 0,05\%$
P_t	$\pm 0,05\%$
ΔP	$\pm 0,05\%$
T	$\pm 0,25\%$
\dot{Q}_L	$\pm 0,20\%$
\dot{Q}_{Rot}	$\pm 2,00\%$

As incertezas nos diâmetros d_t e d_i são estimadas como mais ou menos a metade da menor divisão da escala do instrumento que os mediu, no caso um paquímetro, que apresenta resolução de 0,05 mm. Para obter a incerteza relativa foi dividido esse valor pelos respectivos diâmetros.

A incerteza no valor de \dot{Q}_L é garantida por certificado do instrumento que mede a vazão de líquido.

Os medidores de pressão foram calibrados com um calibrador de pressão Fluke 718 100G, que fornece um certificado de calibração garantindo uma precisão de $\pm 0,05\%$, valor usado como incerteza relativa dos medidores de pressão.

Para a medição de temperatura foi considerado como incerteza a metade da menor divisão da escala, que é 0,1 °C. Como a temperatura mínima medida ficou em torno de 20 °C, a incerteza relativa foi calculada como $0,05 / 20 = 0,0025$, ou 0,25%.

A incerteza de d_{orif} foi estimada pela medição da broca que fez o furo, essa medição foi feita com um micrômetro, que apresenta resolução de 0,001 mm. Como

o menor valor de d_{orif} usado foi de 2 mm, então a maior incerteza relativa foi estimada como $0,001/2 = 0,0005$.

O rotâmetro teve sua incerteza estimada como a metade de sua menor divisão de escala que representa 1 SKT , como os valores de SKT usados nos experimentos foram sempre maiores que 25, a incerteza relativa máxima foi de $0,5/25 = 0,02$, ou seja, 2,00%.

Aplicando esses valores na equação (B3), para cada uma das variáveis mostradas na Tabela B2 (que são definidas em função das variáveis medidas através de equações apresentadas no Apêndice A), chega-se aos valores de suas incertezas relativas, apresentados na Tabela B2.

Tabela B2– Incerteza relativa calculada

Variável	Incerteza Relativa
ρ	$\pm 0,25\%$
A_{orif}	$\pm 0,10\%$
β	$\pm 0,20\%$
Y	$\pm 0,01\%$
C_d	$\pm 2,00\%$
\dot{Q}_{Po}	$\pm 2,01\%$

Utilizando esses valores, e com as equações (A19) e (A20) aplicadas na equação (B3), chega-se as incertezas relativas nas medidas das velocidades superficiais do líquido e do gás, apresentadas na Tabela B3.

Tabela B3– Incerteza relativa calculada

Variável	Incerteza Relativa
J_L	$\pm 0,28\%$
J_G	$\pm 8,97\%$

APÊNDICE C – RESULTADOS

Neste apêndice são apresentados os resultados completos obtidos nos experimentos. Nas tabelas (C1) a (C3) são mostrados os valores médios.

Tabela C1– Valores médios para $J = 1,0$

JG (m/s)	JL (m/s)		0 bar		1 bar		2 bar		3 bar		4 bar		5 bar		6 bar	
			Câm.	Ultras.												
0,30	0,70	VB (m/s)	1,260	1,201	1,216	1,210	1,217	1,176	1,246	1,173	1,247	1,172	1,234	1,200	1,246	1,211
		LB (m)	0,197	0,207	0,234	0,226	0,223	0,216	0,225	0,215	0,225	0,209	0,183	0,194	0,167	0,185
		LS (m)	0,341	0,315	0,407	0,432	0,348	0,384	0,317	0,302	0,317	0,306	0,303	0,298	0,289	0,252
		f (Hz)	2,919	2,300	2,195	1,800	2,284	1,933	2,501	2,267	2,598	2,300	3,088	2,367	3,039	2,667
		β	0,384	0,396	0,381	0,344	0,388	0,360	0,417	0,416	0,413	0,406	0,397	0,394	0,375	0,423
		JG Real	0,309		0,279		0,290		0,316		0,305		0,299		0,299	
		JL Real	0,700		0,700		0,700		0,700		0,700		0,700		0,700	
		P Real	0,009		1,320		2,302		2,743		4,010		5,198		5,923	
0,50	0,50	VB (m/s)	1,276	1,249	1,240	1,198	1,284	1,260	1,262	1,250	1,234	1,248	1,254	1,260	1,269	1,261
		LB (m)	0,595	0,555	0,507	0,515	0,585	0,572	0,514	0,521	0,554	0,545	0,564	0,546	0,519	0,512
		LS (m)	0,461	0,395	0,432	0,373	0,352	0,374	0,382	0,360	0,391	0,359	0,425	0,353	0,310	0,305
		f (Hz)	1,441	1,200	1,591	1,300	1,440	1,300	1,725	1,367	1,450	1,333	1,431	1,367	1,766	1,500
		β	0,578	0,584	0,573	0,580	0,595	0,605	0,583	0,591	0,596	0,603	0,595	0,608	0,622	0,627
		JG Real	0,503		0,504		0,508		0,500		0,501		0,492		0,503	
		JL Real	0,499		0,501		0,500		0,499		0,500		0,500		0,500	
		P Real	0,028		1,057		1,981		2,907		4,061		4,863		6,037	
0,70	0,30	VB (m/s)	1,300	1,054	1,183	0,903	1,295	1,083	1,209	1,195	1,269	1,167	1,292	1,217	1,294	1,271
		LB (m)	1,713	1,535	1,593	1,402	1,655	1,627	1,894	1,856	1,691	1,447	1,808	1,782	1,678	1,758
		LS (m)	0,389	0,524	0,675	0,455	0,470	0,430	0,570	0,501	0,411	0,374	0,419	0,442	0,549	0,425
		f (Hz)	0,666	0,400	0,630	0,433	0,647	0,600	0,605	0,500	0,643	0,633	0,627	0,567	0,610	0,600
		β	0,809	0,746	0,726	0,755	0,781	0,791	0,750	0,788	0,806	0,795	0,800	0,801	0,765	0,805
		JG Real	0,709		0,681		0,703		0,690		0,693		0,722		0,704	
		JL Real	0,300		0,300		0,300		0,300		0,301		0,300		0,299	
		P Real	0,052		1,024		1,704		2,754		4,187		4,773		5,558	

Tabela C2– Valores médios para $J = 1,5$

JG (m/s)	JL (m/s)		0 bar		1 bar		2 bar		3 bar		4 bar		5 bar		6 bar	
			Câm.	Ultras.												
0,50	1,00	VB (m/s)	1,826	1,792	1,821	1,750	1,832	1,808	1,837	1,831	1,840	1,804	1,835	1,723	1,830	1,789
		LB (m)	0,208	0,227	0,221	0,211	0,211	0,216	0,215	0,209	0,226	0,209	0,226	0,229	0,187	0,196
		LS (m)	0,273	0,239	0,242	0,229	0,244	0,215	0,216	0,206	0,235	0,224	0,223	0,209	0,225	0,202
		f (Hz)	4,302	3,734	4,547	4,000	4,756	4,100	4,855	4,367	4,416	3,967	4,830	3,900	5,077	4,334
		β	0,448	0,487	0,493	0,480	0,496	0,500	0,513	0,503	0,508	0,483	0,525	0,524	0,459	0,492
		JG Real	0,500		0,494		0,508		0,500		0,501		0,500		0,493	
		JL Real	1,000		1,000		1,001		1,000		1,000		1,000		1,000	
		P Real	0,045		1,028		1,939		2,877		4,016		4,945		5,469	
0,75	0,75	VB (m/s)	1,901	1,763	1,857	1,714	1,876	1,767	1,880	1,921	1,864	1,664	1,909	1,755	1,880	1,791
		LB (m)	0,596	0,549	0,497	0,487	0,516	0,508	0,464	0,512	0,498	0,500	0,573	0,545	0,530	0,515
		LS (m)	0,356	0,317	0,315	0,297	0,306	0,307	0,382	0,320	0,339	0,295	0,321	0,305	0,258	0,269
		f (Hz)	2,062	1,933	2,506	2,200	2,542	2,000	2,563	2,167	2,613	2,200	2,347	2,067	2,607	2,267
		β	0,643	0,634	0,618	0,622	0,625	0,623	0,550	0,615	0,596	0,629	0,641	0,641	0,665	0,657
		JG Real	0,758		0,759		0,753		0,763		0,743		0,771		0,751	
		JL Real	0,750		0,750		0,750		0,750		0,750		0,750		0,750	
		P Real	0,070		0,928		1,893		2,840		3,928		4,770		5,956	
1,00	0,50	VB (m/s)	2,012	1,782	1,924	1,845	1,894	1,794	1,873	1,790	1,924	1,711	1,917	1,854	1,894	1,763
		LB (m)	1,435	1,207	1,313	1,219	1,364	1,414	1,158	1,068	1,391	1,063	1,438	1,311	1,576	1,456
		LS (m)	0,393	0,414	0,470	0,404	0,361	0,429	0,373	0,398	0,368	0,457	0,409	0,432	0,497	0,500
		f (Hz)	1,191	0,900	1,208	1,067	1,303	1,000	1,760	1,033	1,139	0,667	1,161	0,967	1,070	0,800
		β	0,775	0,745	0,743	0,751	0,775	0,767	0,696	0,728	0,786	0,699	0,765	0,752	0,748	0,744
		JG Real	1,015		0,994		0,998		0,998		0,994		1,009		1,003	
		JL Real	0,500		0,500		0,500		0,500		0,500		0,500		0,500	
		P Real	0,097		0,965		2,134		2,818		3,991		4,653		5,367	

Tabela C3– Valores médios para $J = 2,0$

JG (m/s)	JL (m/s)		0 bar		1 bar		2 bar		3 bar		4 bar		5 bar		6 bar	
			Câm.	Ultras.												
0,50	1,50	VB (m/s)	2,448	2,398	2,400	2,340	2,443	2,358	2,432	2,508	2,414	2,367	2,436	1,163	2,435	2,405
		LB (m)	0,136	0,171	0,150	0,162	0,163	0,175	0,157	0,159	0,148	0,161	0,155	0,159	0,109	0,174
		LS (m)	0,258	0,202	0,224	0,206	0,237	0,204	0,212	0,193	0,231	0,191	0,225	0,098	0,274	0,197
		f (Hz)	7,169	6,200	7,210	6,467	6,703	6,167	7,367	6,767	7,195	6,600	7,168	5,367	7,277	6,534
		β	0,369	0,459	0,422	0,440	0,427	0,461	0,447	0,451	0,423	0,458	0,433	0,618	0,303	0,469
		JG Real		0,507		0,510		0,514		0,504		0,495		0,505		0,495
		JL Real		1,500		1,500		1,500		1,500		1,500		1,500		1,500
		P Real		0,082		0,955		1,879		2,823		3,925		4,708		5,983
0,75	1,25	VB (m/s)	2,471	2,503	2,422	2,412	2,441	2,407	2,457	2,614	2,444	2,432	2,485	2,419	2,474	2,448
		LB (m)	0,260	0,296	0,283	0,309	0,300	0,317	0,266	0,319	0,209	0,300	0,205	0,316	0,280	0,314
		LS (m)	0,312	0,245	0,275	0,247	0,298	0,238	0,309	0,244	0,357	0,227	0,367	0,227	0,280	0,220
		f (Hz)	4,953	4,300	4,765	4,200	4,632	4,234	4,788	4,167	4,898	4,467	4,750	4,000	5,072	4,467
		β	0,477	0,547	0,518	0,556	0,516	0,571	0,459	0,566	0,387	0,569	0,371	0,582	0,519	0,588
		JG Real		0,745		0,749		0,750		0,753		0,743		0,758		0,756
		JL Real		1,250		1,250		1,250		1,250		1,250		1,250		1,250
		P Real		0,097		1,009		1,883		2,696		3,587		5,075		5,531
1,00	1,00	VB (m/s)	2,472	2,345	2,441	2,429	2,488	2,413	2,493	2,353	2,522	1,844	2,511	2,555	2,531	2,395
		LB (m)	0,540	0,556	0,555	0,573	0,533	0,591	0,550	0,574	0,595	0,459	0,556	0,573	0,470	0,555
		LS (m)	0,357	0,292	0,343	0,286	0,394	0,287	0,336	0,286	0,332	0,266	0,344	0,269	0,377	0,247
		f (Hz)	2,973	2,433	3,077	2,600	3,077	2,600	3,243	2,400	2,947	1,533	3,026	2,667	3,313	2,567
		β	0,604	0,656	0,627	0,667	0,573	0,673	0,605	0,668	0,646	0,633	0,637	0,681	0,555	0,692
		JG Real		0,996		0,993		1,000		1,002		1,008		0,989		0,995
		JL Real		1,000		1,000		1,000		1,000		0,999		1,000		1,000
		P Real		0,123		0,949		2,012		2,868		3,630		4,845		5,446
1,25	0,75	VB (m/s)	2,721	2,685	2,561	2,512	2,556	2,559	2,601	2,523	2,662	2,282	2,594	2,351	2,527	2,436
		LB (m)	1,338	1,253	0,883	1,180	1,174	1,161	1,080	1,050	1,174	1,126	1,303	1,206	1,026	1,135
		LS (m)	0,436	0,397	0,769	0,407	0,392	0,357	0,375	0,331	0,552	0,454	0,518	0,432	0,409	0,351
		f (Hz)	1,591	1,467	1,874	1,367	1,953	1,367	2,049	1,600	1,693	1,033	1,589	1,167	2,167	1,433
		β	0,752	0,759	0,533	0,744	0,723	0,765	0,718	0,760	0,692	0,713	0,718	0,736	0,695	0,764
		JG Real		1,261		1,246		1,246		1,251		1,260		1,258		1,246
		JL Real		0,750		0,750		0,750		0,750		0,749		0,750		0,750
		P Real		0,143		1,043		1,788		2,787		3,597		4,466		5,569
1,50	0,50	VB (m/s)	2,519	2,625	2,512	2,064	2,465	2,186	2,470	2,273	2,415	2,305	2,440	2,159	2,526	2,241
		LB (m)	2,510	2,412	1,998	2,076	1,782	1,802	2,337	2,124	2,109	2,164	2,266	2,255	2,221	1,974
		LS (m)	0,451	0,436	0,679	0,508	0,496	0,456	0,511	0,488	0,685	0,503	0,650	0,586	0,468	0,564
		f (Hz)	0,890	0,767	1,115	0,700	1,339	0,767	0,895	0,800	0,958	0,633	1,011	0,500	1,090	0,567
		β	0,842	0,847	0,746	0,803	0,755	0,798	0,778	0,813	0,779	0,811	0,767	0,794	0,824	0,778
		JG Real		1,508		1,502		1,514		1,491		1,499		1,508		1,551
		JL Real		0,499		0,499		0,500		0,501		0,500		0,500		0,503
		P Real		0,183		1,060		1,886		2,502		4,026		4,616		5,337

Na Tabela (C4) são mostrados os desvios padrão para a velocidade da bolha, comprimento da bolha e comprimento do pistão para cada um dos pontos medidos. Os valores de frequência e fator de intermitência são calculados em função dos outros parâmetros, portanto os seus desvios padrão também são derivados dos demais parâmetros.

Tabela C4– Valores dos desvios padrão

JG (m/s)	JL (m/s)		0 bar		1 bar		2 bar		3 bar		4 bar		5 bar		6 bar	
			Câm.	Ultras.												
0,30	0,70	VB (m/s)	0,070	0,214	0,045	0,190	0,045	0,268	0,044	0,219	0,048	0,234	0,045	0,232	0,036	0,285
		LB (m)	0,112	0,137	0,112	0,114	0,109	0,113	0,088	0,094	0,100	0,098	0,089	0,090	0,088	0,099
		LS (m)	0,244	0,138	0,217	0,231	0,124	0,158	0,127	0,110	0,124	0,110	0,168	0,124	0,154	0,090
0,50	0,50	VB (m/s)	0,108	0,262	0,094	0,302	0,113	0,169	0,081	0,155	0,066	0,166	0,058	0,132	0,056	0,240
		LB (m)	0,251	0,237	0,204	0,240	0,248	0,259	0,235	0,219	0,208	0,246	0,176	0,208	0,213	0,223
		LS (m)	0,352	0,151	0,515	0,134	0,131	0,123	0,301	0,134	0,254	0,136	0,343	0,134	0,199	0,124
0,70	0,30	VB (m/s)	0,294	0,532	0,226	0,532	0,193	0,429	0,082	0,195	0,085	0,315	0,070	0,184	0,059	0,146
		LB (m)	0,578	1,068	0,740	0,633	0,587	0,540	0,856	0,779	0,428	0,579	0,537	0,616	0,385	0,448
		LS (m)	0,195	0,446	0,772	0,273	0,399	0,212	0,322	0,244	0,309	0,196	0,158	0,172	0,366	0,164
0,50	1,00	VB (m/s)	0,081	0,343	0,071	0,278	0,066	0,261	0,072	0,260	0,066	0,354	0,062	0,241	0,057	0,345
		LB (m)	0,097	0,101	0,087	0,096	0,074	0,091	0,083	0,092	0,076	0,092	0,083	0,093	0,100	0,099
		LS (m)	0,155	0,106	0,132	0,098	0,180	0,102	0,116	0,100	0,133	0,103	0,130	0,122	0,121	0,107
0,75	0,75	VB (m/s)	0,108	0,458	0,119	0,401	0,093	0,472	0,117	0,342	0,091	0,423	0,113	0,431	0,082	0,480
		LB (m)	0,087	0,144	0,165	0,211	0,177	0,210	0,190	0,235	0,208	0,217	0,190	0,229	0,185	0,219
		LS (m)	0,258	0,113	0,182	0,116	0,184	0,133	0,218	0,119	0,228	0,121	0,159	0,134	0,109	0,120
1,00	0,50	VB (m/s)	0,269	0,697	0,201	0,446	0,219	0,420	0,242	0,414	0,171	0,313	0,138	0,286	0,128	0,457
		LB (m)	0,442	0,459	0,467	0,486	0,505	0,632	0,619	0,609	0,377	0,401	0,474	0,541	0,528	0,638
		LS (m)	0,111	0,238	0,334	0,130	0,162	0,178	0,159	0,323	0,168	0,407	0,184	0,234	0,245	0,315
0,50	1,50	VB (m/s)	0,117	0,386	0,098	0,337	0,092	0,486	0,081	0,282	0,079	0,320	0,074	0,623	0,084	0,334
		LB (m)	0,053	0,059	0,047	0,064	0,049	0,063	0,047	0,055	0,041	0,053	0,046	0,080	0,048	0,060
		LS (m)	0,142	0,107	0,118	0,088	0,116	0,090	0,111	0,088	0,138	0,084	0,127	0,063	0,132	0,094
0,75	1,25	VB (m/s)	0,115	0,428	0,106	0,347	0,106	0,387	0,104	0,352	0,088	0,284	0,104	0,354	0,083	0,264
		LB (m)	0,104	0,120	0,106	0,123	0,110	0,127	0,120	0,117	0,088	0,122	0,093	0,114	0,101	0,118
		LS (m)	0,195	0,111	0,142	0,114	0,167	0,116	0,130	0,124	0,174	0,108	0,152	0,130	0,221	0,099
1,00	1,00	VB (m/s)	0,160	0,387	0,138	0,494	0,162	0,416	0,124	0,495	0,135	0,665	0,128	0,547	0,145	0,508
		LB (m)	0,171	0,192	0,192	0,220	0,228	0,232	0,236	0,230	0,196	0,195	0,152	0,218	0,196	0,238
		LS (m)	0,165	0,138	0,234	0,132	0,280	0,128	0,148	0,168	0,187	0,233	0,262	0,133	0,202	0,188
1,25	0,75	VB (m/s)	0,243	0,424	0,262	0,382	0,255	0,409	0,194	0,532	0,192	0,317	0,226	0,834	0,162	0,508
		LB (m)	0,326	0,366	0,450	0,567	0,494	0,505	0,450	0,515	0,383	0,452	0,435	0,599	0,446	0,464
		LS (m)	0,142	0,208	0,432	0,305	0,158	0,288	0,130	0,163	0,425	0,355	0,348	0,330	0,201	0,188
1,50	0,50	VB (m/s)	0,310	0,381	0,312	0,903	0,259	0,624	0,234	0,414	0,171	0,524	0,169	0,713	0,208	0,748
		LB (m)	0,671	0,720	0,824	0,867	0,886	1,035	0,733	0,828	0,580	0,910	1,138	1,236	0,752	0,787
		LS (m)	0,147	0,233	0,523	0,824	0,344	0,642	0,343	0,619	0,756	0,648	0,494	0,616	0,290	0,627

APÊNDICE D – FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE

Neste apêndice são apresentadas as curvas PDF que representam as distribuições da velocidade, comprimento da bolha e comprimento do pistão. As Tabelas (D1) e (D2) são da velocidade da bolha, as Tabela (D3) e (D4) do comprimento da bolha e da Tabela (D5) a (D6) do comprimento do pistão. As linhas pretas representam os resultados da câmera e as vermelhas do ultrassom.

Tabela D1– Curvas PDF para velocidade da bolha

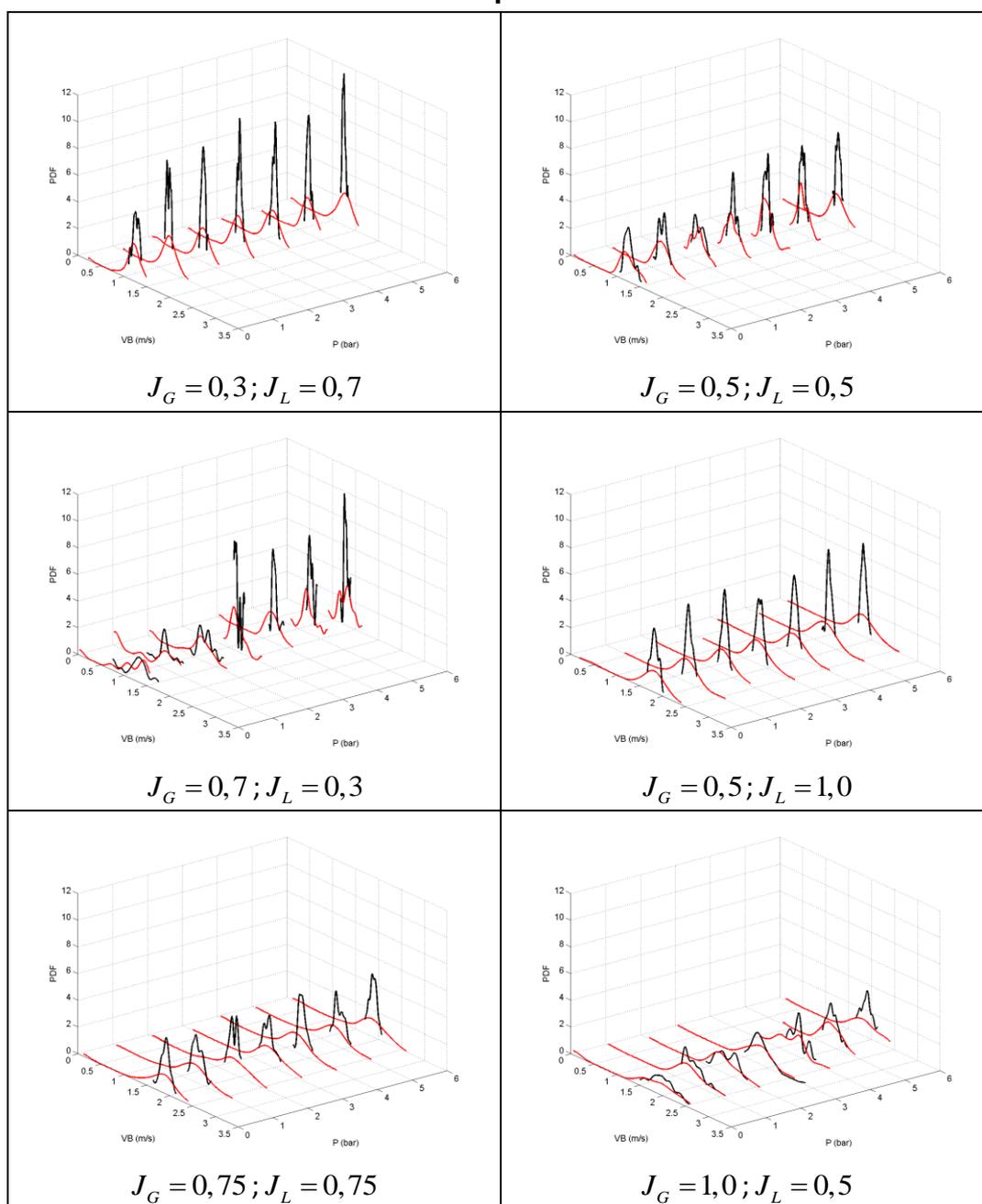


Tabela D2 – Continuação das curvas PDF para velocidade da bolha

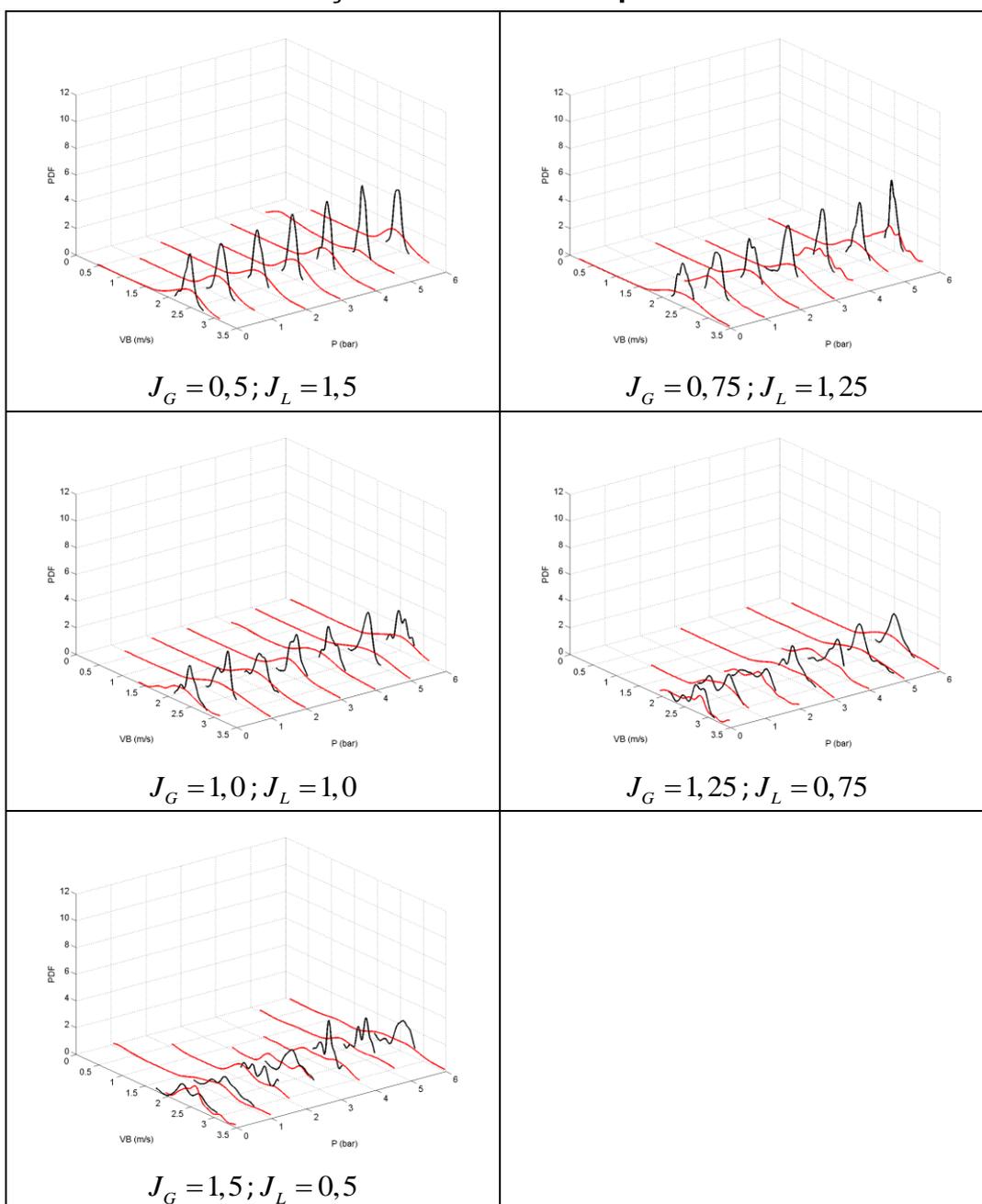


Tabela D3 - Curvas PDF para comprimento da bolha

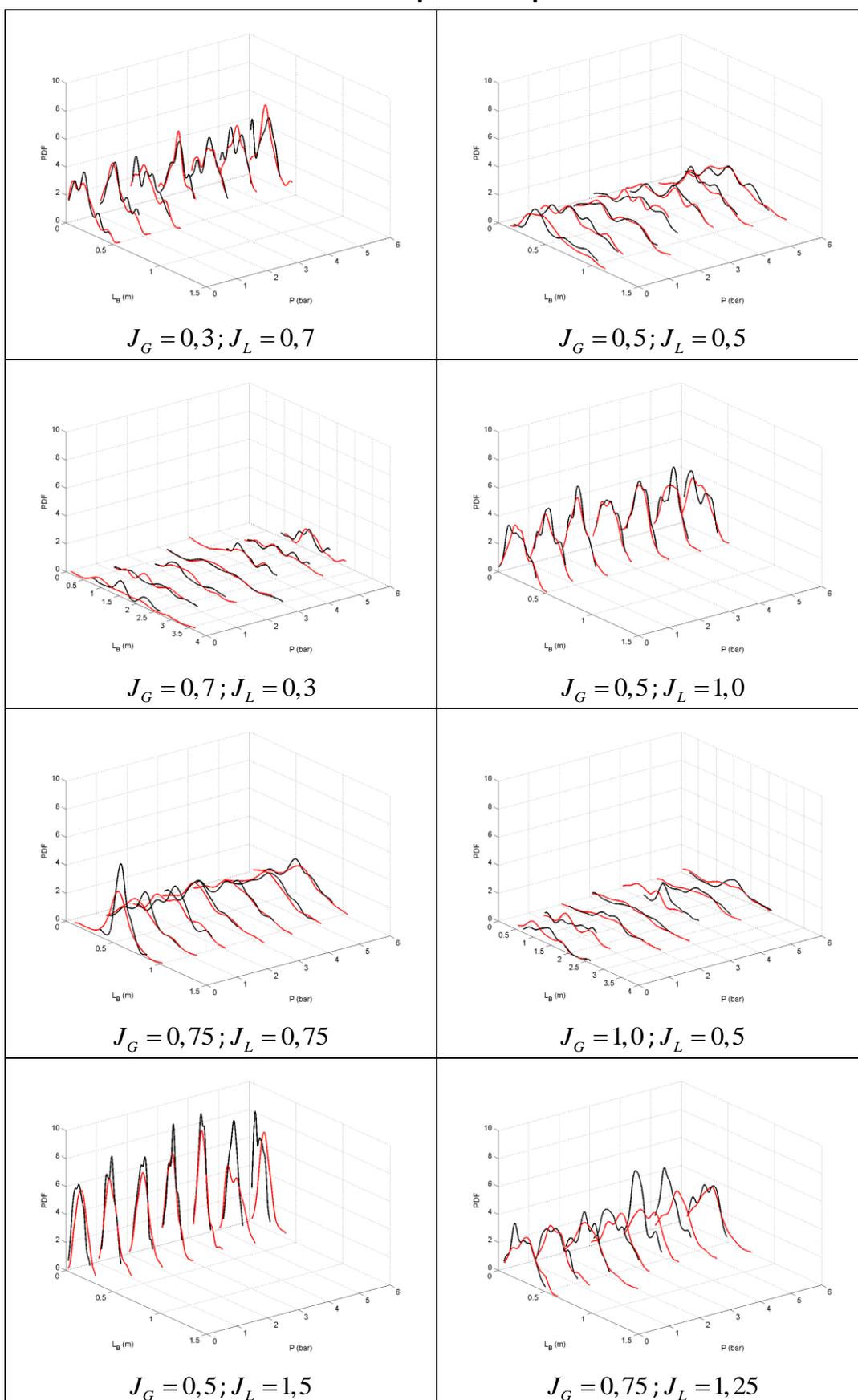


Tabela D4 – Continuação das curvas PDF para comprimento da bolha

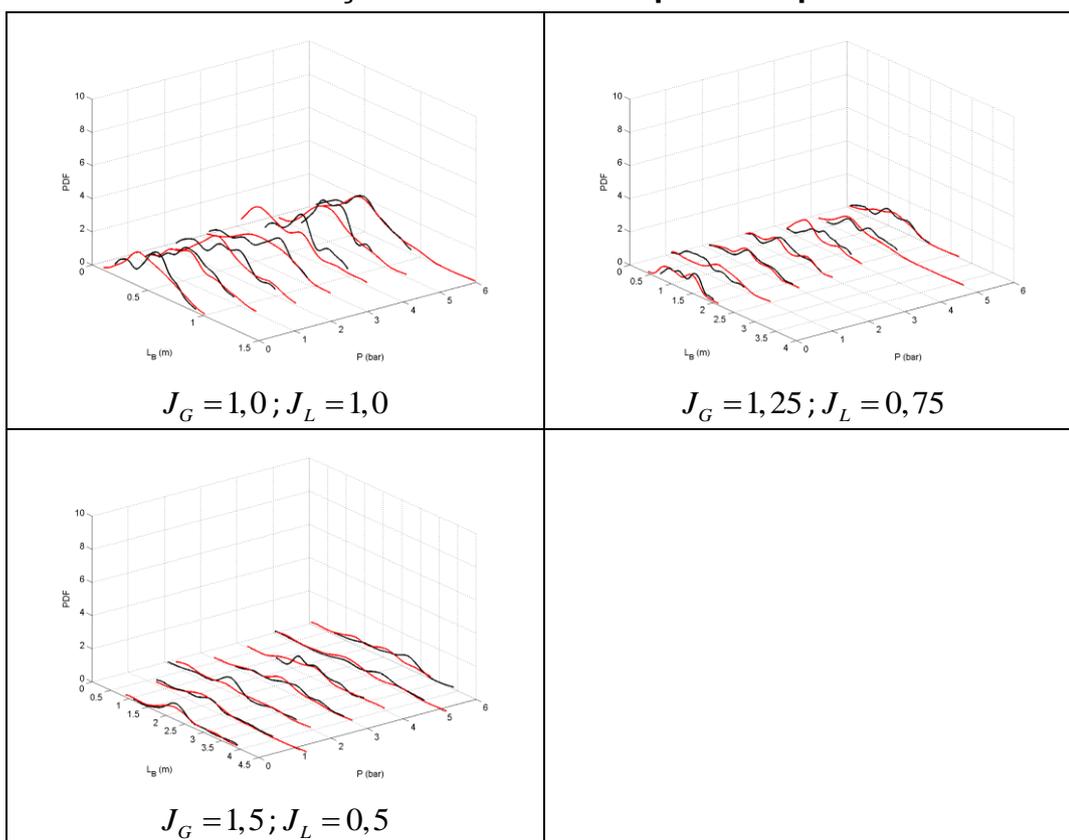


Tabela D5 – Curvas PDF para comprimento do pistão

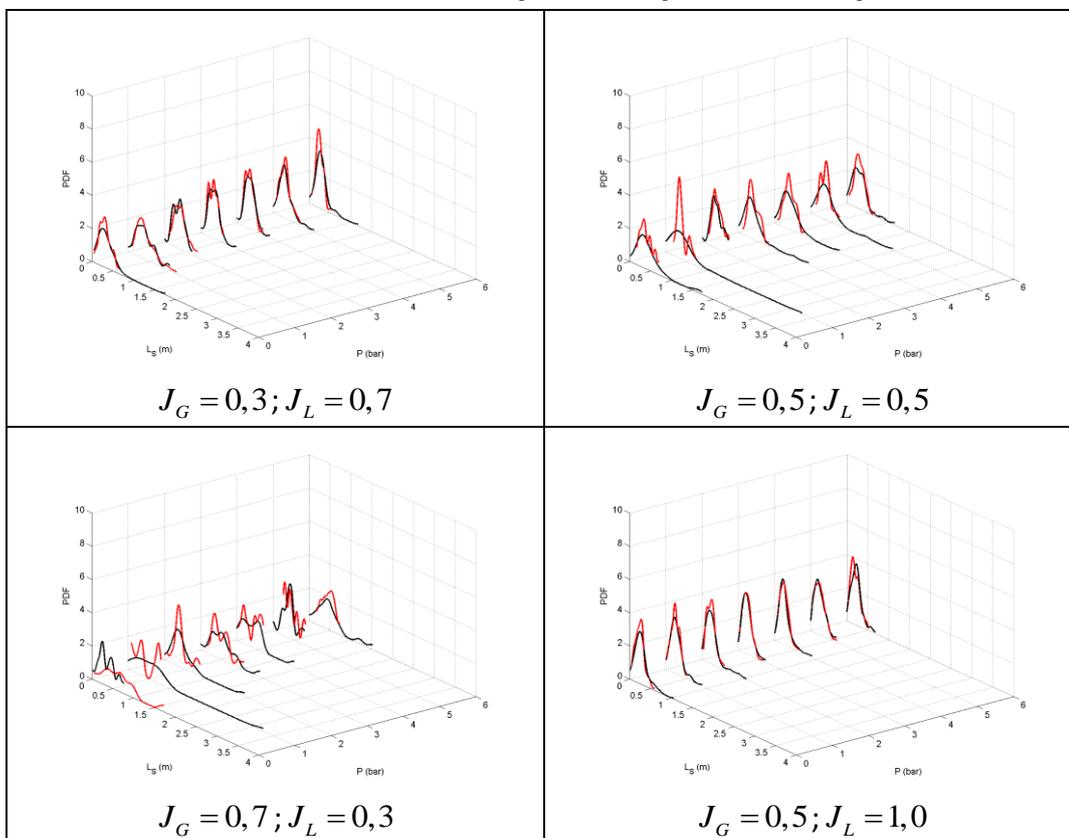


Tabela D6 – Continuação das curvas PDF para comprimento do pistão

