

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS - PPGEM

RAFAEL FABRICIO ALVES

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO
GÁS EM GOLFADAS COM LEVE MUDANÇA DE DIREÇÃO

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2015

RAFAEL FABRICIO ALVES

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO
GÁS EM GOLFADAS COM LEVE MUDANÇA DE DIREÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Engenharia Térmica.

Orientador: Prof. Dr. Rigoberto E. M. Morales

CURITIBA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

A474e Alves, Rafael Fabricio
2015 Estudo experimental do escoamento bifásico líquido gás em
golfadas com leve mudança de direção / Rafael Fabricio Alves
.-- 2015.
104 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal
do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e
de Materiais, Curitiba, 2015.
Bibliografia: f.80-83.

1. Escoamento bifásico. 2. Escoamento em golfadas. 3.
Tubulação - Dinâmica dos fluidos. 4. Modelos matemáticos. 5.
Análise numérica. 6. Processamento de sinais. 7. Processamento
de imagens. 8. Métodos de simulação. 9. Engenharia mecânica -
Dissertações. I. Melgarejo Morales, Rigoberto Eleazar, orient.
II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III.
Titulo.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

RAFAEL FABRICIO ALVES

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO GÁS EM GOLFADAS COM LEVE MUDANÇA DE DIREÇÃO

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Engenharia Térmica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Paulo César Borges, Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora

Prof. Rigoberto E. M. Morales, Dr.
UTFPR - orientador

Prof. Gherhardt Ribatski, Dr.
USP

Prof. Paulo Henrique Dias dos Santos, Dr.
UTFPR

Curitiba, 04 de Dezembro de 2015

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Rigoberto, que, além de fornecer todo o auxílio e a estrutura necessária durante a realização deste projeto, tem me apoiado desde o início da minha graduação.

A toda a equipe do NUEM que teve participação na execução deste projeto. Agradeço em especial: ao professor Fábio, que me auxiliou durante as etapas de medições, processamento, análise dos dados e redação da dissertação; ao Reinaldo, que me forneceu o apoio necessário na realização dos experimentos; ao Fernando, que me forneceu o programa e todo o suporte para o processamento dos dados do sensor resistivo, além de algumas ideias em outras etapas do projeto; ao Romulo, que me auxiliou com diversas sugestões produtivas durante a realização deste trabalho; e à Bruna, que se dispôs a me ajudar na redação desta dissertação, fornecendo várias sugestões que ajudaram a melhorar a qualidade do texto.

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

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.

RESUMO

ALVES, Rafael Fabricio. **Estudo experimental do escoamento bifásico líquido gás em golfadas com leve mudança de direção.** 2015. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Escoamentos bifásicos gás-líquido são muito comuns em aplicações industriais, especialmente nas indústrias de petróleo e gás, química e nuclear. Conforme variam as condições operacionais tais como vazões das fases, dimensão das tubulações 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, onde se alternam regiões contínuas de líquido (pistões) e regiões de preponderância gasosa (bolhas alongadas). Em operações de produção de petróleo em águas profundas é comum encontrar cenários onde a tubulação ajusta-se ao relevo do leito marinho, apresentando leves mudanças de direção. Nesse contexto, no presente trabalho é desenvolvido um estudo experimental do escoamento bifásico líquido-gás no padrão golfadas em um duto com leve mudança de direção, composto por um trecho horizontal seguido por um trecho inclinado descendente. São produzidos escoamentos em condições controladas, dos quais são extraídos alguns parâmetros característicos. Os fluidos usados são água e ar e os experimentos são realizados no circuito de testes presente no NUEM (Núcleo de Escoamentos Multifásicos da UTFPR). A extração dos parâmetros é feita através de sensores resistivos, instalados em quatro seções da tubulação. Adicionalmente, duas câmeras de alta taxa de aquisição de imagens são utilizadas. Com os resultados obtidos, avalia-se a influência de uma leve mudança de direção nos parâmetros característicos e na transição do escoamento em golfadas para estratificado na região descendente.

Palavras-chave: Escoamento bifásico. Escoamento em golfadas. Escoamento com mudança de direção.

ABSTRACT

ALVES, Rafael Fabricio. **Experimental study of two-phase gas-liquid slug flow with a slight direction change**. 2015. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Gas-liquid two-phase flow is very common in industrial applications, especially in the oil and gas, chemical, and nuclear industries. As operating conditions change such as the flow rates of the phases, the pipe diameter and physical properties of the fluids, different configurations called flow patterns take place. In the case of oil production, the most frequent pattern found is slug flow, in which continuous liquid plugs (liquid slugs) and gas-dominated regions (elongated bubbles) alternate. Offshore scenarios where the pipe lies onto the seabed with slight changes of direction are extremely common. With those scenarios and issues in mind, this work presents an experimental study of two-phase gas-liquid slug flows in a duct with a slight change of direction, represented by a horizontal section followed by a downward sloping pipe stretch. The experiments were carried out at NUEM (Núcleo de Escoamentos Multifásicos UTFPR). The flow initiated and developed under controlled conditions and their characteristic parameters were measured with resistive sensors installed at four pipe sections. Two high-speed cameras were also used. With the measured results, it was evaluated the influence of a slight direction change on the slug flow structures and on the transition between slug flow and stratified flow in the downward section.

Keywords: Two-phase flow. Slug flow. Flow with change of direction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Padrões de escoamento em dutos verticais	15
Figura 2 - Padrões de escoamento em dutos horizontais	16
Figura 3 - Escoamento em golfadas.....	17
Figura 4 - Representação esquemática do escoamento em golfadas com pistão aerado	22
Figura 5 - Comprimentos da bolha alongada, pistão e célula unitária.....	24
Figura 6 - (a) Cotovelo inferior (b) Cotovelo superior	29
Figura 7 - Dinâmica do escoamento em golfadas em um cotovelo inferior	30
Figura 8 - Dinâmica do escoamento em golfadas em um cotovelo superior	31
Figura 9 - Representação esquemática da bancada experimental	37
Figura 10 - Sensor resistivo.....	39
Figura 11 - Arranjo de um par de sensores resistivos	40
Figura 12 - Representação esquemática do sistema do sensor resistivo	40
Figura 13 - Câmeras de alta taxa de aquisição de imagens.....	41
Figura 14 - Esquema da distribuição das estações de medição	42
Figura 15 - Esquema da região filmada	43
Figura 16 - Sinal de R_G	46
Figura 17 - Série temporal binarizada	47
Figura 18 - Processamento de imagem	50
Figura 19 - Detecção da frente da bolha	50
Figura 20 - Exemplo de um diagrama de caixa	52
Figura 21 - Grade de testes representada no mapa de fluxo proposto por Taitel e Dukler (1976).....	54
Figura 22 - PDFs dos valores de R_G do ponto P24 na estação 4 para as três baterias em cada inclinação.....	56
Figura 23 - Diagramas de caixa para V_B medido no ponto P24 na estação 4 para as três baterias em cada inclinação	57
Figura 24 - Comparação dos resultados de V_B obtidos pela câmera com os obtidos pelo sensor resistivo posicionado na estação 4	58
Figura 25 - Exemplo de imagens em que o processamento não funciona corretamente	59
Figura 26 - Sinais de R_G obtidos no ponto P05 para -5°	61
Figura 27 - Imagens com a traseira da bolha na região de mudança de direção.....	62
Figura 28 - Transições de golfadas para estratificado previstas pelo modelo apresentado em Taitel <i>et al.</i> (2000).....	65
Figura 29 - PDFs dos parâmetros de escoamento medidos no ponto P13 para a inclinação -7°	67
Figura 30 - PDFs dos parâmetros de escoamento medidos no ponto P02 para a inclinação -5°	69

Figura 31 - PDFs dos comprimentos das bolhas nos pontos que tendem a estratificar	71
Figura 32 - PDFs dos parâmetros de escoamento medidos no ponto P04 para a inclinação -7°	73
Figura 33 - PDFs dos parâmetros de escoamento medidos no ponto P04 na estação 4	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grade de testes.....	54
Tabela 2 - Pontos em que o escoamento estratifica na região descendente	60

LISTA DE SÍMBOLOS

	Descrição	Unidade
A	Área da seção transversal do tubo	$[m^2]$
C_d	Coefficiente de descarga	$[-]$
C_0	Parâmetro de distribuição	$[-]$
C_∞	Parâmetro de deslizamento	$[-]$
D	Diâmetro do tubo	$[m]$
d_s	Distância entre sensores resistivos	$[m]$
EO	Número de Eötvös	$[-]$
f	Frequência da célula unitária	$[Hz]$
Fr	Número de Froude	$[-]$
g	Aceleração da gravidade	$[m.s^{-2}]$
h	Constante de esteira	$[-]$
h_L	Altura de líquido	$[m]$
H_L	Fração de líquido	$[-]$
J	Velocidade da mistura	$[m.s^{-1}]$
J_G	Velocidade superficial de gás	$[m.s^{-1}]$
J_L	Velocidade superficial de líquido	$[m.s^{-1}]$
L	Comprimento	$[m]$
N_B	Número de bolhas	$[-]$
P	Pressão	$[Pa]$
\dot{Q}	Vazão volumétrica	$[m^3.s^{-1}]$
R	Constante do gás	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
R_G	Fração de gás	$[-]$
Re	Número de Reynolds	$[-]$
T	Tempo	$[s]$
V	Velocidade	$[m.s^{-1}]$
ε	Fator de expansão do gás	$[-]$

ρ	Massa específica	$[kg.m^{-3}]$
θ	Inclinação	$[rad]$
σ	Tensão superficial	$[Pa]$

Subscritos

B	Bolha
G	Gás
J	Mistura
L	Líquido
P	Pixel
S	Pistão
U	Célula unitária

Siglas

NUEM	Núcleo de Escoamentos Multifásicos
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 ESCOAMENTO EM GOLFADAS.....	21
2.2 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO EM GOLFADAS ..23	
2.2.1 Velocidades Superficiais de Líquido e Gás.....	23
2.2.2 Comprimento da Bolha Alongada e do Pistão de Líquido.....	23
2.2.3 Velocidade da Bolha Alongada	24
2.2.4 Frequência	26
2.2.5 Frações de Gás na Bolha e no Pistão	28
2.3 MUDANÇA DE DIREÇÃO.....	28
2.3.1 Cotovelos Inferiores	29
2.3.2 Cotovelos Superiores.....	30
2.3.3 Revisão de Trabalhos Sobre escoamento Bifásico com Mudança de Direção 32	
2.4 COMENTÁRIOS FINAIS.....	35
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	36
3.1 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO EXPERIMENTAL	36
3.1.1 Circuito de Líquido	36
3.1.2 Circuito de Gás	37
3.1.3 Circuito Bifásico	38
3.1.4 Sensores Resistivos	38
3.1.5 Câmeras de Alta Taxa de Aquisição de Imagens	41
3.1.6 Estações de Medição.....	42
3.2 SISTEMA SUPERVISÓRIO.....	43
3.3 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO.....	44
3.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	45
3.4.1 Processamento dos Sinais Obtidos pelos Sensores Resistivos	45
3.4.2 Processamento das Imagens Obtidas Pela Câmera de Alta Velocidade.....	49
3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	51
4 RESULTADOS	53
4.1 GRADE DE TESTES	53
4.2 REPETITIVIDADE DAS MEDIÇÕES	55
4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO RESISTIVO COM A CÂMERA.....	58
4.4 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES EM QUE O ESCOAMENTO ESTRATIFICA .60	
4.4.1 Mecanismo de Estratificação	60

4.4.2 Método para Previsão das Condições em que o Escoamento Estratifica.....	63
4.5 ANÁLISE DOS PONTOS QUE NÃO ESTRATIFICAM	72
5 CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS.....	80
APÊNDICE A – MEDIÇÃO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS	84
APÊNDICE B – ANÁLISES DE INCERTEZAS	88
APÊNDICE C – RESULTADOS MÉDIOS.....	92

1 INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos são caracterizados pelo escoamento simultâneo de mais de uma fase, podendo ser compostos por 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 aplicações industriais, podem ser encontrados em motores de combustão interna, geradores de vapor, refrigeradores e diversos outros equipamentos presentes nas indústrias químicas, nucleares e especialmente petrolíferas.

No caso específico da produção de petróleo em águas profundas é comum a presença de escoamentos multifásicos envolvendo óleo, água, gás e até mesmo partículas sólidas, como areia. Porém, devido à complexidade na modelagem, normalmente essa situação é simplificada como um escoamento bifásico de líquido e gás. A fase de líquido é formada por óleo 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 coluna de produção. Essa injeção de gás, feita à alta pressão, conhecida como técnica de elevação artificial por injeção de gás (*gas-lift*) (THOMAS, 2001), tem como objetivo reduzir o peso da coluna de óleo dentro das colunas de produção para facilitar a elevação do petróleo até a plataforma. É uma técnica bastante utilizada, principalmente em poços abaixo do leito marítimo (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 relacionadas com as vazões das fases do escoamento, as propriedades físicas dos fluidos e a geometria do duto. Essas distribuições geométricas das fases são chamadas de padrões de escoamento ou regimes de escoamento (SHOHAM, 2006). Nas Figuras 1 e 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 bifásicos de líquido-gás em dutos 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 em golfadas e agitado a vazão de líquido é moderada, enquanto a vazão da fase gasosa é moderada para golfadas e alta para o agitado (SHOHAM, 2006).

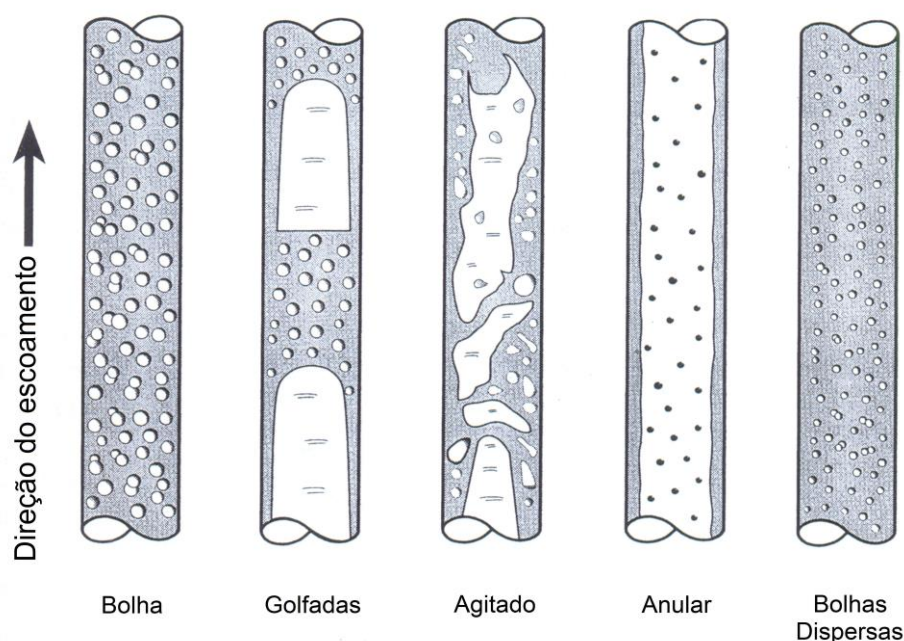


Figura 1 - Padrões de escoamento em dutos verticais
Fonte: adaptado de Shoham, 2006.

O escoamento bifásico de líquido-gás 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, tende a ficar na parte superior do tubo. O mesmo ocorre quando o escoamento apresenta leves inclinações em relação à direção horizontal.

Os principais padrões do escoamento bifásico líquido-gás em dutos horizontais, mostrados na Figura 2, são classificados por Shoham (2006) em quatro configurações, sendo elas: estratificado, intermitente, anular e bolhas dispersas. Dentro dessa classificação, o padrão estratificado é dividido em liso e ondulado, o padrão intermitente em bolhas alongadas e golfadas, e o padrão 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 análogas ao caso vertical. Escoamentos estratificado liso e ondulado acontecem para baixas vazões de líquido

e de gás, enquanto escoamento de bolhas alongadas é observado com vazão da fase líquida moderada e baixa vazão da fase gasosa (SHOHAM, 2006).

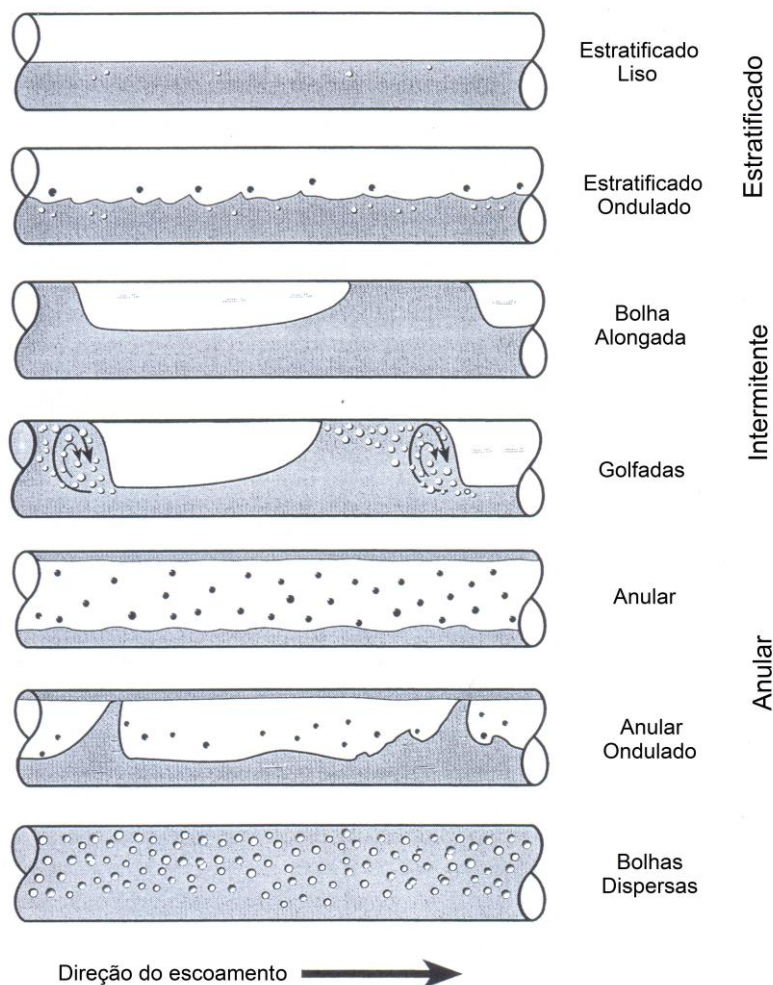


Figura 2 - Padrões de escoamento em dutos horizontais
Fonte: adaptado de Shoham, 2006.

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

Observou-se que o padrão de escoamento bifásico de líquido-gás em golfadas é frequente em grande parte das linhas de produção de petróleo e gás em águas profundas. O escoamento em golfadas, esquematizado na Figura 3, 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 bolhas dispersas; a outra é formada por um bolsão de gás, conhecido

como bolha alongada, que ocupa grande parte da seção transversal do duto, adjacente a um filme de líquido.

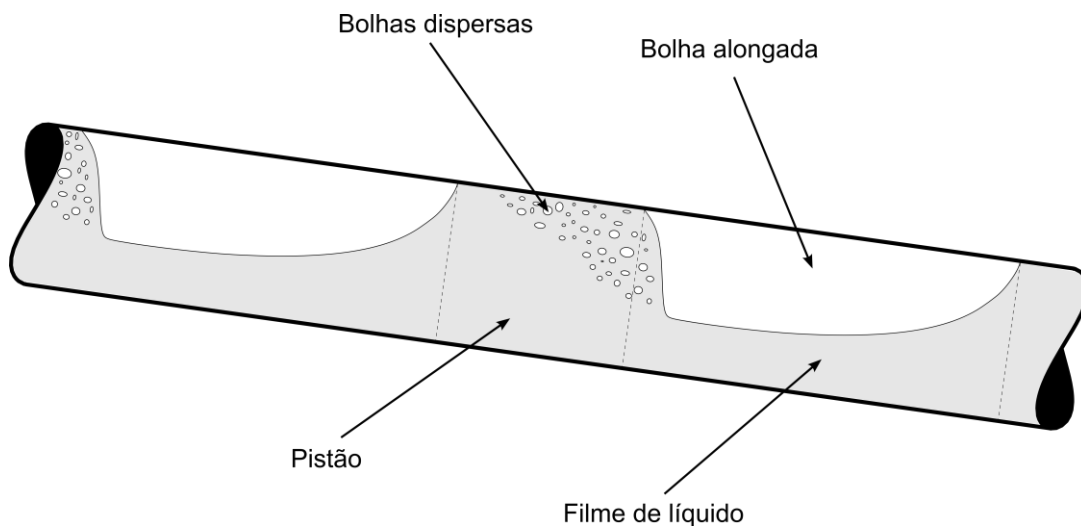


Figura 3 - Escoamento em golfadas

Na produção de petróleo é comum que os fluidos sejam transportados por longas distâncias, passando por tubulações que apresentam mudanças na inclinação para ajustar-se ao relevo da região.

Nesse cenário, estudos sobre escoamento bifásico líquido-gás no padrão golfadas em tubulações com leves mudanças de direção (conhecidas também como *hilly terrain*) tornam-se importantes, podendo, por exemplo, auxiliar no dimensionamento de equipamentos presentes nas linhas de produção de petróleo.

1.1 OBJETIVOS

Neste trabalho é realizado um estudo experimental do escoamento bifásico de líquido e gás no padrão golfadas em um duto com leve mudança de direção, composto por um trecho de tubulação horizontal seguido por um trecho inclinado descendente.

As medições são conduzidas no circuito experimental do Núcleo de Escoamentos Multifásicos (NUEM) da UTFPR, em uma tubulação de acrílico transparente com diâmetro interno de 26 mm, utilizando-se três inclinações distintas na região descendente: -3° , -5° e -7° em relação à horizontal. A saída do

escoamento é aberta para a atmosfera, e os fluidos testados são água e ar à temperatura ambiente.

As combinações das vazões de ar e água testadas experimentalmente são definidas de forma que é encontrado no trecho horizontal escoamento em golfadas para todas as condições, enquanto no trecho descendente, em algumas combinações é encontrado escoamento estratificado e em outras escoamento em golfadas.

Sensores resistivos são instalados em quatro seções da tubulação para extrair os parâmetros característicos do escoamento. Além disso, são utilizadas duas câmeras de alta taxa de aquisição de imagens: uma posicionada na região de mudança de direção, buscando possibilitar a visualização dos fenômenos que ocorrem nessa faixa de escoamento; a outra posicionada logo após a última seção de testes, buscando imagens que, após a aplicação de uma técnica de processamento, fornecem valores de um parâmetro do escoamento usado na validação das medições dos sensores resistivos.

A partir dos dados experimentais adquiridos, é avaliada a influência de uma leve mudança de direção nas estruturas características do escoamento em golfadas e na estratificação do escoamento no trecho descendente.

1.2 JUSTIFICATIVA

Escoamentos no padrão de golfadas são comuns em diversas aplicações industriais, com destaque especial para a indústria petrolífera, onde esse padrão é encontrado frequentemente nas linhas de produção. Essas linhas normalmente apresentam mudanças de inclinação para ajustar-se ao relevo da região em que estão inseridas. Dessa forma, o entendimento da dinâmica do escoamento em golfadas com mudança de direção torna-se importante.

O estudo experimental desenvolvido neste trabalho avalia um escoamento no padrão de golfadas com leve mudança de direção, passando de um trecho horizontal para um inclinado descendente, levando a uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos nessa situação. Dessa forma, pode contribuir na otimização de projetos ou na seleção de equipamentos usados na produção petrolífera, além de

fornecer informações necessárias para uma correta modelagem matemática do fenômeno.

As informações extraídas neste trabalho constituem uma importante contribuição para o estado da arte, visto que existem poucos estudos sobre o assunto reportados na literatura. Adicionalmente, os dados experimentais devem servir como um banco de dados que subsidie o desenvolvimento e a validação de modelos matemáticos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

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

No primeiro capítulo, foi realizada uma introdução sobre escoamento bifásico em golfadas com mudança de direção, abordando alguns conceitos básicos e apontando a sua importância em aplicações industriais. Além disso, foram apresentados os objetivos e as justificativas da realização deste estudo.

O segundo capítulo apresenta uma fundamentação teórica dos assuntos relevantes para realização do trabalho. É feita uma revisão bibliográfica que se concentrou principalmente nas definições básicas de escoamento bifásico, nos parâmetros que caracterizam os escoamentos em golfadas, nos fenômenos envolvidos em mudanças de direção e nos estudos anteriores sobre escoamentos bifásicos com mudança de direção.

No terceiro capítulo é mostrada a metodologia experimental utilizada na realização deste trabalho. Inicialmente é descrito o circuito experimental, destacando-se o funcionamento dos sensores resistivos e as câmeras de alta taxa de aquisição. Posteriormente, é mostrado o sistema supervisor, os procedimentos aplicados na realização dos testes, as metodologias utilizadas no processamento dos sinais obtidos pelos sensores resistivos e das imagens obtidas pela câmera e, por fim, os conceitos estatísticos usados no decorrer do projeto.

No quarto capítulo são apresentadas as análises realizadas sobre os resultados experimentais. É mostrada a grade de testes utilizada, além dos procedimentos para verificar os valores obtidos pelos sensores resistivos e a

repetitividade das medições. É discutido o comportamento dos parâmetros característicos dos pontos que permanecem em golfadas no trecho descendente e são investigadas as condições em que ocorre a transição para escoamento estratificado.

No quinto capítulo são descritas as conclusões obtidas com a realização deste trabalho.

No apêndice A é mostrado o processo utilizado na obtenção das velocidades superficiais do escoamento, no apêndice B é feita uma análise das incertezas contidas no circuito experimental e no apêndice C são apresentados os resultados médios obtidos nos testes experimentais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos necessários para o desenvolvimento deste trabalho e de estudos publicados na literatura. Inicialmente é detalhado o escoamento no padrão de golfadas e parâmetros importantes para a sua caracterização. Posteriormente são descritos os fenômenos que ocorrem em mudanças de direção. Por fim, é apresentada uma revisão de alguns estudos existentes sobre o escoamento bifásico em golfadas com mudança de direção.

2.1 ESCOAMENTO EM GOLFADAS

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

O pistão de líquido pode 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 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 uma bolha alongada e um pistão de líquido foi definida por Wallis (1969) como uma célula unitária. A Figura 4 mostra uma representação esquemática do escoamento em golfadas horizontal, vertical e inclinado, destacando-se as regiões da célula unitária: pistão (aerado) e bolha alongada.

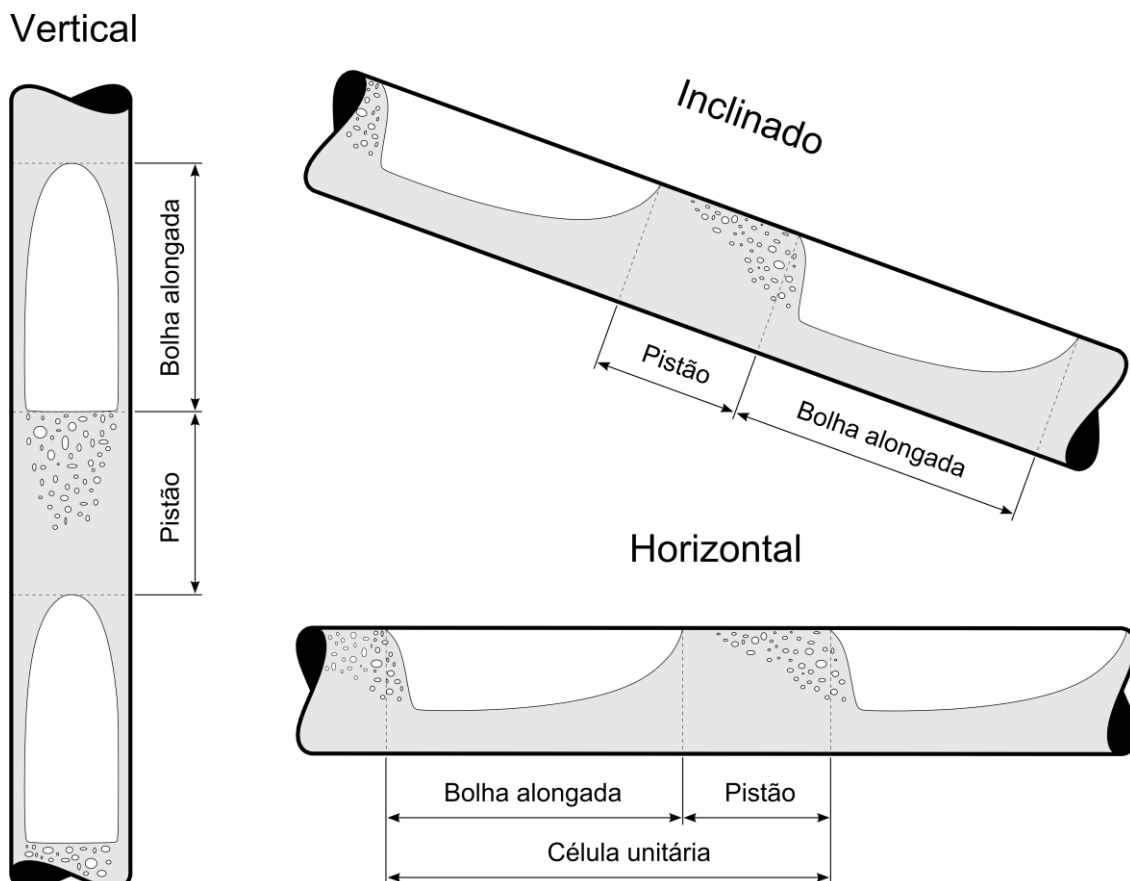


Figura 4 - Representação esquemática do escoamento em golfadas com pistão aerado

Dukler e Hubbard (1975) desenvolveram um modelo através de uma abordagem fenomenológica, que teve grande contribuição no entendimento dos mecanismos físicos envolvidos e no comportamento hidrodinâmico do escoamento em golfadas. Eles sugeriram que o pistão de líquido ocupa toda a seção transversal do tubo e escoar com uma velocidade relativamente alta, enquanto o filme de líquido a sua frente move-se com velocidade menor. Desta forma, o pistão captura líquido do filme a sua frente, criando uma região de esteira na porção frontal do pistão, provocando uma elevada queda de pressão nesta região. 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 golfadas estabelecido.

2.2 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO EM GOLFADAS

Normalmente são usados alguns parâmetros para caracterizar escoamentos bifásicos de líquido-gás em golfadas. Esses parâmetros 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 são extraídos do escoamento os seguintes parâmetros: velocidade e comprimento da bolha alongada, comprimento do pistão de líquido, frequência e frações de gás na bolha e no pistão. Esses parâmetros são descritos nas seções seguintes, juntamente com as velocidades superficiais de líquido e gás.

2.2.1 Velocidades Superficiais de Líquido e Gás

As velocidades superficiais do líquido (J_L) e do gás (J_G) são definidas como a razão entre a vazão volumétrica (\dot{Q}) da fase correspondente e a área da seção transversal do tubo (A), como mostrado nas equações (1) e (2).

$$J_L = \frac{\dot{Q}_L}{A} \quad (1)$$

$$J_G = \frac{\dot{Q}_G}{A} \quad (2)$$

Dessa forma, a velocidade superficial representa a velocidade média que a fase teria caso escoasse sozinha na tubulação.

A soma das velocidades superficiais é definida como sendo a velocidade da mistura (J), apresentada na equação (3).

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

2.2.2 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 como a soma de L_S e L_B . Estes comprimentos são apresentados esquematicamente na Figura 5.

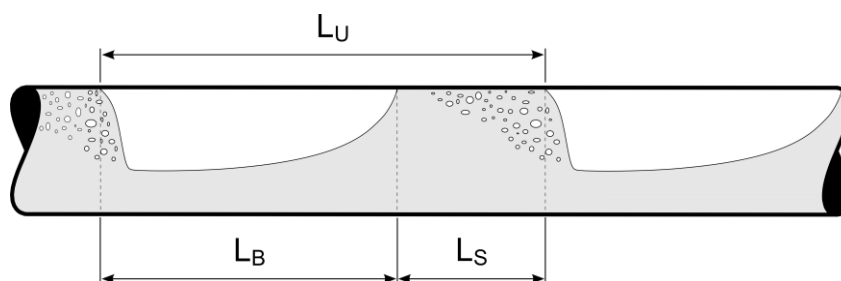


Figura 5 - Comprimentos da bolha alongada, pistão e célula unitária

Como mostrado na Figura 5, o comprimento do pistão é definido pela distância entre duas bolhas consecutivas. Afastando-se da entrada do escoamento, o pistão tende a atingir um comprimento estável, em que a quantidade de líquido capturada do filme à sua frente é igual à cedida ao filme na sua traseira, estabelecendo assim um escoamento desenvolvido. 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).

2.2.3 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 (BENDIKSEN, 1984).

Segundo Taitel e Barnea (1990), a velocidade da bolha alongada pode ser calculada como a superposição de três efeitos: a influência da movimentação do líquido à frente da bolha, velocidade de translação de uma bolha em líquido estagnado e efeito de esteira que surge da traseira da bolha que está à frente. Assim, o cálculo da velocidade, considerando os efeitos citados, pode ser feito através da relação:

$$V_B = (C_0 J + C_\infty \sqrt{gD})(1+h), \quad (4)$$

onde C_0 , C_∞ 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 .

O parâmetro de distribuição (C_0) da equação (4) 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 (NICKLIN *et al.*, 1962; BENDIKSEN, 1984). Como o regime de escoamento tem influência no perfil de velocidades, encontram-se valores diferentes de C_0 para regimes de escoamento laminar e turbulento. Nicklin *et al.* (1962) sugeriram um valor de 1,2 para C_0 considerando um escoamento turbulento completamente desenvolvido, enquanto Bendiksen (1984), através de um estudo experimental, sugeriu a correlação:

$$C_0 = \begin{cases} 1,05 + 0,15 \operatorname{sen}^2 \theta & ; \text{ se } Fr_J < 3,5 \\ 1,2 & ; \text{ se } Fr_J \geq 3,5 \end{cases}, \quad (5)$$

onde θ denota a inclinação do duto em relação à horizontal e Fr_J o número de Froude da mistura, que representa a razão entre as forças de inércia e gravitacionais, sendo definido por:

$$Fr_J = \frac{J}{\sqrt{gD}}. \quad (6)$$

A constante C_∞ , apresentada na equação (4), é conhecida como parâmetro de deslizamento e quantifica a velocidade da bolha em um líquido estagnado. Em escoamentos horizontais, há uma controvérsia sobre sua existência. Alguns pesquisadores consideram que, pelo fato da 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.

As correlações propostas por Weber (1981) e Bendiksen (1984) para o cálculo de C_∞ são apresentadas, respectivamente nas equações (7) e (8).

$$C_\infty = 0,54 - 1,76Eo^{-0,56} \quad (7)$$

$$C_\infty = \begin{cases} 0,54 \cos \theta + 0,35 \operatorname{sen} \theta & ; \text{ se } Fr_j < 3,5 \\ 0,35 \operatorname{sen} \theta & ; \text{ se } Fr_j \geq 3,5 \end{cases} \quad (8)$$

Eo é o número de Eötvös, que representa a relação entre as forças de empuxo e tensão superficial, definido por:

$$Eo = \frac{D^2 g (\rho_L - \rho_G)}{\sigma}, \quad (9)$$

onde σ denota a tensão superficial, ρ_L e ρ_G as massas específicas do líquido e do gás, respectivamente.

A constante de esteira, h , presente na equação (4), 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 seguinte forma:

$$h = a \exp\left(-b \frac{L_s}{D}\right), \quad (10)$$

em que variam somente as constantes a e b utilizadas.

2.2.4 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. Então pode ser calculado um valor de frequência (f) da célula unitária, que é definido como o inverso do tempo que essa unidade leva para passar por uma determinada seção, como mostrado na seguinte relação:

$$f = \frac{1}{T_B + T_S}, \quad (11)$$

onde 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 às equações (12) e (13).

$$T_B = \frac{L_B}{V_B} \quad (12)$$

$$T_S = \frac{L_S}{V_B} \quad (13)$$

Substituindo as equações (12) e (13) na equação (11) encontra-se a equação (14).

$$f = \frac{V_B}{L_B + L_S} \quad (14)$$

Também pode ser realizado o cálculo para uma frequência média. Uma das maneiras é aplicar na equação (14) os valores médios de V_B , L_B e L_S . Outra maneira é através da razão entre o número de bolhas alongadas, N_B , que passou pela seção transversal do tubo e o tempo de observação (T), como pode ser visto na equação (15).

$$f = \frac{N_B}{T} \quad (15)$$

Algumas correlações são propostas para a determinação da frequência através de parâmetros conhecidos do escoamento, sendo que a maioria delas baseia-se em medidas experimentais. 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. Sendo bastante utilizadas as correlações propostas por Gregory e Scott (1969) e Heywood e Richardson (1979).

Para tubulações horizontais Gregory e Scott (1969) propuseram a correlação:

$$f = 0,0226 \left[\frac{J_L}{gD} \left(\frac{19,75}{J} + J \right) \right]^{1,2} . \quad (16)$$

Heywood e Richardson (1979) propuseram a relação:

$$f = 0,0434 \left[\frac{J_L}{J} \left(\frac{2,02}{D} + Fr_J \right) \right]^{1,02} . \quad (17)$$

2.2.5 Frações de Gás na Bolha e no Pistão

A fração de gás (R_G) em uma determinada seção transversal do escoamento é definida como a relação entre a área ocupada pelo gás (A_G) naquela seção e a área total do tubo (A), como mostrado na equação (18).

$$R_G = \frac{A_G}{A} \quad (18)$$

Assim, a fração de gás média considerando todo o comprimento de uma bolha alongada é definida como a fração de gás na bolha (R_{GB}). Analogamente, define-se a fração de gás no pistão (R_{GS}).

Da mesma forma, define-se a fração de líquido (H_L) como a razão da área ocupada pelo líquido na seção transversal pela área total, com seus valores médios na bolha e no pistão denotados, respectivamente, por H_{LB} e H_{LS} .

2.3 MUDANÇA DE DIREÇÃO

Escoamentos com mudança de direção são comuns em situações nas quais a tubulação deve se ajustar ao relevo. Em tubulações retas, a mudança de direção pode ocorrer em cotovelos inferiores ou superiores, esquematizados na Figura 6,

apresentando fenômenos distintos para escoamento em golfadas em cada uma dessas configurações.

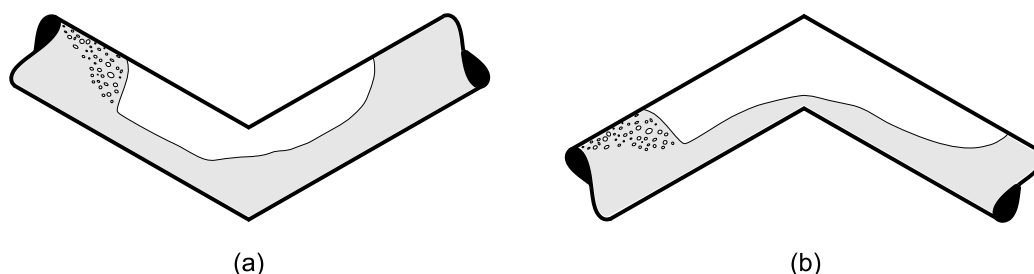


Figura 6 - (a) Cotovelo inferior (b) Cotovelo superior

Como os fenômenos são distintos, a dinâmica do escoamento em cotovelos superiores e inferiores é descrita separadamente nas seções seguintes. Além disso, são apresentados alguns trabalhos que estudam escoamentos em golfadas com mudança de direção.

2.3.1 Cotovelos Inferiores

No escoamento em golfadas em cotovelos inferiores, quando o filme de líquido passa pela região de mudança de direção, devido à ação da gravidade, tanto o líquido a montante, quanto a jusante tende a fluir em direção ao cotovelo, fazendo com que haja um acúmulo de líquido nessa região, como mostrado na Figura 7 (a).

Caso o volume de líquido acumulado seja suficiente para bloquear a passagem de gás, um novo pistão será formado e a bolha alongada será dividida em duas, Figura 7 (b). Se a quantidade de líquido não for suficiente para gerar uma barreira estável à passagem de gás, o líquido acumulado será capturado pelo pistão seguinte, que irá aumentar de tamanho (Figura 7 (c)).

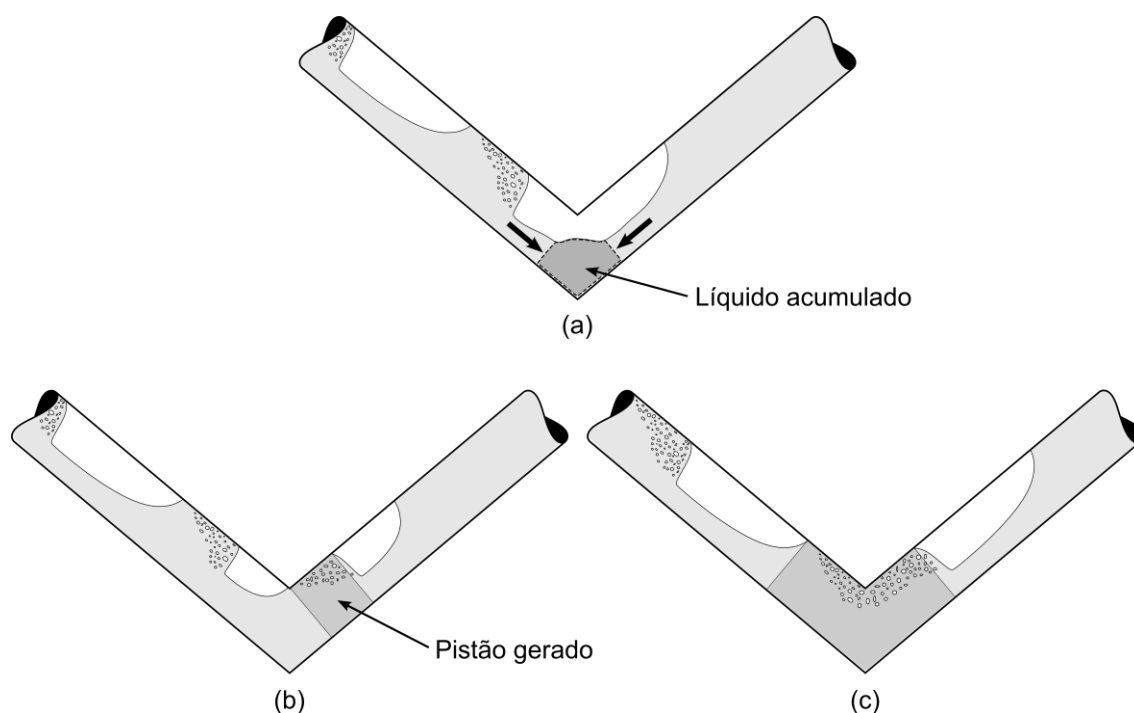


Figura 7 - Dinâmica do escoamento em golfadas em um cotovelo inferior

A geração do pistão, por crescimento de onda, segue o mecanismo de instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Esse mecanismo considera que o líquido acumulado gera uma onda na região do cotovelo, diminuindo, conseqüentemente, a área para passagem do gás, fazendo com que ele aumente localmente sua velocidade. A redução de pressão, causada por essa aceleração do gás, irá resultar em uma força de sucção no líquido, chamada de efeito Bernoulli. Quando esse efeito for suficiente para fazer com que a onda cresça até bloquear a passagem de gás, é gerado um novo pistão.

Outro mecanismo para geração de pistão, observado por Al-Safran *et al.* (2005), é o de coalescência de ondas, em que pequenas ondas geradas no cotovelo coalescem, já na seção ascendente, formando um pistão.

2.3.2 Cotovelos Superiores

No escoamento em golfadas, quando o filme de líquido atravessa um cotovelo superior, devido à ação da gravidade, o líquido a montante e a jusante flui para baixo, como mostrado na Figura 8 (a), tendendo a drenar a região do cotovelo, fazendo com que o filme torne-se descontínuo (Figura 8 (b)).

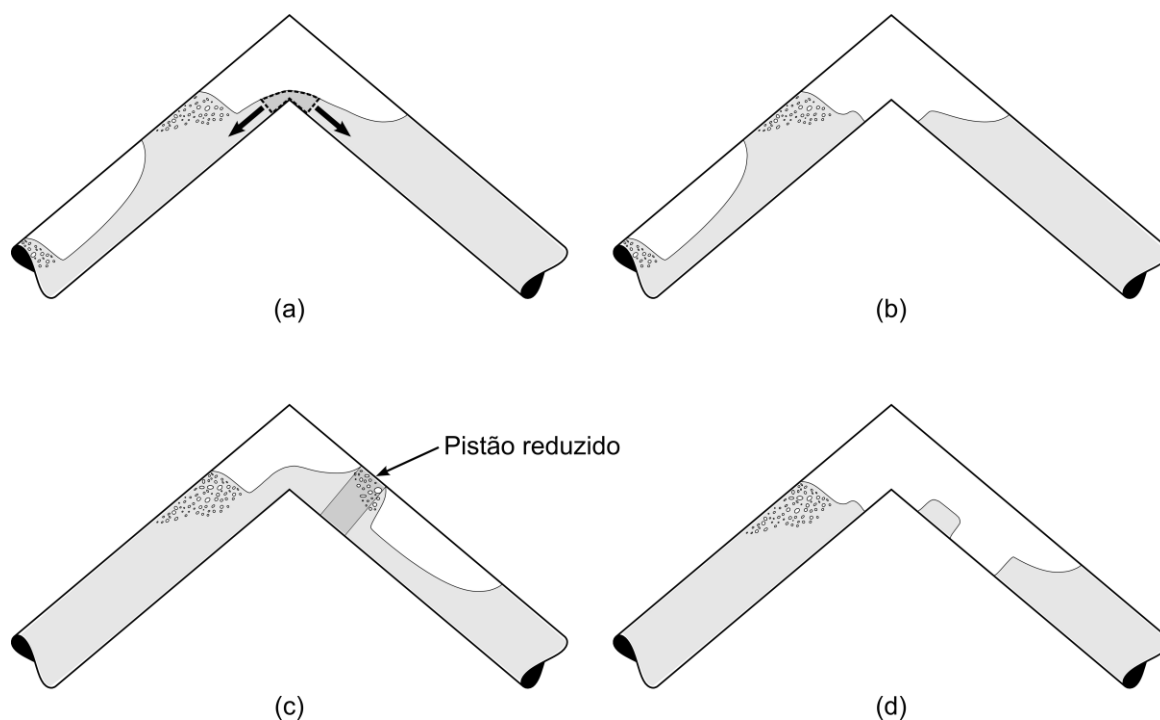


Figura 8 - Dinâmica do escoamento em golfadas em um cotovelo superior

Dessa forma, não será possível que o pistão imediatamente atrás desse filme capture líquido a sua frente, e como continuará cedendo líquido para o filme na sua traseira, terá seu comprimento gradativamente reduzido. Caso o pistão seja suficientemente grande para alcançar o próximo filme, ele seguirá normalmente à jusante, com um tamanho reduzido (Figura 8 (c)). Caso o pistão não tenha o tamanho suficiente, ele será extinto, e o escoamento seguirá com uma região estratificada seguida por uma região apenas com gás, chamada de pistão de gás, como representado na Figura 8 (d).

Se sucessivos pistões forem extintos, teoricamente o escoamento seguiria com diversas regiões estratificadas seguidas por pistões de gás, mas na prática, o que ocorre é a transição do escoamento em golfadas para estratificado.

Outro caso em que acontece a transição do escoamento em golfadas, apresentado em Taitel *et al.* (2000), é quando, na região descendente, o filme escoava com velocidade maior que a do pistão. Nessas condições, a traseira do pistão não fornecerá líquido para o filme seguinte, mas a frente do pistão cederá líquido para o filme à sua frente, assim a bolha penetrará no pistão, podendo estabelecer o escoamento estratificado.

2.3.3 Revisão de Trabalhos Sobre Escoamento Bifásico com Mudança de Direção

Nesta seção são descritos alguns trabalhos, numéricos e experimentais, que buscam descrever o comportamento do escoamento em golfadas com mudança de direção.

Zheng *et al.* (1994) modelaram numericamente o escoamento em golfadas com mudança de direção através do método de seguimento de pistões. O objetivo dos pesquisadores era simular o movimento, crescimento, geração, coalescência e extinção de pistões quando essas estruturas estão submetidas à mudança de direção. As principais simplificações utilizadas foram: que a velocidade de cada filme de líquido dependia apenas da inclinação, a espessura dos filmes de líquido não variavam, o gás era incompressível, e a velocidade de todos os pistões era constante e igual à velocidade da mistura.

Através de um balanço de massa no cotovelo inferior, Zheng *et al.* (1994) desenvolveram uma relação para a taxa de acúmulo de líquido na região de mudança de direção. A partir dessa relação, encontrou-se um comprimento equivalente para um provável pistão gerado, e determinou-se que o pistão seria realmente gerado se atingisse um comprimento mínimo, estabelecido experimentalmente. Os resultados obtidos foram comparados com medidas experimentais e, mesmo com as simplificações adotadas, apresentaram boa concordância.

Henau e Raithby (1995) obtiveram dados experimentais para escoamentos bifásicos líquido-gás com golfadas induzidas pela topografia, e compararam com o previsto por um modelo de dois fluidos. No estudo experimental foi utilizada uma bancada com dois trechos descendentes e dois ascendentes intercalados, iniciando-se por um trecho descendente. Foram testados dois casos: regime estacionário e transiente. A comparação entre os experimentos e o modelo de dois fluidos em regime transiente apresentou boa concordância, porém para regime estacionário os resultados apresentaram algumas discrepâncias.

Zheng *et al.* (1995) conduziram um estudo experimental para escoamento em golfadas com mudança de direção, analisando o escoamento bifásico de ar e querosene. Os experimentos foram realizados em uma tubulação com 77,9 mm de diâmetro interno composta por uma seção horizontal seguida por uma ascendente, uma descendente e outra horizontal. Nove sensores capacitivos foram instalados ao

longo da tubulação para determinar os valores das frações de líquido instantâneas, das velocidades dos pistões e das diferenças dos comprimentos dos pistões nos tubos horizontais e inclinados.

Zheng *et al.* (1995) observaram que os comprimentos dos pistões nas seções ascendentes eram maiores que os comprimentos nas seções horizontais, fato explicado pelo líquido cedido pelos filmes para os pistões. Também foi observada a geração e dissipação de pistões nos cotovelos. Além disso, foram analisados os efeitos causados pela variação das velocidades superficiais e dos ângulos de inclinação da seção ascendente, avaliando-se os resultados das frequências da célula unitária e dos comprimentos dos pistões.

Buscando descrever escoamento em golfadas com mudança de direção, Taitel e Barnea (2000) apresentaram uma extensão do modelo de seguimento de pistões desenvolvido por Taitel e Barnea (1998), incorporando os mecanismos de geração e dissipação de pistões descritos em Zheng *et al.* (1994). Esse modelo é mais geral que seus antecessores por considerar: os efeitos da compressibilidade do gás, uma fração de gás no pistão, a variação da fração de vazio na bolha alongada e uma possível variação da velocidade de translação da bolha alongada.

Taitel *et al.* (2000) avaliaram as soluções das equações da conservação de massa e quantidade de movimento, aplicadas a um escoamento em golfadas descendente. Os autores propuseram que, nas condições em que não há uma solução fisicamente coerente para as equações, ocorre a dissipação do escoamento em golfadas, e a transição para outro padrão. A não existência da solução foi relacionada com dois fenômenos: o filme escoar mais rápido que o pistão, ou o pistão passando por um cotovelo superior se dissipa completamente antes de atingir o filme seguinte. Além disso, os autores estimaram a distância necessária para a dissipação dos pistões.

Al-Safran *et al.* (2000) realizaram um estudo experimental do escoamento em golfadas com mudança de direção, utilizando uma mistura de óleo mineral parafínico e ar. A bancada era composta por tubos de acrílico com 50,8 mm de diâmetro interno, sendo a tubulação formada por um trecho horizontal, seguido por um inclinado descendente, um inclinado ascendente e novamente um horizontal, totalizando 42,7 m. O circuito foi instrumentado com sensores capacitivos para a extração de parâmetros característicos do escoamento.

O principal objetivo de Al-Safran *et al.* (2000) foi construir uma bancada experimental para o estudo do escoamento em golfadas com mudança de direção. Além disso, foram adquiridos dados para analisar os fenômenos de dissipação, crescimento e geração dos pistões nas seções descendentes, ascendentes e no cotovelo inferior, respectivamente. Também foram analisadas as frequências das células unitárias e as distribuições dos comprimentos e das velocidades dos pistões.

Al-Safran *et al.* (2004) apresentaram um modelo de seguimento de pistões para escoamento em golfadas com mudança de direção, buscando descrever os comprimentos dos pistões ao longo da tubulação. Os resultados das simulações foram comparados com dados experimentais obtidos no TUFFP (*Tulsa University Fluid Flow Projects*) para dois casos, o primeiro em que na seção descendente é estabelecido o escoamento estratificado e o segundo em que na seção descendente o escoamento em golfadas persiste. Segundo os autores, o modelo consegue prever com boa precisão os valores médios e desvios padrões para ambos os casos, sendo que a grande dificuldade apresentada está em prever o valor máximo do comprimento do pistão.

Al-Safran *et al.* (2005) desenvolveram um estudo experimental buscando analisar os fenômenos envolvidos no escoamento em golfadas com mudança de direção. Os experimentos foram conduzidos com óleo mineral parafínico e ar, utilizando-se uma bancada com características iguais às usadas em Al-Safran *et al.* (2000). Os autores avaliaram, para diferentes configurações de vazão e inclinação, o comportamento do escoamento. Observando, na região descendente, situações onde o escoamento em golfadas se dissipa parcialmente, totalmente ou não se dissipa, e no cotovelo inferior, situações em que ocorre a geração e o crescimento de pistões. Na geração de pistões, foram observados dois mecanismos distintos: o crescimento e a coalescência de ondas.

Mandal *et al.* (2008) realizaram um estudo experimental do escoamento bifásico em golfadas de água e ar com mudança de direção. O circuito experimental utilizado era composto por uma tubulação de 25 mm de diâmetro interno, formada por um trecho horizontal, seguido por um inclinado ascendente, um inclinado descendente e outro horizontal. Foram instaladas sondas condutivas com o objetivo de caracterizar o escoamento, e, adicionalmente, uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens para realizar a visualização do escoamento.

Os resultados obtidos por Mandal *et al.* (2008) mostraram um aumento do comprimento dos pistões nas seções ascendentes e a diminuição nas seções descendentes. Além disso, os pesquisadores observaram que podem ocorrer três situações com os pistões nas seções descendentes: dissipação completa, dissipação parcial ou nenhuma dissipação. Observaram também que a ocorrência de cada situação é função da velocidade superficial de gás e do número de Froude na entrada da seção descendente.

Buscando descrever o escoamento com uma leve mudança de direção, passando de um trecho horizontal para um trecho inclinado ascendente, Conte *et al.* (2011) adaptaram o modelo de seguimento de pistões proposto por Rodrigues (2009). O modelo apresentado avalia o acúmulo de líquido na região do cotovelo, e, através da aplicação do critério de instabilidade de Kelvin-Helmholtz, verifica se haverá a geração de um novo pistão. Caso não aconteça a geração do pistão, o líquido acumulado é transferido para o pistão seguinte, fazendo com que o seu comprimento aumente. Llantoy Parra (2013) aperfeiçoou o modelo proposto por Conte *et al.* (2011), passando a considerar a alteração na geometria da bolha alongada quando ela muda de inclinação. Essa alteração na geometria foi feita através da aplicação do modelo de bolha desenvolvido por Taitel e Barnea (1990).

2.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma revisão dos estudos publicados sobre escoamento bifásico em golfadas. Foram destacados os parâmetros utilizados na sua caracterização, os fenômenos que ocorrem na região de mudança de direção e os estudos existentes sobre o escoamento bifásico gás-líquido em golfadas com mudança de direção.

Observou-se que há uma quantidade reduzida de trabalhos sobre o escoamento em golfadas com mudança de direção, especialmente quando se trata de escoamento horizontal com uma mudança de inclinação na direção descendente.

Neste contexto, acredita-se que o presente trabalho trará uma contribuição importante para a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos nessa situação de escoamento.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é mostrada a metodologia experimental utilizada no desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente é apresentado o circuito experimental com os equipamentos que são usados na realização dos testes, em seguida é mostrado o sistema supervisor e são descritos os procedimentos adotados nas medições, as técnicas empregadas no processamento dos dados e as ferramentas estatísticas utilizadas.

3.1 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO EXPERIMENTAL

Os testes foram realizados utilizando o circuito experimental do Núcleo de Escoamentos Multifásicos (NUEM) da UTFPR. O circuito é formado por tubos de acrílico transparente, uma bomba centrífuga, medidores de vazão e de pressão, um compressor e dois vasos de pressão. Todos os equipamentos de medição estão conectados a um sistema supervisor, que faz o monitoramento das condições do escoamento. Adicionalmente, são instalados sensores resistivos em todas as seções de testes, e são posicionadas duas câmeras de alta taxa de aquisição de imagens, uma na região de mudança de direção e outra logo após a última estação de medição. Uma análise das incertezas contidas no circuito experimental é apresentada no apêndice B.

Na Figura 9 é mostrada uma representação esquemática da bancada experimental. Para facilitar a compreensão, a descrição da bancada será dividida em circuito de líquido, de gás e bifásico, sensores resistivos, câmeras de alta taxa de aquisição de imagens e estações de medição.

3.1.1 Circuito de Líquido

O circuito de líquido conta com um reservatório de água, uma bomba centrífuga e um medidor de vazão. O reservatório é um tanque com capacidade para 350 litros, que tem como função fornecer o líquido para o circuito de testes durante a realização dos experimentos.

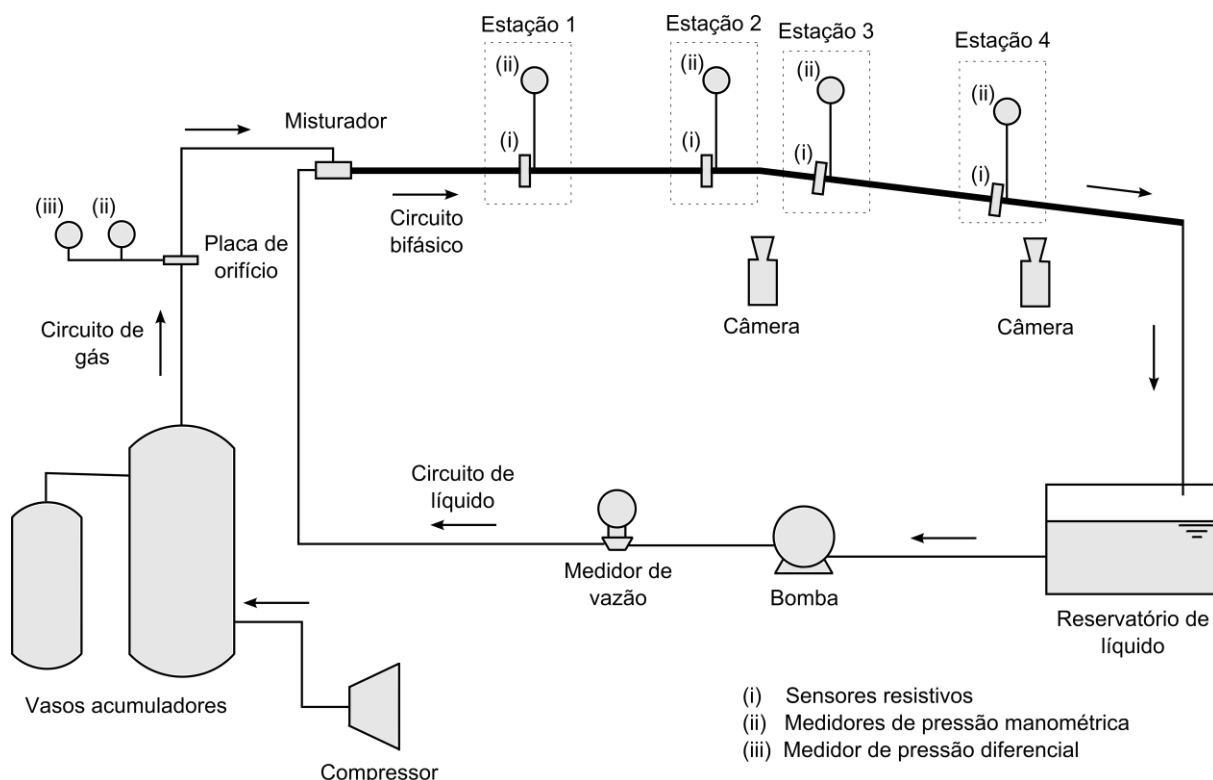


Figura 9 - Representação esquemática da bancada experimental

O deslocamento do líquido é feito por uma bomba centrífuga Fabo Bombas (BCIE602/7822), com uma pressão máxima 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 3 CV, 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 (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 à tubulação de acrílico.

3.1.2 Circuito de Gás

O circuito de gás é composto por um compressor, dois vasos acumuladores, um medidor de pressão diferencial, um medidor de pressão relativa e uma placa de orifício.

É usado um compressor elétrico rotativo da marca PEG, que suporta uma pressão máxima de 8 bar. Sua função consiste em preencher os vasos

acumuladores com ar pressurizado, que posteriormente será injetado no circuito. Os dois vasos de pressão, que funcionam como acumuladores, são da marca Engetank, com pressão máxima de trabalho de 14 bar, e com capacidade para 100 e 500 litros.

A vazão de gás é medida por um sistema com uma placa de orifício, calibrado previamente utilizando rotômetros da marca *Reotest Haake* como padrão (o processo de calibração é descrito detalhadamente no apêndice A). 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. 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 inicia-se no misturador, desenvolve-se pela tubulação horizontal, passa pela tubulação inclinada descendente e então, após o final da tubulação de acrílico, é descarregada através de uma tubulação secundária no reservatório de água. A separação das fases é feita pela ação da gravidade no reservatório, que está aberto para a atmosfera.

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 26 mm de diâmetro interno, sendo composta por um trecho horizontal de 5,76 m seguido por um trecho inclinado descendente de 3,38 m, conectados por um cotovelo, que pode ser de -3° , -5° ou -7° , dependendo da configuração adotada.

3.1.4 Sensores Resistivos

A extração dos parâmetros de escoamento, em cada uma das seções de testes, é feita por um par de sensores de detecção de fases do tipo resistivo. Os

sensores utilizados foram desenvolvidos no NUEM por Machado *et al.* (2013), e funcionam adquirindo valores de tensão e relacionando-os com as frações de líquido e gás na tubulação. Para isso, são compostos por dois filamentos de aço inoxidável com 100 μm de diâmetro, sendo que um deles funciona como eletrodo de excitação e o outro como eletrodo de recepção.

O eletrodo responsável pela excitação recebe um sinal quadrado de 5 Vpp com frequência de 1,75 kHz, e envia, através do fluido que está passando na seção medida, esse sinal de excitação para o eletrodo de recepção. Como existe uma grande diferença entre a condutividade do líquido e do gás, encontrou-se que a tensão medida no receptor varia linearmente com a quantidade de líquido na seção, atingindo o valor máximo com o tubo cheio de líquido, e o mínimo com ele vazio (cheio de gás). Dessa forma, com o sinal recebido é possível determinar a altura de líquido na seção através da comparação com um sinal de calibração.

Os filamentos são fixados a uma placa de circuito impresso de fibra de vidro, com 2 mm de espessura, e espaçados entre si por 3 mm, como é mostrado na Figura 10.

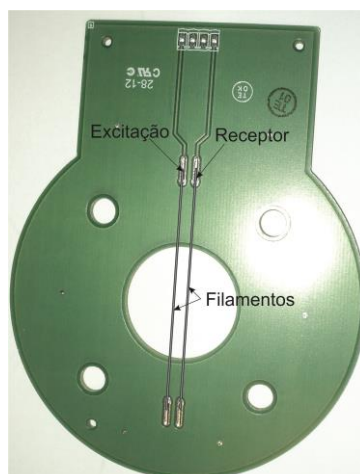


Figura 10 - Sensor resistivo

Para facilitar a montagem dos sensores na tubulação, e possibilitar medidas de velocidade, foi desenvolvido um arranjo com dois sensores resistivos, mostrado na Figura 11. Ele é composto por três placas (uma central para aterramento e dois sensores), flanges de acrílico e *o-rings*.

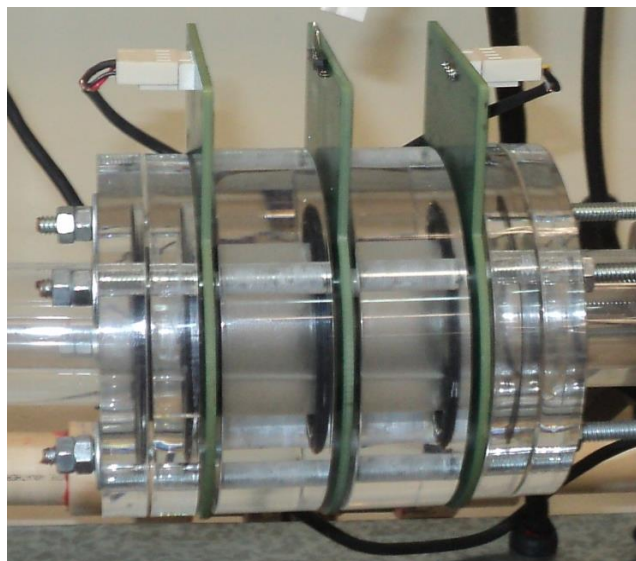


Figura 11 - Arranjo de um par de sensores resistivos

A placa localizada no centro da montagem é ligada ao aterramento funcional do sistema, buscando evitar possíveis interferências. Os sensores estão localizados nas placas das extremidades da montagem, distantes 5 cm entre si. Dessa forma, é possível a obtenção de valores de velocidade através da medição do tempo de trânsito das estruturas de um sensor ao outro.

Para possibilitar o funcionamento dos sensores resistivos, eles estão ligados a um sistema composto por: um circuito eletrônico que gera os sinais de excitação e captura os sinais de resposta; uma placa de aquisição de dados, da marca *National Instruments* modelo NI USB-6211, responsável pela conversão dos sinais analógicos em digitais e pela comunicação com o computador, possibilitando uma interface com o usuário; e um aplicativo feito na plataforma LabVIEW que realiza essa interface, permitindo a configuração de vários parâmetros. Uma representação esquemática desse sistema é apresentada na Figura 12.

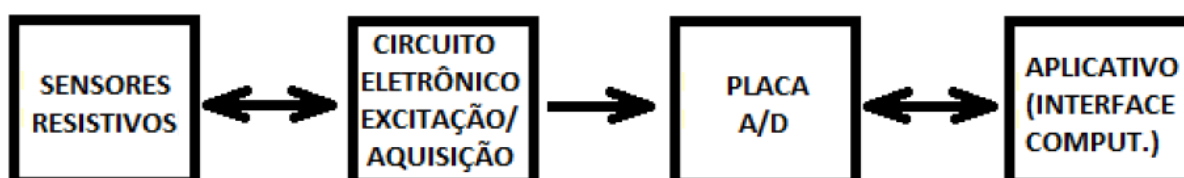


Figura 12 - Representação esquemática do sistema do sensor resistivo
 Fonte: adaptado de Machado *et al.*, 2013.

3.1.5 Câmeras de Alta Taxa de Aquisição de Imagens

São utilizadas duas câmeras, uma IDT X-Series MotionPro X3 e uma La Vision Fastcam SA4, mostradas na Figura 13. A primeira pode proporcionar uma taxa de aquisição máxima de 1040 imagens por segundo com uma resolução de 1280x1024, contando com 4 GB de memória disponível para o armazenamento de dados. Enquanto a segunda fornece uma taxa de aquisição máxima de 3600 imagens por segundo com a resolução de 1024x1024, apresentando 8 GB de memória interna.



(a) MotionPro X3



(b) Fastcam SA4

Figura 13 - Câmeras de alta taxa de aquisição de imagens

Cada uma das câmeras conta com um *software* próprio, 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 são adquiridos. O ajuste do foco é realizado manualmente.

A câmera MotionPro X3 é posicionada de modo que capture a faixa do escoamento onde acontece a mudança de direção, buscando visualizar em detalhes os fenômenos que ocorrem nessa região. A Fastcam SA4 é posicionada logo após a última estação de medição, buscando capturar imagens que, após um processamento, fornecem os valores de velocidades das bolhas. Dessa forma, a técnica utilizada na extração de parâmetros com os sensores resistivos pode ser verificada através da comparação dos resultados obtidos pela câmera com os obtidos pelo sensor da estação 4.

O processamento das imagens, realizado para extrair os valores de velocidade da bolha, é feito com um programa desenvolvido no NUEM por Amaral *et*

al. (2013). Uma descrição do funcionamento desse programa é apresentada na seção 3.4.2.

3.1.6 Estações de Medição

Foram escolhidas quatro estações de medição (seções de testes), distantes 164D, 212D, 230D e 266D do misturador, como mostrado no esquema apresentado na Figura 14. Sendo a segunda e a terceira estações posicionadas de forma que fiquem próximas ao cotovelo, que está localizado a 221D da entrada do escoamento.

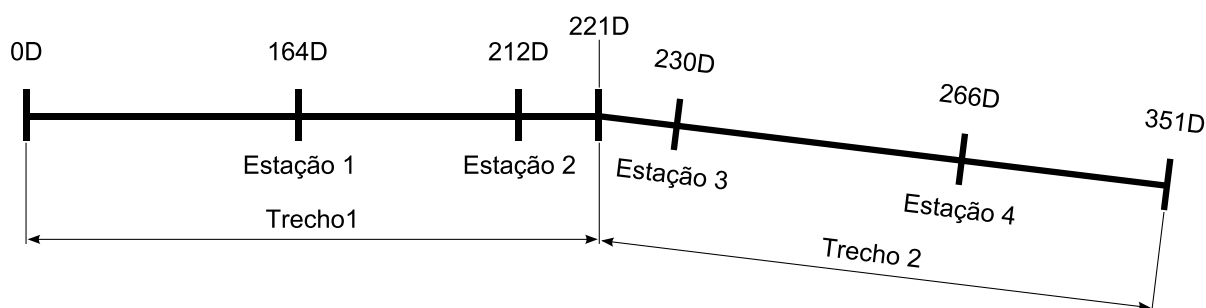


Figura 14 - Esquema da distribuição das estações de medição

Em cada uma das estações foi instalado um medidor de pressão, que é utilizado para efetuar a correção no cálculo da velocidade superficial do gás e para avaliar a queda de pressão entre os trechos. Além disso, cada seção conta com um par de sensores resistivos, descritos na seção 3.1.4, que são os responsáveis pela extração dos parâmetros do escoamento.

Caixas retangulares de acrílico transparente, preenchidas com água, envolvem as regiões do tubo em que são feitas as filmagens. Elas servem para reduzir as distorções das imagens e os efeitos de aquecimento causados pela radiação da lâmpada.

A iluminação de cada região filmada é feita com uma lâmpada de halogênio com 150 W posicionada próxima à caixa de acrílico. Para garantir uma iluminação uniforme, importante na etapa de processamento das imagens, é colocada uma superfície difusora entre a lâmpada e a caixa. Na Figura 15 é mostrada uma representação esquemática da região em que é feita a filmagem.

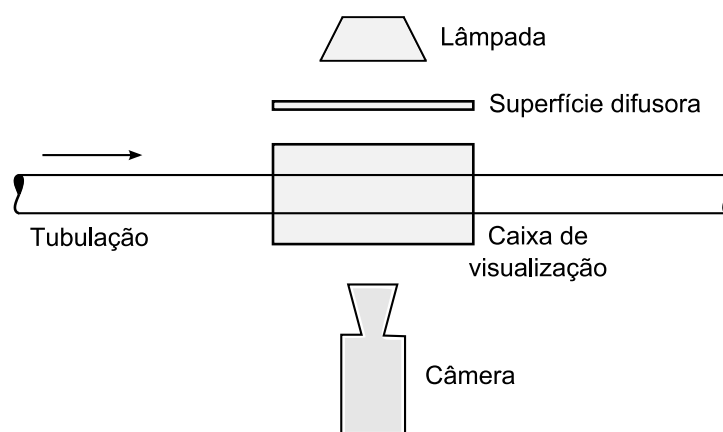


Figura 15 - Esquema da região filmada

3.2 SISTEMA SUPERVISÓRIO

A aquisição de dados no circuito experimental é realizada 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 supervisório consiste em um programa criado em *LabVIEW*, que serve para monitorar os valores de pressões e das velocidades superficiais das fases, além de gravar os dados adquiridos de toda a bancada.

As pressões e as velocidades superficiais de gás têm seus valores instantâneos monitorados, enquanto 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 MEDIÇÃO

O procedimento para realizar as medições experimentais inicia-se pelo posicionamento das câmeras nas regiões de interesse. É ajustada a iluminação e são ligados os programas específicos para cada câmera, permitindo o ajuste do foco e dos demais parâmetros de filmagem. As taxas de aquisições usadas foram de 125 ou 250 imagens por segundo, dependendo das vazões das fases.

Então são ligados os sensores de pressão e temperatura juntamente com o medidor de vazão de líquido. O sistema supervisor é acionado, possibilitando a verificação do funcionamento e da comunicação de todos os sensores instalados no circuito.

Os sensores resistivos e o seu *software* de controle são conectados. É produzido um escoamento monofásico de líquido na tubulação, de onde é adquirido o sinal de calibração requerido pelos sensores resistivos, além de capturar a imagem padrão, necessária na etapa de processamento de imagens. A calibração desses sensores é repetida várias vezes durante as medições, pois se observou que há uma variação na temperatura do líquido que afeta significativamente a sua condutividade e, conseqüentemente, a resposta dos sensores.

São então ajustadas as vazões das fases que correspondem às velocidades superficiais do ponto que será medido. A vazão de líquido é informada na interface gráfica do sistema supervisor, que ajusta automaticamente a rotação da bomba para atingir e manter o valor desejado, enquanto a vazão do gás é ajustada pela manipulação de uma válvula tipo agulha.

Após aguardar um período para a estabilização das vazões, é iniciada a aquisição dos dados. É necessário que o usuário inicie a gravação no sistema supervisor e no programa dos sensores resistivos, enquanto as câmeras começam a gravação quando recebem um sinal de *trigger* enviado pelo resistivo para sincronizar as suas aquisições. O tempo de gravação foi de 100 ou 180 segundos, definido de acordo com as vazões das fases.

Após o término da aquisição, são transferidos os dados que ficam armazenados na memória interna das câmeras para o disco rígido do computador. Depois disso, iniciam-se os ajustes das vazões das fases para o próximo ponto experimental.

De forma resumida, os principais passos para realização das medidas experimentais são:

1. Posicionar e ajustar os parâmetros de filmagem das câmeras;
2. Ligar os sensores de pressão e temperatura e o medidor de vazão;
3. Ligar o sistema supervisor;
4. Verificar o funcionamento dos medidores;
5. Ligar os sensores resistivos;
6. Fazer a calibração dos sensores resistivos;
7. Capturar imagem padrão na câmera;
8. Ajustar as vazões das fases e aguardar estabilização;
9. Iniciar a aquisição de dados;
10. Transferir os dados das câmeras para o computador;
11. Ajustar as vazões para o próximo ponto e repetir o processo.

3.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Nesta seção são descritos os métodos utilizados no processamento dos dados obtidos nos experimentos, apresentando-se as técnicas de extração dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas a partir dos sinais fornecidos pelos sensores resistivos e das imagens adquiridas pela câmera de alta taxa de aquisição.

3.4.1 Processamento dos Sinais Obtidos pelos Sensores Resistivos

O processamento dos sinais obtidos pelos sensores resistivos é realizado com um algoritmo desenvolvido por Vicencio (2013), que está implementado em MATLAB. Com esse algoritmo, são determinados os valores da frequência da célula unitária e da velocidade da bolha, além dos comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido e das frações de gás na região da bolha e do pistão.

Os sensores resistivos fornecem dados na forma de uma série temporal que representa a altura do líquido adimensional (h_L / D) na seção de testes, porém o

algoritmo está preparado para processar valores de fração de gás (R_G). Dessa forma, através de relações geométricas, chega-se a equação (19), que é utilizada para transformar os sinais de h_L/D fornecidos pelos sensores em R_G .

$$R_G = 1 - \frac{1}{\pi} \left[\arccos \left(1 - \frac{2h_L}{D} \right) - \left(1 - \frac{2h_L}{D} \right) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2h_L}{D} \right)^2} \right] \quad (19)$$

Um exemplo de série temporal de fração de gás, obtido para uma das configurações experimentais, é apresentado na Figura 16.

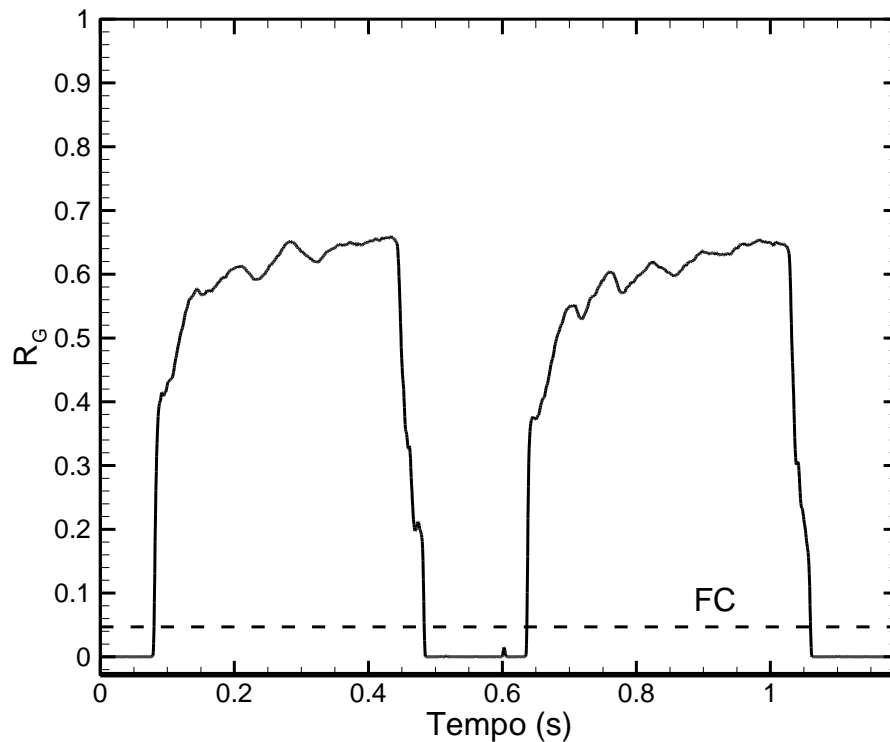


Figura 16 - Sinal de R_G

O processamento funciona inicialmente definindo-se uma linha de fator de corte (FC), como apresentado na Figura 16, que é usada para diferenciar as estruturas do escoamento. Todos os pontos que estão acima da linha pontilhada são considerados regiões de bolha alongada, enquanto os que estão abaixo são considerados regiões de pistão. Isso é feito através da utilização de uma função binária, análoga à função indicadora de fase proposta por Bertola (2003), como apresentado na equação (20).

$$u(R_G, t) = \begin{cases} 0; & \text{se } R_G < FC \\ 1; & \text{se } R_G > FC \end{cases} \quad (20)$$

Assim, os valores 0 representam os pistões e os valores 1 as bolhas alongadas. Os fatores de corte escolhidos estão sempre entre o máximo e o mínimo do sinal de fração de gás analisado, sendo definido um FC específico para cada série temporal, que depende das velocidades superficiais das fases e da aeração encontrada. Um exemplo de sinal binário obtido para um par de sensores resistivos é apresentado na Figura 17.

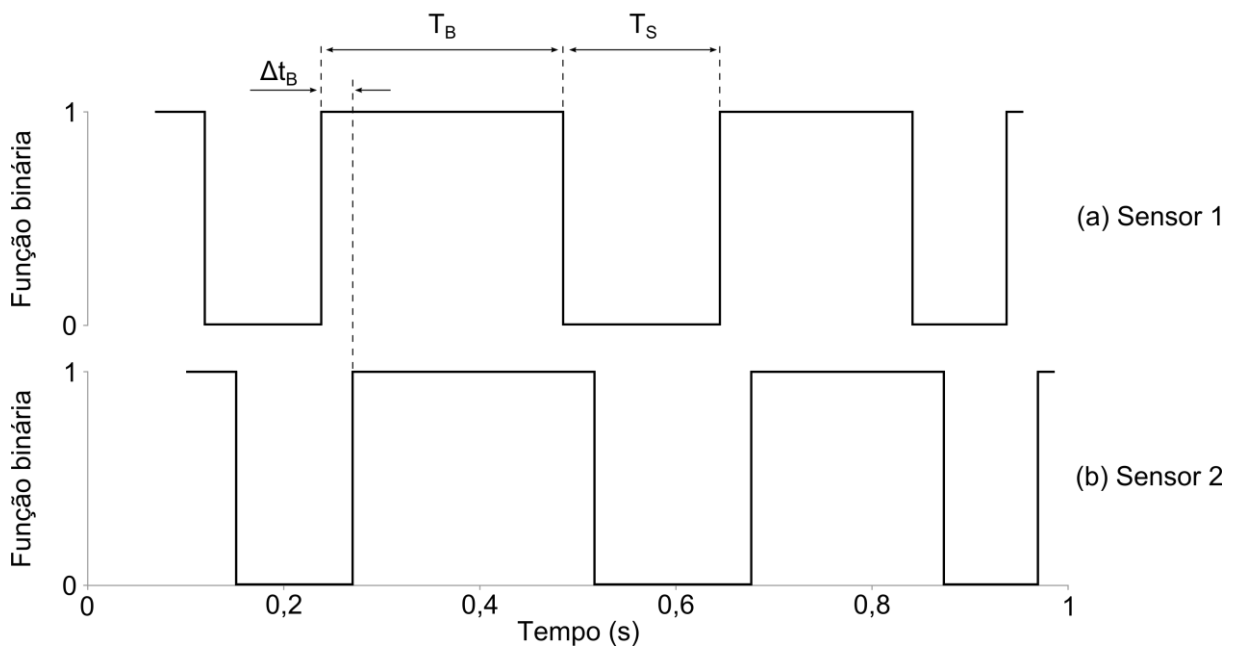


Figura 17 - Série temporal binarizada

Os valores de T_B e T_S , mostrados na Figura 17, representam, respectivamente, os períodos (em segundos) de passagem da bolha e do pistão pelo sensor. Esses períodos são calculados pela relação do número de dados adquiridos na região pela taxa de aquisição. Assim, a frequência da célula unitária, que é definida como o inverso do seu tempo de passagem por uma seção, é calculada pela seguinte relação:

$$f = \frac{1}{T_B + T_S}. \quad (21)$$

A utilização de um par de sensores resistivos em cada seção é feita para possibilitar o cálculo de velocidades. Dessa forma, sabendo-se que os sensores estão separados por uma distância d_s , com a defasagem do sinal que representa a frente da bolha nos dois sensores Δt_B , mostrada na Figura 17, calcula-se a velocidade da bolha alongada pela equação:

$$V_B = \frac{d_s}{\Delta t_B}. \quad (22)$$

Para determinar o comprimento das estruturas, é assumida a hipótese que toda a célula unitária escoar com a velocidade da frente da bolha (FABRE, 2003). Sendo assim, os comprimentos da bolha e do pistão são calculados pelas equações (23) e (24).

$$L_B = V_B T_B \quad (23)$$

$$L_S = V_B T_S \quad (24)$$

Adicionalmente, conhecendo-se as regiões que representam cada estrutura do escoamento, são definidas as frações de gás na bolha (R_{GB}) e no pistão (R_{GS}) como a média dos valores dos sinais em suas regiões equivalentes, como mostrado nas equações (25) e (26).

$$R_{GB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{G_i} \quad (25)$$

$$R_{GS} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{G_i} \quad (26)$$

Onde n é o número de aquisições durante a passagem da bolha e m o número de aquisições durante a passagem do pistão.

Ressalte-se que os cálculos de todas as variáveis, exceto a velocidade da bolha, são feitos com os sinais obtidos pelo primeiro sensor de cada par, buscando-se reduzir os efeitos da intrusão causados pelos filamentos do sensor resistivo.

3.4.2 Processamento das Imagens Obtidas Pela Câmera de Alta Velocidade

O processamento dos dados obtidos com a câmera é feito através de um algoritmo implementado em MATLAB, descrito detalhadamente em Amaral *et al.* (2013), cujo funcionamento consiste no tratamento das imagens, na detecção das posições referentes ao nariz de cada bolha e no cálculo de suas velocidades.

O objetivo do tratamento de imagens é transformar as imagens em escalas de cinzas, fornecidas pela câmera, em binárias, diferenciando as bolhas alongadas do restante do escoamento.

Para isso, a imagem que se deseja processar, exemplificada na Figura 18 (b), é comparada com um padrão (Figura 18 (a)), que representa o escoamento apenas de líquido na seção analisada. Então é criada uma nova imagem, com a mesma dimensão da que está sendo tratada, onde cada pixel assume 0 (preto) se a diferença entre a escala de cinza dos pixels correspondentes na imagem real e na padrão for maior que um valor predeterminado, e assume 1 (branco) se a diferença for menor ou igual. Como resultado desse processo, encontra-se uma imagem onde são destacadas as interfaces do gás com o líquido, como apresentado na Figura 18 (c).

Para distinguir a bolha alongada do restante do gás contido no escoamento, todos os objetos que não estão em contato com as fronteiras laterais ou superior da imagem são eliminados, enquanto os demais são preenchidos. Dessa forma, chega-se a imagem pretendida, em que a cor preta representa a bolha alongada e a cor branca o restante do escoamento (Figura 18 (d)). É possível que permaneçam pequenas bolhas dispersas na região superior ou lateral da imagem, porém elas não influenciarão na sequência do processamento.

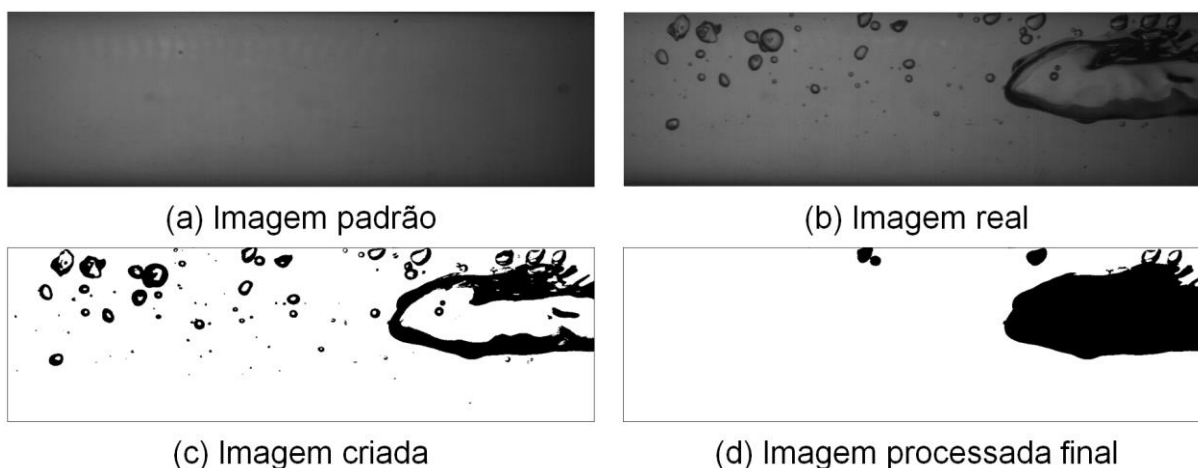


Figura 18 - Processamento de imagem

Com o tratamento finalizado, é necessário detectar a posição do nariz das bolhas. Em cada imagem, inicialmente é verificado se há a presença de uma bolha alongada, o que é feito através de sensores virtuais que medem altura de líquido próximo à extremidade direita da imagem. Posteriormente, caso seja encontrada uma bolha, a imagem é percorrida da direita para a esquerda, coluna por coluna, até que a diferença da altura de líquido de uma coluna com a anterior seja maior que um determinado valor, nesse ponto é considerado o nariz da bolha. Um esquema desse procedimento pode ser observado na Figura 19.

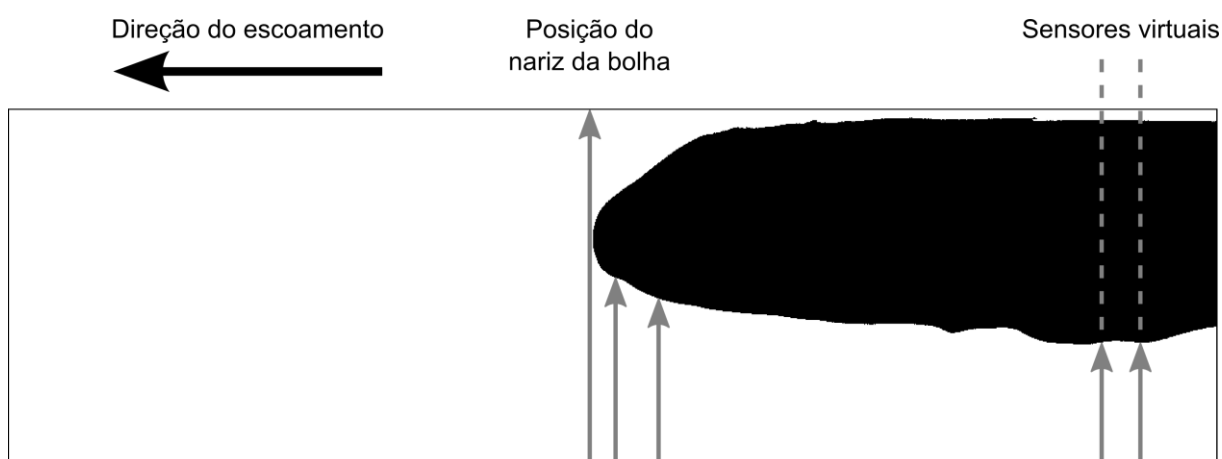


Figura 19 - Detecção da frente da bolha

Esse processo é repetido para todas as bolhas do escoamento, fornecendo a posição do seu nariz em cada imagem onde ele aparece.

Sabendo-se quais são as imagens e as posições onde é encontrado o nariz de cada bolha, o valor da velocidade da bolha alongada é calculado pela equação:

$$V_B = \frac{\Delta X_p}{\Delta Img} (T_p)(F_R), \quad (27)$$

onde ΔX_p é a diferença da posição em que está o nariz da bolha quando ela entra e quando ela sai do campo de visão da câmera (pixels), ΔImg é o número de imagens em que o nariz da bolha permanece no campo de visão (imagens), T_p é o tamanho de cada pixel (m/pixel) e F_R é a taxa de aquisição de imagens (imagens/s).

3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Buscando avaliar o comportamento do escoamento através dos dados obtidos nas medidas experimentais, é necessário analisar, além das médias e desvios, as distribuições desses dados. Para isso, são utilizadas funções densidade de probabilidade (PDFs) e diagramas de caixa (*box plot*).

A função densidade de probabilidade mostra a probabilidade que uma variável aleatória tem de assumir valores em uma determinada faixa. Uma função $f(x)$ é considerada uma PDF se satisfaz as seguintes propriedades:

$$f(x) \geq 0 \quad (28)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (29)$$

$$Pr(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx, \quad (30)$$

onde $Pr(a \leq X \leq b)$ representa a probabilidade da variável aleatória X assumir valores entre a e b .

Neste trabalho, para obter curvas suaves que representem as PDFs das variáveis medidas, é utilizada uma estimativa de densidade de *Kernel*, com uma função de *Kernel* normal.

O diagrama de caixa, introduzido por Tukey (1977), busca representar de maneira simples a distribuição dos dados através dos valores da mediana, do

primeiro e terceiro quartis (ou quartil inferior e superior, respectivamente) e dos valores extremos.

O diagrama baseia-se na construção de uma caixa, em que a base representa o primeiro quartil (Q_1) e o topo o terceiro (Q_3), com uma marcação central denotando a posição da mediana (M_d). Dessa forma, a caixa contém os 50% centrais dos valores observados. Segmentos de reta verticais, conhecidos como *whisker*, conectam a caixa aos valores máximos e mínimos que não são considerados pontos discrepantes (*outliers*), os quais são demarcados individualmente. Na Figura 20 é apresentado um exemplo de diagrama de caixa.

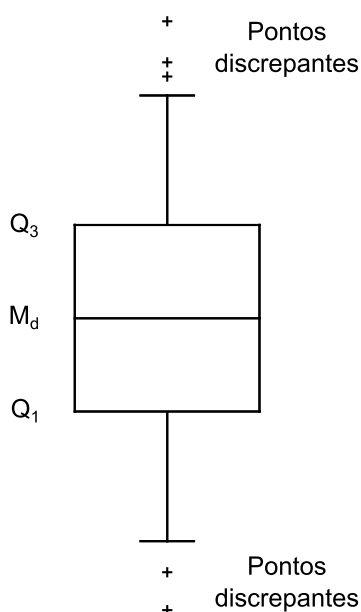


Figura 20 - Exemplo de um diagrama de caixa

Pode-se definir o que são pontos discrepantes através de diferentes critérios, sendo utilizado neste trabalho o proposto por Tukey (1977), em que pontos menores que $Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1)$ ou maiores que $Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1)$ são considerados *outliers*.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as análises dos resultados obtidos nos testes experimentais. Inicialmente é mostrada a grade de testes escolhida, em seguida são descritos os procedimentos para avaliar a repetitividade das medições e verificar, através da câmera de alta velocidade, os valores obtidos com os sensores resistivos. Posteriormente, são investigados os pontos onde ocorre a transição para escoamento estratificado na região descendente, avaliando os fenômenos envolvidos e apresentando uma maneira para prever as condições em que acontece essa transição. Por fim, é discutido o comportamento dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas para as condições em que não é observada a estratificação após a mudança de direção.

4.1 GRADE DE TESTES

Os pontos experimentais foram definidos de acordo com suas velocidades superficiais, respeitando as limitações da bancada, de forma que todos apresentassem o padrão de escoamento em golfadas na tubulação horizontal, enquanto no trecho descendente alguns apresentassem escoamento estratificado e outros em golfadas.

Foram escolhidas 45 combinações diferentes de velocidades superficiais de gás e líquido (chamadas de pontos), apresentadas na Tabela 1. Cada uma delas foi medida em uma tubulação completamente horizontal e em três tubulações com mudança de direção, totalizando 180 experimentos.

Na Figura 21, as combinações de velocidades superficiais escolhidas são mostradas no mapa de fluxo proposto por Taitel e Dukler (1976) para escoamentos horizontais e inclinados descendentes (para as inclinações de -3° , -5° e -7°).

Tabela 1 - Grade de testes

Ponto	J_G (m/s)	J_L (m/s)	Ponto	J_G (m/s)	J_L (m/s)	Ponto	J_G (m/s)	J_L (m/s)
P01	0,25	0,75	P16	1	2	P31	2	0,5
P02	0,25	1,25	P17	1	2,5	P32	2	1
P03	0,25	1,75	P18	1,25	0,75	P33	2	1,5
P04	0,25	2,25	P19	1,25	1,25	P34	2	2
P05	0,5	0,5	P20	1,25	1,75	P35	2,25	0,75
P06	0,5	1	P21	1,25	2,25	P36	2,25	1,25
P07	0,5	1,5	P22	1,5	0,5	P37	2,25	1,75
P08	0,5	2	P23	1,5	1	P38	2,5	0,5
P09	0,75	0,75	P24	1,5	1,5	P39	2,5	1
P10	0,75	1,25	P25	1,5	2	P40	2,5	1,5
P11	0,75	1,75	P26	1,5	2,5	P41	2,75	0,75
P12	0,75	2,25	P27	1,75	0,75	P42	2,75	1,25
P13	1	0,5	P28	1,75	1,25	P43	3	0,5
P14	1	1	P29	1,75	1,75	P44	3	1
P15	1	1,5	P30	1,75	2,25	P45	3,25	0,75

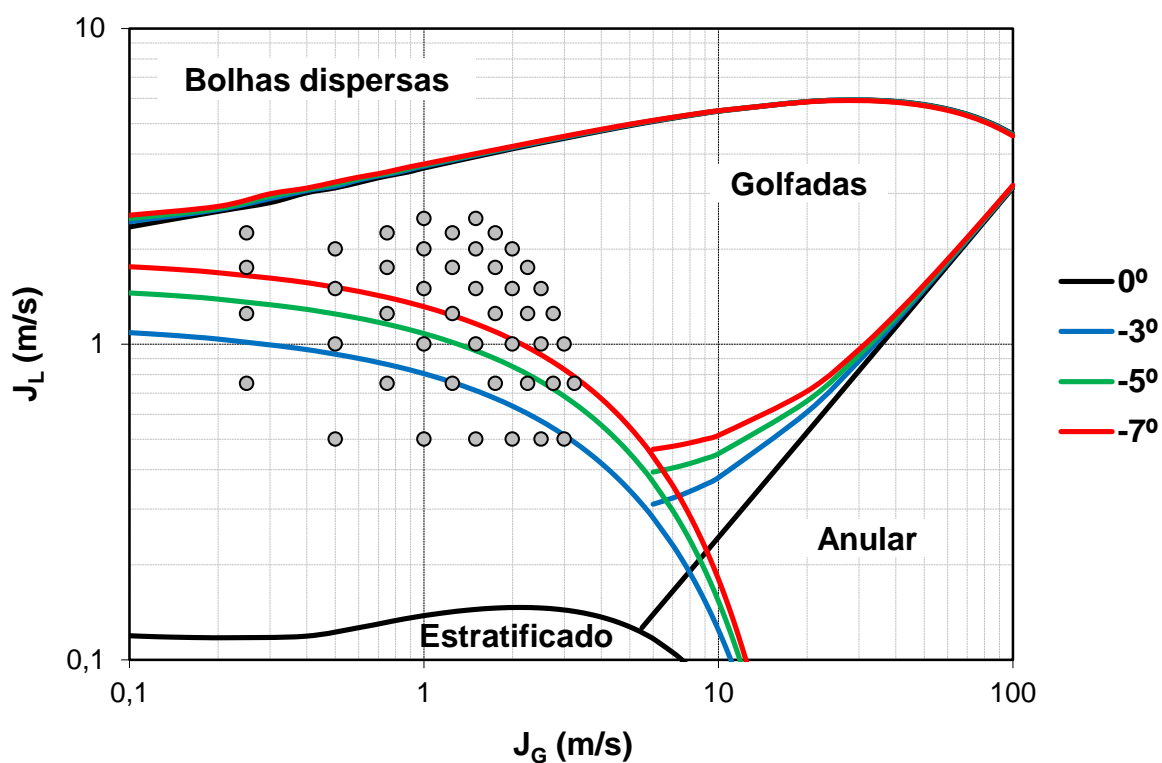


Figura 21 - Grade de testes representada no mapa de fluxo proposto por Taitel e Dukler (1976)

É importante ressaltar que as transições do padrão estratificado para golfadas apresentadas na Figura 21 são recomendadas para escoamento completamente descendente, pois não consideram os efeitos causados pela mudança de direção no escoamento em golfadas, como será discutido na seção 4.4.2. Porém, na definição da grade de testes, essas transições foram utilizadas como uma aproximação inicial para identificar as combinações de vazões onde ocorre o escoamento em golfadas ou estratificado na região descendente.

4.2 REPETITIVIDADE DAS MEDIÇÕES

Buscando-se avaliar a repetitividade das medidas experimentais, cada um dos pontos da grade de testes foi medido três vezes em datas diferentes.

Para comparar as três baterias de medição de cada ponto, foram analisados os sinais obtidos pelos sensores resistivos e os resultados do seu processamento.

Como os sensores resistivos fornecem dados de altura de líquido, que são transformados em fração de gás utilizando-se relações geométricas, a comparação dos sinais obtidos pelos sensores em cada bateria é feita através das funções densidade de probabilidade (PDF) das frações de gás do escoamento (R_G). Dessa forma, na Figura 22 são apresentadas as PDFs dos valores de R_G , para cada bateria, medidos na estação 4, para o ponto P24 e para as quatro inclinações testadas experimentalmente.

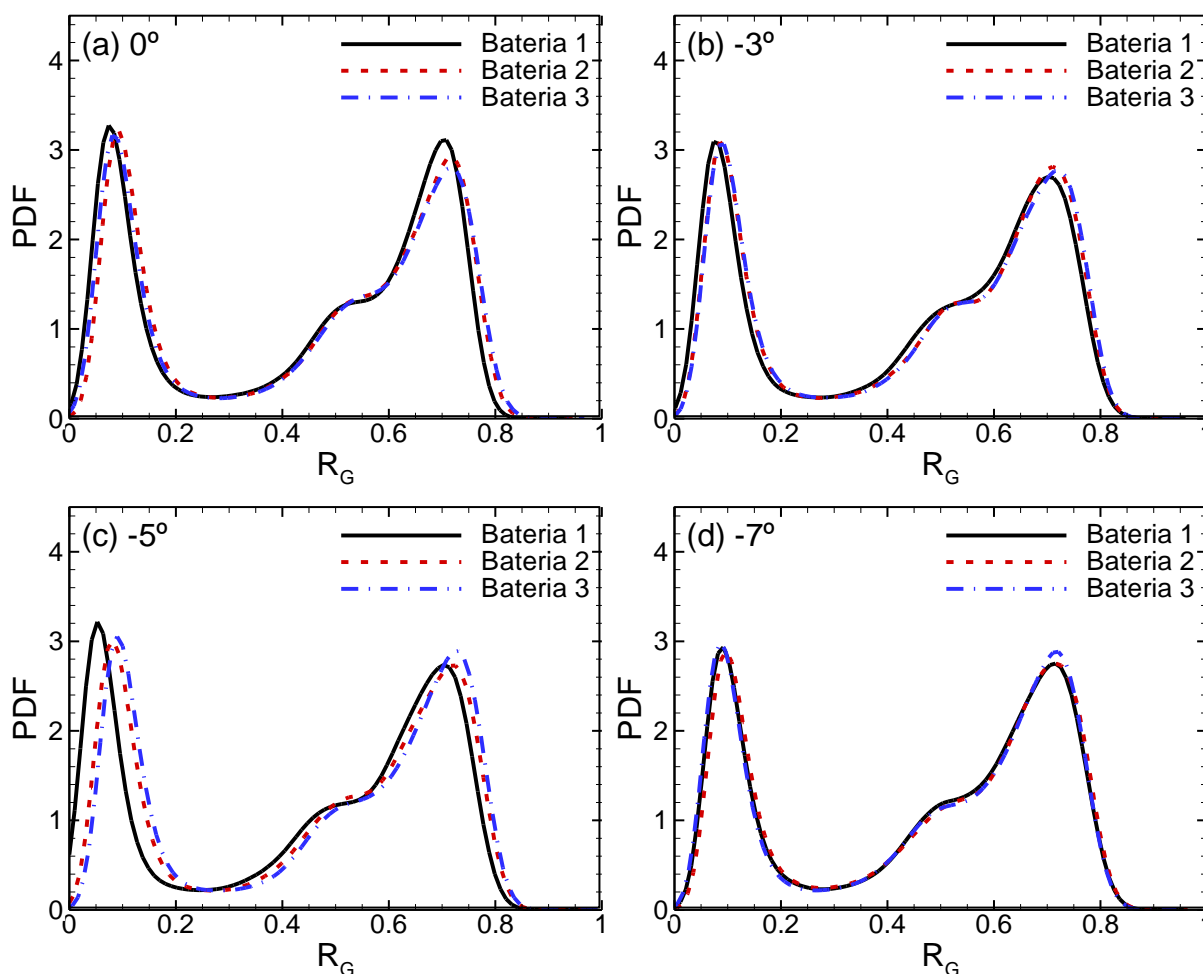


Figura 22 - PDFs dos valores de R_G do ponto P24 na estação 4 para as três baterias em cada inclinação

Observa-se na Figura 22 que, em todas as inclinações analisadas, os valores das PDFs de R_G das três medições são semelhantes, indicando que não há variações consideráveis nos sinais obtidos em cada bateria do mesmo ponto. Os demais experimentos mostraram um comportamento semelhante ao apresentado.

A avaliação da repetitividade do processamento de sinais é feita através da velocidade da bolha alongada, que, além de ser importante na caracterização do escoamento, é utilizada na determinação dos comprimentos da bolha e do pistão. As velocidades obtidas nos processamentos das três baterias são apresentadas em forma de diagramas de caixa, como mostrado na Figura 23, que representam os valores do ponto P24 na estação 4.

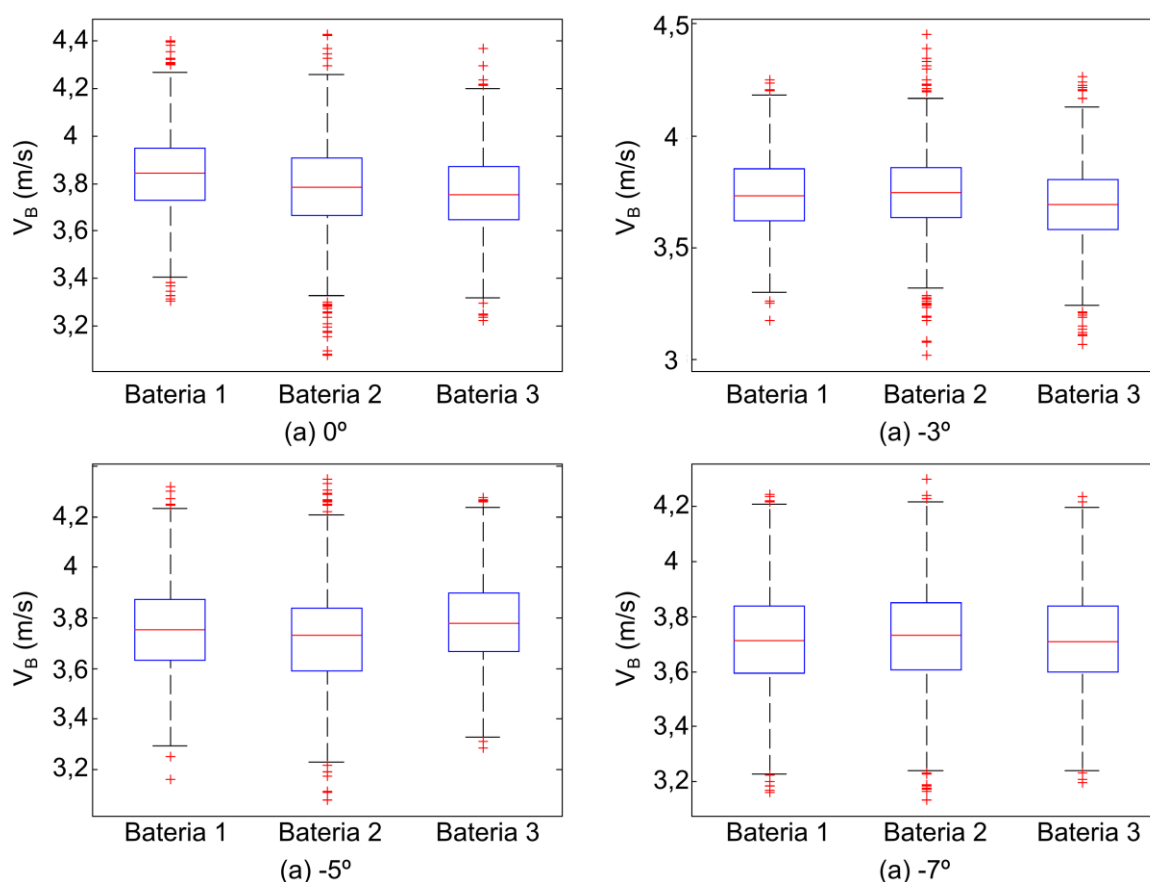


Figura 23 - Diagramas de caixa para V_B medido no ponto P24 na estação 4 para as três baterias em cada inclinação

Avaliando os diagramas apresentados na Figura 23, para todas as inclinações, encontra-se, comparando os resultados obtidos nas baterias 2 e 3 com a bateria 1, um erro médio de 0,9% e um erro máximo de 2,4% nas medianas, enquanto nos valores do 1º e 3º quartis o erro médio é 0,9% e o máximo 2,2%. Um comportamento análogo foi observado nos demais pontos, indicando que o processamento fornece resultados consistentes quando aplicado em sinais semelhantes.

Com os resultados mostrados, e sabendo-se que os demais pontos comportam-se de maneira similar, é possível afirmar que a utilização de apenas uma das três baterias pode fornecer resultados significativos do escoamento. Sendo assim, as análises apresentadas neste trabalho são realizadas considerando uma das medições para cada ponto.

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO RESISTIVO COM A CÂMERA

Buscando verificar a confiabilidade das medidas experimentais obtidas pelos sensores resistivos, é utilizada uma técnica de processamento de imagens capaz de extrair as velocidades das bolhas alongadas no escoamento (técnica descrita na seção 3.4.2).

São comparados os valores de velocidade da bolha obtidos pelo sensor resistivo localizado na estação 4 com os obtidos pelo processamento das imagens adquiridas logo após essa estação. Os resultados são mostrados na Figura 24.

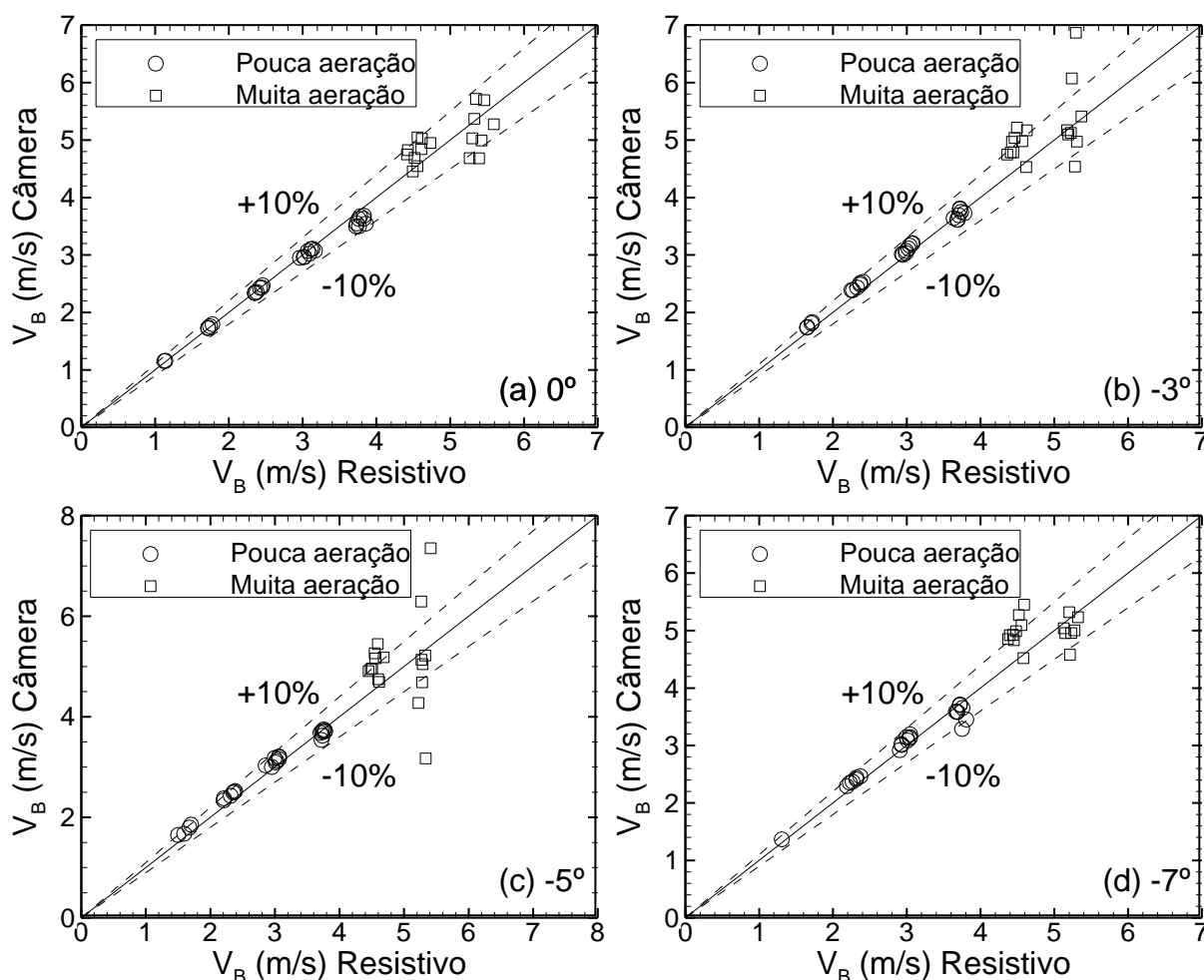


Figura 24 - Comparação dos resultados de V_B obtidos pela câmera com os obtidos pelo sensor resistivo posicionado na estação 4

Comparando os resultados do sensor resistivo com os obtidos pela câmera, encontra-se um erro médio de 5,7%, com um erro máximo chegando a 68, 2%.

Nota-se que a maioria dos pontos apresenta um erro inferior a 10%, sendo que discrepâncias maiores aparecem normalmente para as velocidades mais elevadas.

Avaliando as imagens adquiridas, constata-se que as maiores discrepâncias ocorrem em situações onde o escoamento apresenta uma forte aeração no pistão, dificultando a detecção visual da posição da frente da bolha e, conseqüentemente, fazendo com que o processamento de imagens não funcione corretamente.

Na Figura 25 é possível observar algumas situações em que, devido à aeração do pistão, o processamento de imagens fica comprometido pela dificuldade na identificação da posição da frente da bolha.

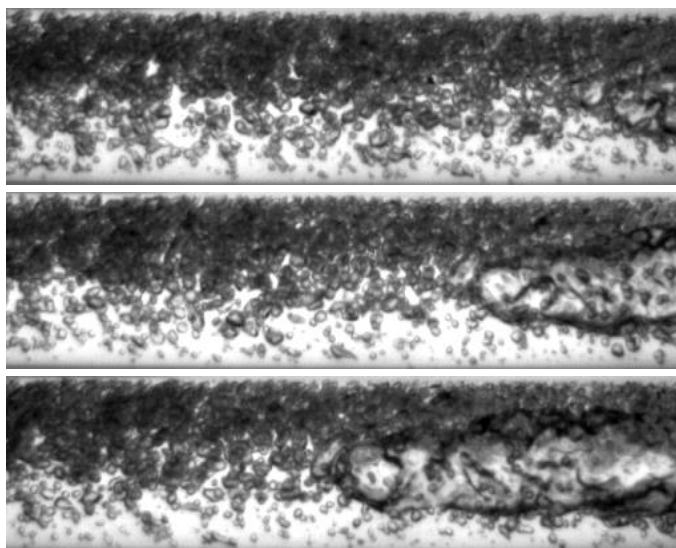


Figura 25 - Exemplo de imagens em que o processamento não funciona corretamente

Retirando da análise os pontos com muita aeração no pistão (destacados nos gráficos da Figura 24), situação em que o processamento de imagens fica comprometido, o erro médio passa a ser de 3,5% e o erro máximo de 14,0%, com apenas dois pontos apresentando erros superiores a 10%.

Dessa forma, considera-se que as medidas experimentais obtidas pelos sensores resistivos estão coerentes com as obtidas pela técnica de processamento de imagem.

4.4 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES EM QUE O ESCOAMENTO ESTRATIFICA

Foram avaliados, em cada um dos pontos, os sinais obtidos pelo sensor resistivo posicionado na estação 4, encontrando-se que nas condições de vazão e inclinação apresentadas na Tabela 2 ocorreu a transição do escoamento em golfadas para o padrão estratificado.

Tabela 2 - Pontos em que o escoamento estratifica na região descendente

Ponto	J_G (m/s)	J_L (m/s)	-3°	-5°	-7°
P01	0,25	0,75	X	X	X
P05	0,5	0,5	X	X	X
P06	0,5	1			X
P09	0,75	0,75			X

4.4.1 Mecanismo de Estratificação

Ao analisar todos os pontos em que o escoamento estratifica, constatou-se um comportamento comum nos sinais na estação 3, ou seja, na região descendente antes da estratificação. Esse comportamento é destacado na Figura 26, onde também são apresentados exemplos de sinais na estação 2 (região horizontal) e estação 4 (escoamento estratificado). Os dados mostrados na Figura 26 foram extraídos do ponto P05 e inclinação de -5°.

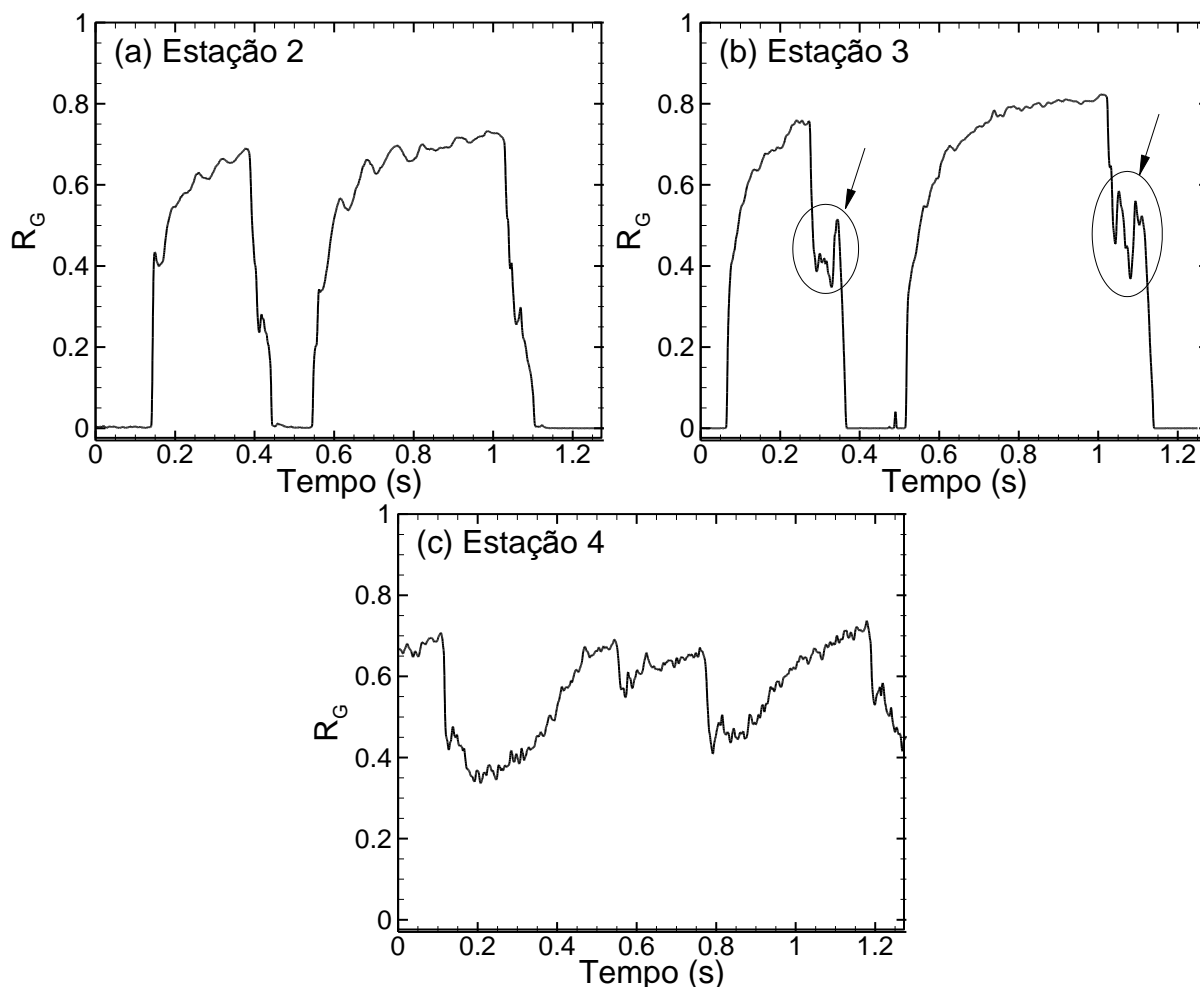


Figura 26 - Sinais de R_G obtidos no ponto P05 para -5°

Na Figura 26 (a) é possível observar uma amostra do sinal de fração de gás do escoamento em golfadas no trecho horizontal, enquanto na Figura 26 (c) observa-se uma amostra do sinal do escoamento estratificado ondulado na estação 4.

A Figura 26 (b) representa o sinal obtido na estação 3, onde é possível observar que o escoamento em golfadas ainda persiste, porém inicia-se o processo de aparecimento de uma cauda na bolha alongada, como pode ser visto na região em destaque na imagem. Ressalta-se que esse comportamento foi observado em todos os pontos onde ocorre a estratificação na estação 4.

Para possibilitar a visualização dessa cauda, na Figura 27 são apresentadas imagens da passagem da traseira de uma bolha pelo cotovelo (extraídas do ponto P05 com inclinação de -5°). São mostradas duas imagens antes da mudança de direção (Figura 27 (a) e (b)), onde pode ser visto o formato inicial da traseira da bolha, seguidas por três imagens após a passagem pelo cotovelo (Figura 27 (c), (d)

e (e)), em que pode ser observada a formação da cauda, assim como verificado nos sinais fornecidos pelo sensor resistivo.

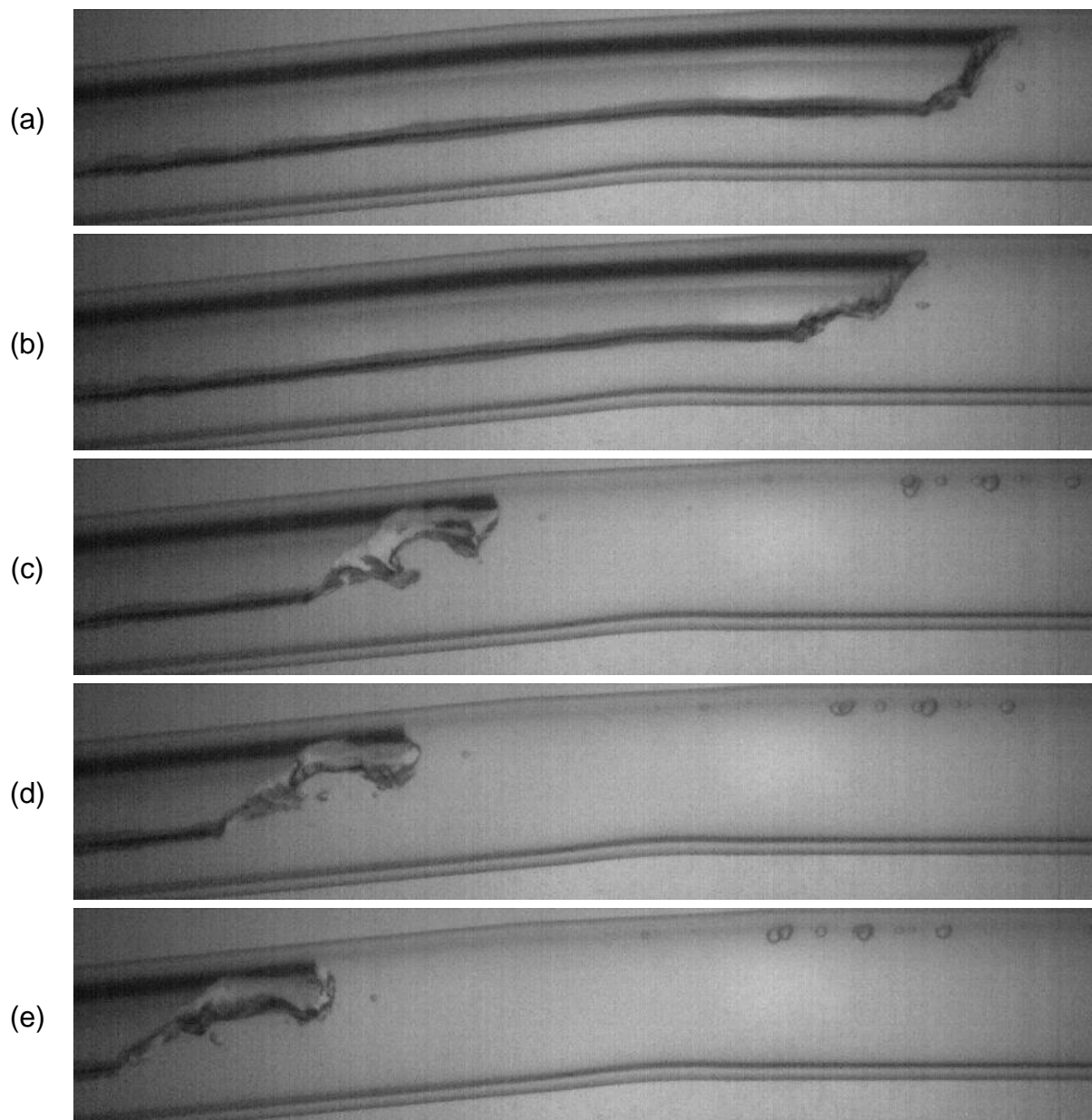


Figura 27 - Imagens com a traseira da bolha na região de mudança de direção

O aparecimento dessa cauda indica que, ao entrar na região descendente, o filme de líquido acelera e começa a escoar com velocidade superior à do pistão. Dessa forma, o pistão passa a ceder líquido para o filme à sua frente, fazendo com que a traseira da bolha penetre na região do pistão (formando inicialmente uma cauda) até que seja estabelecido o escoamento estratificado, como descrito na seção 2.3.2.

O mecanismo de estratificação no qual a ação da gravidade drena o líquido da região do cotovelo, também apresentado detalhadamente na seção 2.3.2, não foi observado nos dados experimentais, devido à configuração de tubulação adotada, com um trecho horizontal a montante da mudança de direção. Dessa forma, a gravidade age, tendendo a drenar a região do cotovelo, apenas na porção do filme que está no trecho descendente, o que não é suficiente para causar a estratificação por esse mecanismo.

4.4.2 Método para Previsão das Condições em que o escoamento Estratifica

Ao avaliar a quantidade de pontos que estratificaram (mostrados na Tabela 2), percebe-se uma diferença significativa com o previsto pelo mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976) para escoamento descendente, apresentado na Figura 21. Isso se deve ao fenômeno considerado pelos autores no cálculo da transição estratificado-golfadas, em que a entrada é tida como um escoamento estratificado, onde é aplicado o critério de instabilidade de Kelvin-Helmholtz para determinar quando o crescimento das ondas presentes no escoamento levará à transição para golfadas. Como nos experimentos realizados neste trabalho há um trecho horizontal antes do descendente, a entrada do escoamento na região descendente está no padrão golfadas, fazendo com que, para as condições avaliadas, a abordagem utilizada por Taitel e Dukler (1976) no cálculo da transição estratificado-golfadas não seja a mais adequada.

Para prever com maior exatidão as condições experimentais em que ocorre a transição do escoamento em golfadas para estratificado no trecho descendente deste trabalho, é avaliado o estudo de Taitel *et al.* (2000) sobre estabilidade de escoamento em golfadas descendentes.

Como citado previamente na seção 2.3.3, Taitel *et al.* (2000) avaliaram as equações da conservação de massa e quantidade de movimento aplicadas a um escoamento em golfadas, encontrando um modelo que funciona corretamente para configurações horizontais e ascendentes, porém, para configurações descendentes, há condições de escoamento em que a solução do sistema de equações encontrado não existe. Os autores destacam dois casos principais onde soluções fisicamente coerentes não são encontradas (chamados por eles de caso 1 e caso 2), e propõem

que nessas situações o escoamento em golfadas irá se dissipar e ocorrerá a transição para outro padrão.

No caso 1, o sistema de equações obtido pela conservação da massa e quantidade de movimento não tem solução, o que foi correlacionado pelos autores com o fato de o filme de líquido escoar com velocidade maior que a do pistão. No caso 2, há uma solução para o sistema de equações, porém o cálculo do comprimento do filme de líquido fornece um valor negativo, o que foi correlacionado com dois subcasos: o escoamento está no padrão bolhas dispersas ou o escoamento em golfadas dissipa-se na região descendente devido à passagem por um cotovelo superior.

Os autores apresentaram os resultados obtidos em um gráfico, como função das velocidades superficiais de líquido e gás, onde é possível observar uma semelhança entre as transições estratificado-golfadas e golfadas-bolhas dispersas previstas pelo método proposto (o critério da não existência de solução no modelo para escoamento em golfadas) com as previstas por um mapa de fluxo.

Embora não fosse o objetivo dos autores, a possibilidade de utilizar os modelos de dissipação do escoamento em golfadas para prever a transição estratificado-golfadas já havia sido discutida em alguns trabalhos anteriores (BENDIKSEN e ESPEDAL, 1992; BENDIKSEN *et al.*, 1996). Bendiksen *et al.* (1996) sugeriram que em trechos descendentes o padrão de escoamento depende das condições de entrada: quando a entrada é em escoamento estratificado, a transição para golfadas segue o critério de instabilidade de Kelvin-Helmholtz; quando a entrada é em golfadas, a transição para estratificado ocorre como resultado de um processo de dissipação das golfadas.

Dessa forma, como neste trabalho a entrada na região descendente está em golfadas, será utilizado o modelo de dissipação do escoamento em golfadas proposto por Taitel *et al.* (2000) para prever a transição para estratificado no trecho descendente. Como discutido anteriormente, nesse modelo as transições são obtidas considerando duas situações distintas (caso 1 e caso 2), porém o caso 2 não condiz com os experimentos realizados, pois não é de interesse a transição para bolhas dispersas e não há um cotovelo superior que leve a dissipação do escoamento em golfadas, tendo sido observado nos dados experimentais que a estratificação é causada pelo fato de o filme escoar com velocidade maior que a do pistão, o que corresponde ao caso 1.

Assim, a previsão da transição do escoamento em golfadas para estratificado nos pontos experimentais é feita apenas pelo caso 1 apresentado por Taitel *et al.* (2000). Na Figura 28 são mostradas as transições previstas para as inclinações utilizadas, juntamente com os pontos que estão na região de estratificação.

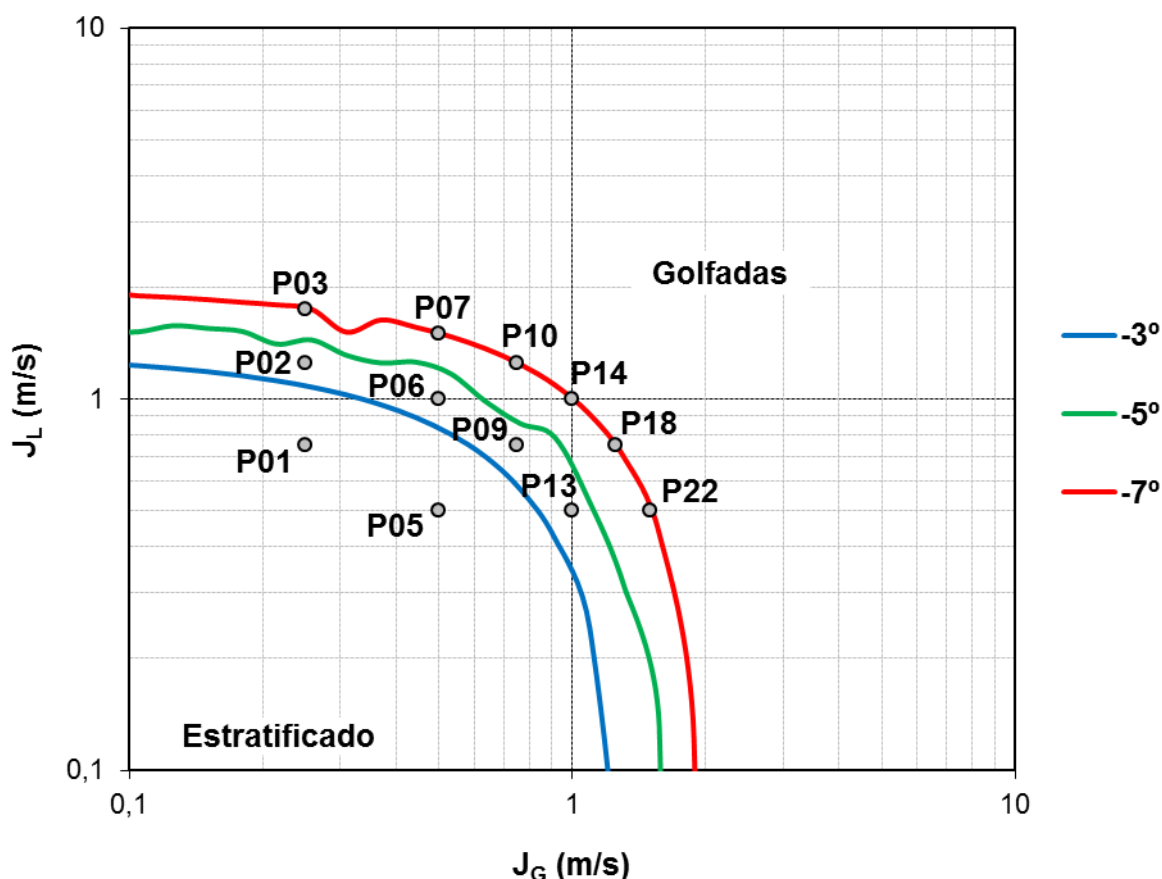


Figura 28 - Transições de golfadas para estratificado previstas pelo modelo apresentado em Taitel *et al.* (2000)

Observa-se na Figura 28 que todos os pontos onde foi observada a estratificação (P01 e P05 para -3° , -5° e -7° ; P06 e P09 para -7°) estão de fato nas regiões em que é previsto o escoamento estratificado, porém há alguns pontos, que mesmo estando nessas regiões, apresentaram escoamento em golfadas na estação 4 (P02, P06, P09 e P13 para -5° ; P02 e P13 para -7°), os quais são analisados a seguir. Inicialmente não são considerados os pontos que estão sobre a curva de transição para -7° (P03, P07, P10, P14, P18, P22).

Analisando o ponto P13 para -7° observou-se que na estação 4 o escoamento em golfadas persiste, porém nas imagens obtidas pela câmera de alta

velocidade posicionada após essa estação é identificado o escoamento estratificado. Assim, é possível afirmar que nas configurações experimentais desse ponto ocorre a estratificação, porém a distância percorrida entre a mudança de direção e a estação 4 não é suficiente.

Sabendo-se que logo após a última seção de testes o ponto P13 para -7° estratifica, são avaliados os comportamentos dos seus parâmetros característicos ao longo da tubulação, buscando-se relacioná-los com a tendência do escoamento a estratificar. Dessa forma, na Figura 29 são apresentadas as PDFs, para cada estação de medição, dos seguintes parâmetros: velocidade da bolha alongada (V_B), frequência (f), comprimentos da bolha alongada (L_B) e do pistão (L_S), além das frações de gás na bolha (R_{GB}) e no pistão (R_{GS}).

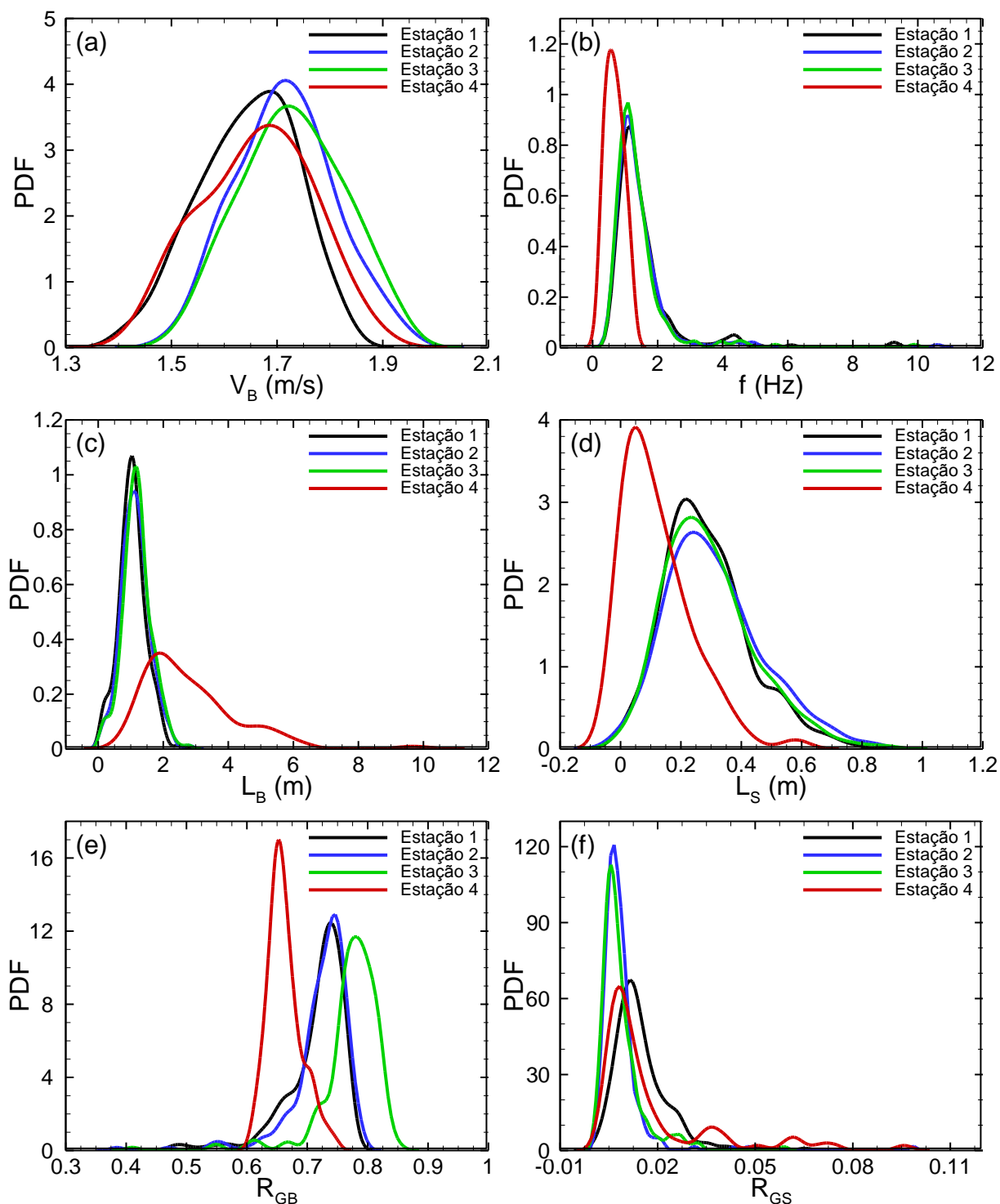


Figura 29 - PDFs dos parâmetros de escoamento medidos no ponto P13 para a inclinação -7°

As variações consideráveis nos parâmetros do ponto P13 para -7° , mostrados na Figura 29, são observadas na estação 4, onde o escoamento apresenta um desenvolvimento razoável na seção descendente e está próximo da região em que ocorre a estratificação. Dessa forma, nos parágrafos seguintes são

descritos os comportamentos dos parâmetros ao passar por essa estação de medição.

Na velocidade da bolha as variações não são muito acentuadas, mesmo assim é possível observar que a distribuição fica menos simétrica, com o aparecimento de uma maior quantidade de bolhas com velocidades mais baixas, aumentando a dispersão dos dados.

A frequência apresenta uma diminuição, indicando que há um elevado número de coalescência de bolhas alongadas. Além disso, não há mais frequências muito altas em relação à média, mostrando que as células unitárias menores desapareceram completamente nesse estágio de escoamento.

Os valores do comprimento da bolha alongada demonstram um considerável aumento, confirmando que, como verificado na análise da frequência, há um alto número de coalescências. Adicionalmente, é observado um aumento na dispersão e o aparecimento de valores bastante altos, indicando que o escoamento está próximo da transição para estratificado.

No comprimento do pistão de líquido observa-se uma diminuição, mostrando que os pistões que restaram no escoamento estão se dissipando, confirmando a tendência de estratificação.

A fração de gás na bolha diminui, indicando que, como não há variações representativas nos valores da fração de gás no pistão, o gás presente no escoamento se distribui de forma a ocupar uma menor seção transversal do tubo e, conseqüentemente, um maior comprimento na tubulação (pois não há variações apreciáveis de pressão). Esse comportamento é coerente com as observações de aumento no comprimento da bolha e diminuição no comprimento do pistão.

Seguindo as análises dos pontos que apresentam escoamento em golfadas mesmo estando na região onde, pelas transições apresentadas na Figura 28, é prevista a estratificação, avalia-se o ponto P02 com inclinação -5° . Na Figura 30 são mostradas as PDFs dos seus parâmetros característicos em cada uma das estações de medição.

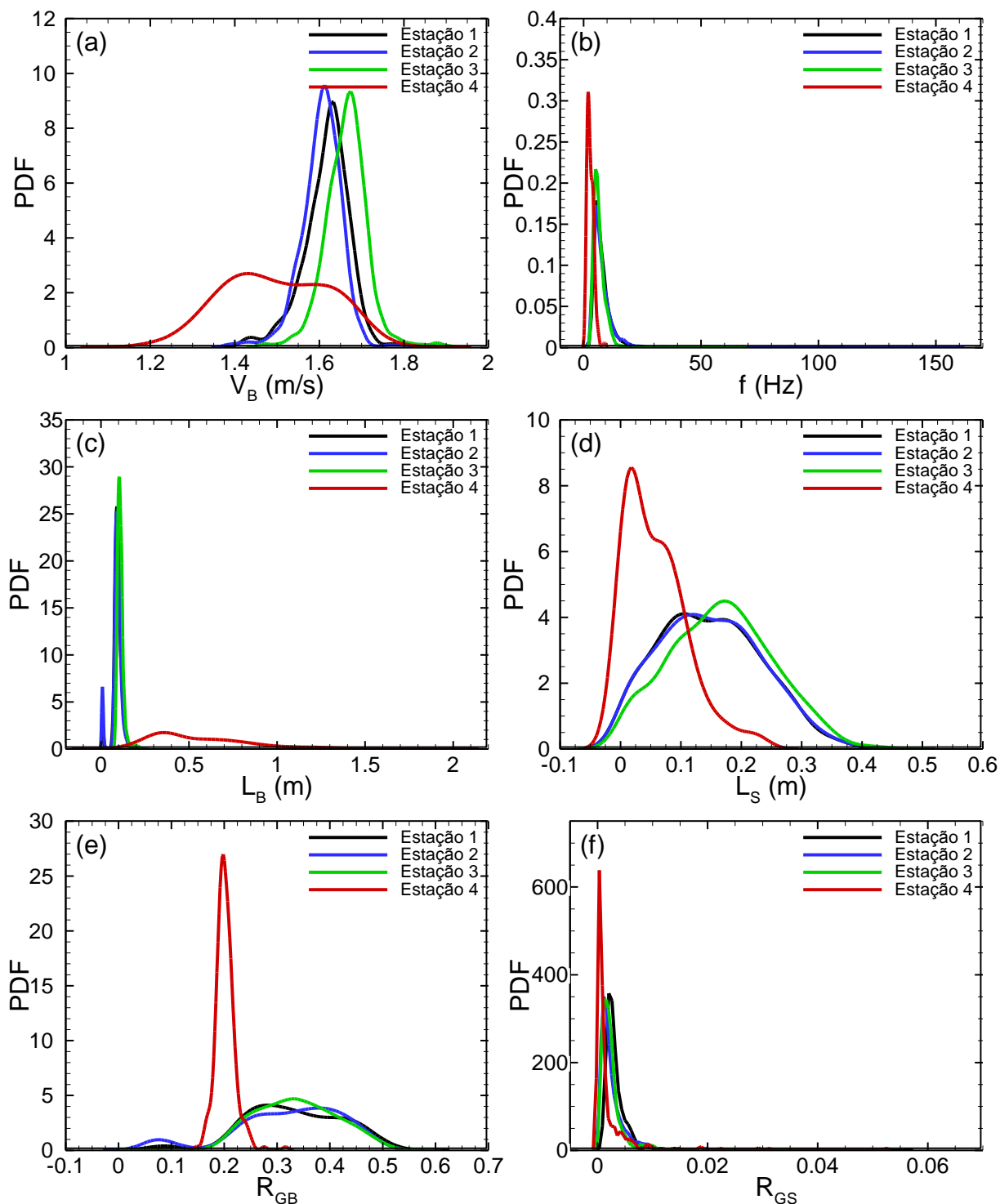


Figura 30 - PDFs dos parâmetros de escoamento medidos no ponto P02 para a inclinação -5°

Na Figura 30 é possível notar na estação 4 do ponto P02 para -5° o mesmo comportamento apresentado no P13 para -7° . Observa-se o aumento no comprimento da bolha e a diminuição nos valores de frequência, comprimento do pistão, fração de gás na bolha e velocidade da bolha (sendo que as variações na velocidade aparecem de forma ainda mais pronunciada que no ponto P13 para -7°).

Como na análise do ponto P13 para -7° foi possível relacionar diretamente esse comportamento das variáveis com a transição para estratificado na sequência do escoamento, é possível afirmar que no ponto P02 para -5° também ocorrerá a estratificação, porém é necessária uma maior distância de desenvolvimento na região descendente que a disponível neste trabalho.

Ao analisar os parâmetros característicos do escoamento para os demais pontos que estão na região onde é prevista estratificação (P06, P09 e P13 para -5° ; P02 para -7°), foi possível observar o mesmo comportamento. Dessa forma, pode-se afirmar que nesses pontos, assim como no P02 para -5° , ocorrerá a transição do escoamento em golfadas para estratificado após um maior comprimento de desenvolvimento. Para ilustrar os parâmetros obtidos nesses pontos, a Figura 31 mostra as PDFs, por estação de medição, do comprimento da bolha para cada um deles.

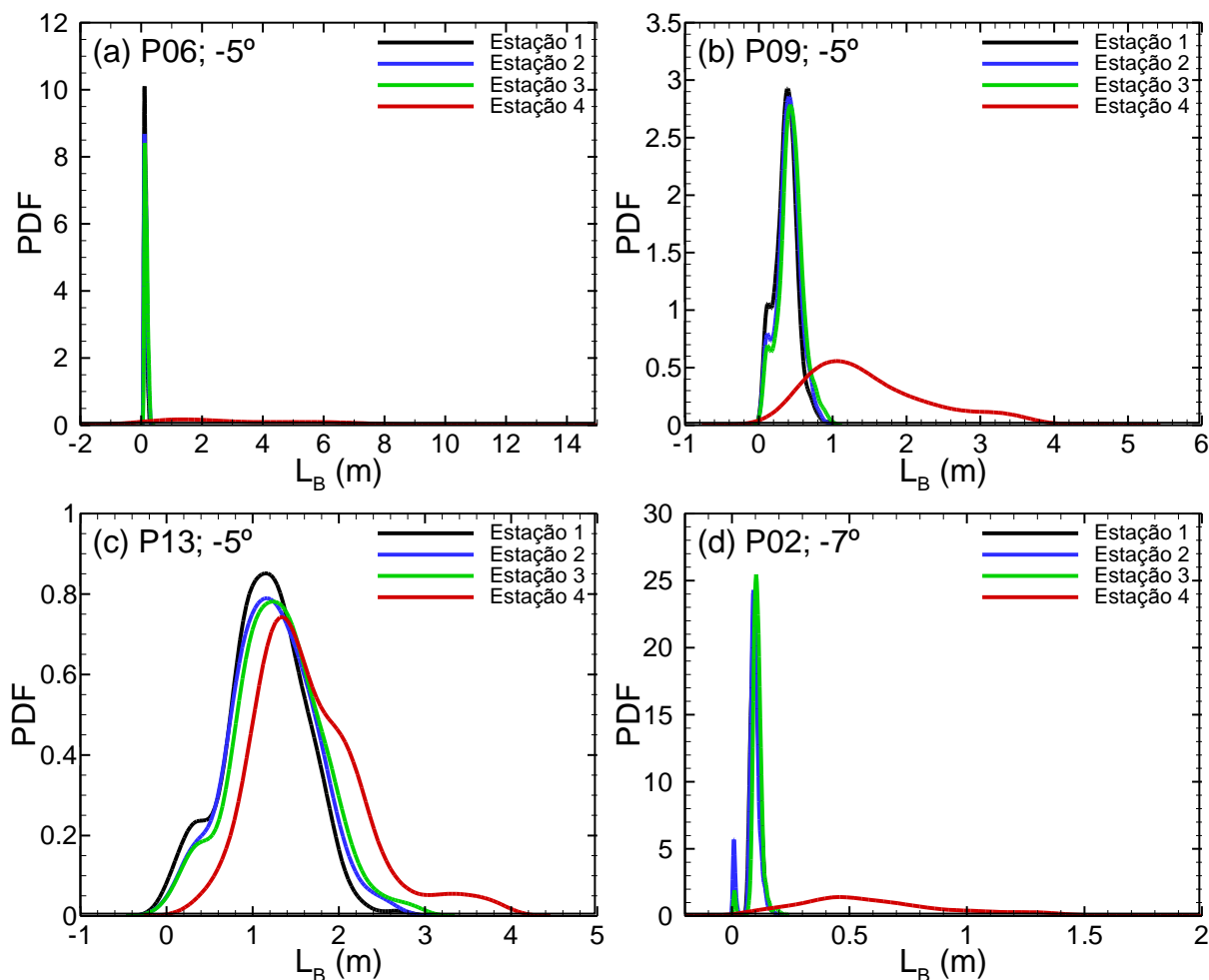


Figura 31 - PDFs dos comprimentos das bolhas nos pontos que tendem a estratificar

Após as análises realizadas, pode-se concluir que todos os pontos que estão na região onde é previsto escoamento estratificado de fato estratificam até a passagem pela estação 4, ou apresentam um comportamento indicando que irão estratificar para uma distância maior de desenvolvimento no trecho descendente.

Nos pontos que ficam na região onde é previsto que o escoamento em golfadas irá persistir, assim como esperado, não é observada a tendência de estratificação. Já nos pontos que ficam sobre a curva para -7°, por estarem em uma região de transição, é observado que alguns deles apresentam levemente o comportamento que indica a estratificação (P03, P07, P10) e outros não (P14, P18, P22).

Assim, fica comprovado que o método utilizado na previsão das transições de escoamento em golfadas para estratificado é válido para condições experimentais similares às utilizadas no presente trabalho.

4.5 ANÁLISE DOS PONTOS QUE NÃO ESTRATIFICAM

Nesta seção é descrito o comportamento observado nos pontos em que o escoamento em golfadas persiste na região descendente.

Para mostrar a influência da mudança de direção nas estruturas do escoamento, foi escolhido o ponto P04 ($J_G = 0,25$ e $J_L = 2,25$) com inclinação -7° . Na Figura 32 são apresentadas as PDFs dos parâmetros característicos medidos pelos sensores resistivos nas estações 1, 2 e 4.

Buscando facilitar a visualização do que ocorre na região descendente, as medidas adquiridas na estação 3 não são utilizadas nas análises, pois apresentam valores semelhantes aos da estação 2, devido à proximidade das estações.

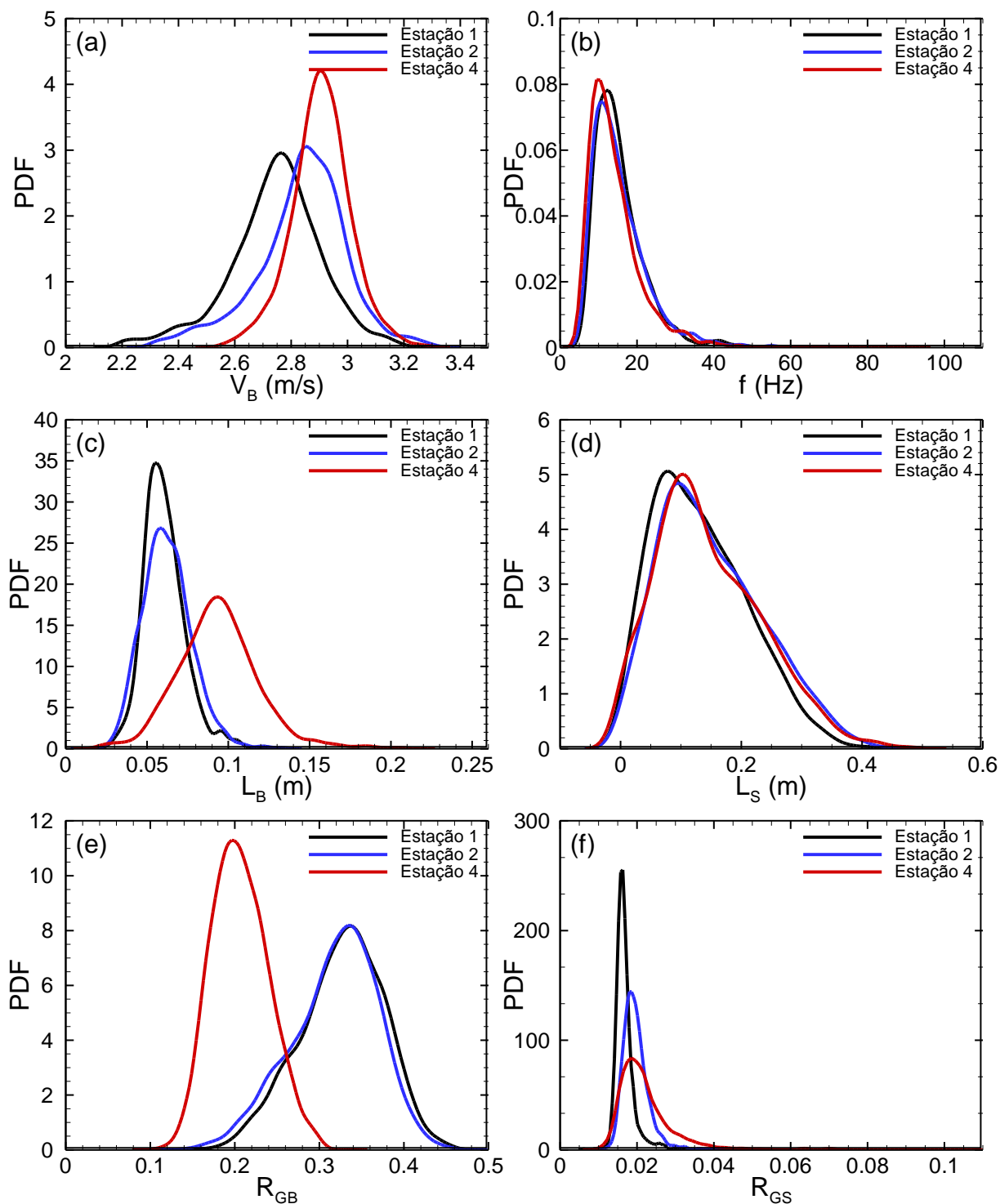


Figura 32 - PDFs dos parâmetros de escoamento medidos no ponto P04 para a inclinação -7°

É possível observar na Figura 32 que os valores de frequência e comprimento do pistão não são consideravelmente afetados pela mudança de direção, mantendo-se praticamente constantes nas estações 1, 2 e 4.

Na fração de gás do pistão ocorre um pequeno aumento tanto na média quanto na dispersão com o desenvolvimento do escoamento, indicando que há um

desprendimento de gás das bolhas alongadas, aumentando a aeração do pistão. Acredita-se que esse comportamento não seja causado pela mudança de direção, pois essa tendência pode ser observada também entre as estações 1 e 2, situadas no trecho horizontal.

A velocidade da bolha alongada aumenta com o desenvolvimento do escoamento no trecho horizontal e segue aumentando após a passagem pelo cotovelo, indicando que no trecho descendente os efeitos causados pela inércia e pelo arrasto estão superando os causados pelo empuxo na bolha, ao contrário do que se observou nos pontos que estratificam, onde ocorreu uma diminuição da velocidade.

O comprimento da bolha aumenta e sua fração de gás diminui, mostrando que o efeito gravitacional faz com que a quantidade de gás presente no escoamento distribua-se de maneira diferente na tubulação, mantendo-se o padrão golfadas, porém com bolhas alongadas com outro perfil.

Essas influências apresentadas devido à mudança de direção são mais pronunciadas quanto maior a inclinação na região descendente. Isso pode ser observado na Figura 33, em que são mostradas as PDFs dos parâmetros medidos na estação 4 em todas as inclinações para o ponto P04.

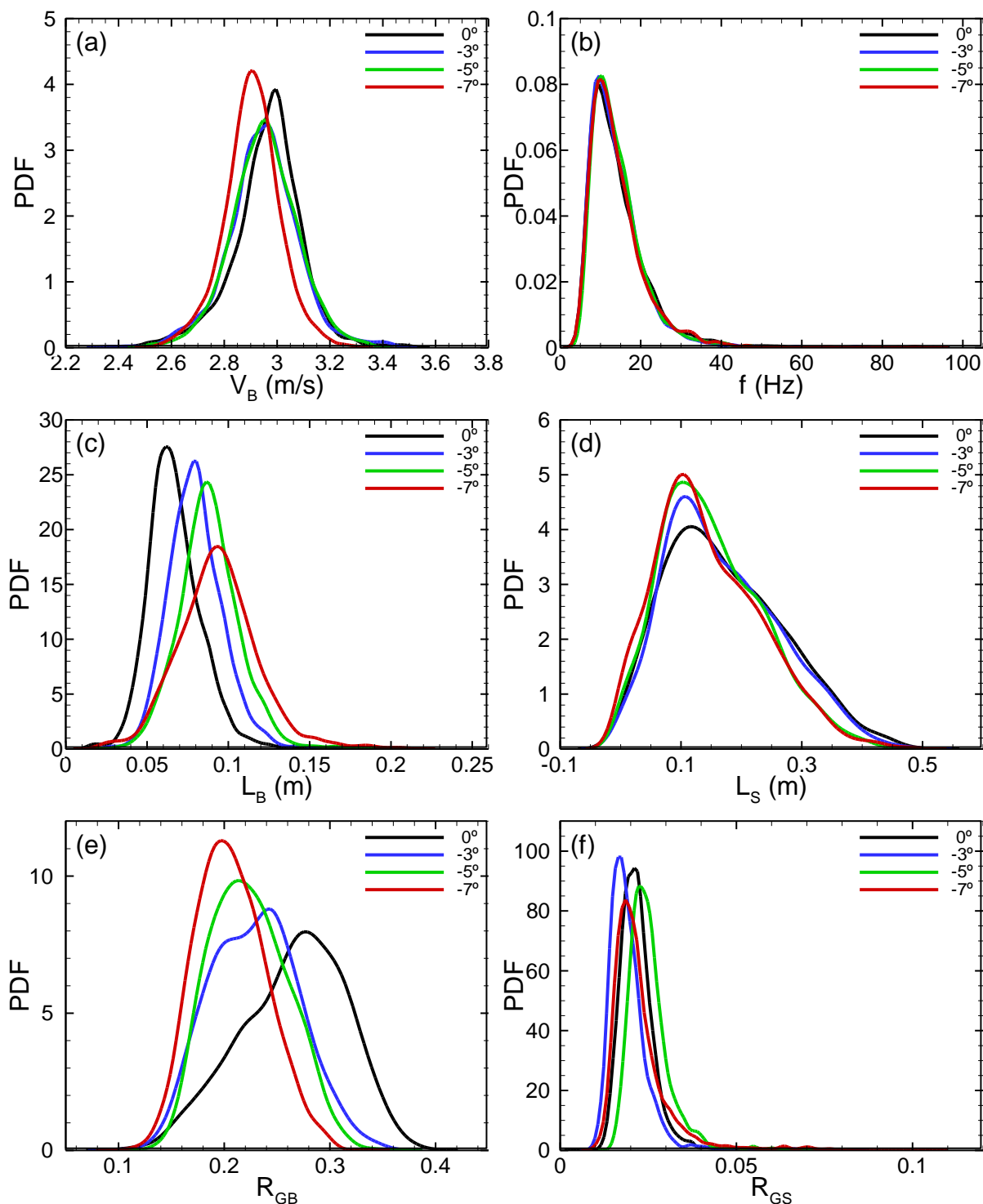


Figura 33 - PDFs dos parâmetros de escoamento medidos no ponto P04 na estação 4

Na Figura 33 é possível observar que os valores de frequência e comprimento do pistão sofrem pouca variação com o aumento da inclinação, reforçando que, como visto na Figura 32, esses parâmetros não são consideravelmente afetados pela mudança de direção.

O valor da fração de gás no pistão não demonstra uma tendência clara de variação com a inclinação, o que é coerente com o analisado através da Figura 32, onde as variações de R_{GS} não foram relacionadas diretamente com a mudança de direção.

A velocidade da bolha apresenta uma diminuição com o aumento da inclinação, pois o efeito do empuxo que atua de maneira a desacelerar a bolha alongada é mais acentuado quanto maior a inclinação.

Com o aumento da inclinação é possível observar um aumento no comprimento da bolha e uma diminuição em sua fração de gás, comprovando que o efeito gravitacional na bolha é maior quanto maior a inclinação analisada.

Ressalta-se que todas essas variações observadas são maiores nos pontos mais próximos às transições para estratificado, enquanto nos mais afastados tornam-se pouco perceptíveis, indicando que nesses pontos é necessário um maior comprimento de desenvolvimento no trecho descendente para que os parâmetros de escoamento sejam significativamente influenciados.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo experimental do escoamento bifásico de líquido-gás no padrão golfadas em um duto com leve mudança de direção, composto por um trecho de tubulação horizontal seguido por um trecho inclinado descendente. Os fluidos testados foram água e ar e as inclinações utilizadas na região descendente foram: -3° , -5° e -7° em relação à horizontal.

Sensores resistivos foram instalados em quatro seções da tubulação para extrair alguns parâmetros característicos do escoamento em golfadas. Adicionalmente, foram usadas duas câmeras de alta taxa de aquisição de imagens, uma posicionada na região de mudança de direção e outra logo após a última estação de medição.

Foram testadas experimentalmente, em cada uma das inclinações analisadas, 45 combinações de vazões de ar e água, definidas de forma que no trecho horizontal fosse encontrado escoamento em golfadas para todas as condições, enquanto no trecho descendente, em algumas situações fosse encontrado escoamento em golfadas e em outras estratificado.

Nas situações em que foi observado escoamento estratificado na última estação de medição, percebeu-se na região descendente, antes da estratificação, o aparecimento de uma cauda nas bolhas alongadas. Esse comportamento foi relacionado com o mecanismo que leva à estratificação, em que ao passar pelo cotovelo o filme de líquido acelera e começa a escoar com velocidade superior à do pistão, assim o pistão passa a ceder líquido para o filme a sua frente, fazendo com que a bolha penetre em sua região até que seja estabelecido o escoamento estratificado.

Notou-se uma diferença significativa ao comparar a quantidade de pontos medidos que estratificaram com o que é previsto pelo mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976) para escoamento descendente, indicando que o uso desse mapa não é ideal para a situação analisada. Isso é explicado pelo fenômeno considerado pelos autores para calcular a transição estratificado-golfadas, em que a entrada é um escoamento estratificado, onde aplicando-se o critério de instabilidade de Kelvin-Helmholtz para determinar quando o crescimento das ondas presentes no escoamento levará a transição para golfadas. Como nas condições avaliadas neste

trabalho a entrada do escoamento na região descendente é no padrão golfadas, a utilização dessa abordagem no cálculo da transição não é adequada.

Dessa forma, para prever as transições para escoamento estratificado no trecho descendente foi utilizado o modelo de dissipação do escoamento em golfadas proposto por Taitel *et al.* (2000), considerando apenas as situações coerentes com o mecanismo de estratificação observado experimentalmente. O método proposto apresentou bons resultados, demonstrando-se válido para às condições usadas neste trabalho.

Foram encontrados alguns pontos em que o escoamento em golfadas persiste na estação 4, porém com um maior comprimento de desenvolvimento ocorre a estratificação. Esses pontos foram identificados por um comportamento específico em seus parâmetros característicos, nos quais se observa na estação 4: o aumento no comprimento da bolha e a diminuição nos valores de frequência, comprimento do pistão, fração de gás na bolha e velocidade da bolha.

Nos pontos que não tendem a estratificar, no trecho descendente foi observado um aumento no comprimento e uma diminuição na fração de gás na bolha, enquanto os valores de frequência e comprimento do pistão não sofreram grandes influências. A velocidade da bolha seguiu aumentando, mesmo com a desaceleração causada após a passagem pelo cotovelo.

Em alguns dos pontos que não tendem a estratificar, essas variações nos parâmetros tornaram-se pouco perceptíveis, indicando que seria necessário um comprimento de desenvolvimento maior no trecho descendente para que houvesse variações significativas.

Em função dos resultados obtidos no presente trabalho, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes estudos:

1. Analisar o comportamento dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas com um maior comprimento de desenvolvimento na região descendente;
2. Avaliar o efeito causado por inclinações maiores que -7° na região descendente;
3. Verificar o comportamento do escoamento quando submetido a um trecho ascendente à montante do trecho descendente;

4. Analisar o efeito de diferentes fluidos e diâmetros nos parâmetros característicos e nas transições para outros padrões;
5. Avaliar os efeitos causados pelo misturador e pela saída no escoamento em golfadas.

REFERÊNCIAS

AL-SAFRAN, E. M.; JAYAWARDENA, S. S.; BRILL, J. P.; ZHANG, H.-Q.; REDUS, C. L. **An experimental study of two-phase flow in a hilly-terrain pipeline**. Petroleum Production Technology Symposium, New Orleans, 2000.

AL-SAFRAN, E.; SARICA, C.; ZHANG, H.-Q.; BRILL, J. **Investigation of slug flow characteristics in the valley of a hilly-terrain pipeline**. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 31, p. 337, 2005.

AL-SAFRAN, E. M.; TAITEL, Y.; BRILL, J. P. **Prediction of slug distribution along a hilly terrain pipeline using slug tracking model**. Journal of Energy Resources Technology, Vol. 126, p. 54, 2004.

AMARAL, C. E.; ALVES, R. F.; DA SILVA, M.; ARRUDA, L. V. R.; DORINI, L.; MORALES, R. E. M.; PIPA, D. R. **Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows**. Flow Measurement and Instrumentation, Vol 33, p. 257, 2013.

BENDIKSEN, K. H. **An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes**. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 10, p. 467-483, 1984.

BENDIKSEN, K. H.; ESPEDAL, M. **Onset of slugging in horizontal gas-liquid pipe flow**. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 18, p. 237-247, 1992.

BENDIKSEN, K.H.; MALNES, D.; NYDAL, O. J. **On the modeling of slug flow**. Chem. Eng. Comm, p. 71-142, 1996.

BERTOLA, V. **Experimental characterization of gas-liquid intermittent subregimes by phase density function measurements**. Experiments in fluids, Vol. 34, No. 1, p. 122-129, 2003.

CONTE, M. G.; BASSANI, C. L.; PEREA MEDINA, C.; SCORSIM, Ó. B.; AMARAL, C. E.; MORALES, R. E. **Numerical analysis of slug flow for slight changes of direction using slug tracking model**. Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), Ouro Preto, 2011.

DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. **A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes**. Ind. Eng. Chem., Fundam., Vol 14, p. 337, 1975.

FABRE, J. **Gas-Liquid Slug Flow**. Modelling and experimentation in two-phase flow, n. 450, p. 117, 2003

GREGORY, G. A.; SCOTT, D. S. **Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal concurrent gas-liquid slug flow**. AIChE Journal, Vol. 15, No. 6, pp. 833-835, 1969.

HENAU, V.; RAITHBY, G. D. **A transient two-fluid model for the simulation of slug flow in pipelines – I. Theory**. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 21, No. 3, pp. 335-349, 1995.

HEYWOOD, N.; RICHARDSON, J. F. **Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: Determination of liquid holdup by γ - ray absorption**. Chemical Engineering Science, Vol. 34, No. 1, pp.17-30, 1979.

LLANTOY PARRA, Víctor E. **Escoamento bifásico líquido-gás em golfadas com leve mudança de direção**. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MACHADO, Diogo; HILDEBRANDO, Felipe; LIPINSKI, Leonardo. **Sistema Multicanal de Sensores Resistivos para Medição de Escoamentos Bifásicos**. 2013. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MANDAL, T. K.; BHUYAN, M. K.; DAS, G.; DAS, P. **Effect of undulation on gas-liquid two-phase flow through a horizontal pipeline**. Chemical Engineering Research and Design, Vol. 86, No. 3, pp. 269-278, 2008.

MOISSIS, R; GRIFFITH, P. **Entrance Effects in a two-phase slug flow**. Journal of Heat Transfer, Vol. 84, No. 1, pp. 29-38, 1962.

NICHOLSON, K.; AZIZ, K.; GREGORY, G. A. **Intermittent two-phase flow in horizontal pipes: predictive models**. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 56, No. 6, pp. 653-663, 1978.

NICKLIN, D. J.; WILKES, M. A.; DAVIDSON, J. F. **Two-phase flow in vertical tubes**. Chemical Engineering Research and Design, Vol. 40, pp. 61-68, 1962.

RODRIGUES, Hendy T. **Simulação numérica do escoamento bifásico gás-líquido no padrão de golfadas utilizando um modelo lagrangeano de seguimento de pistões**. 2009. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - 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**. 1ª ed. Texas-USA: Society of Petroleum Engineers, 2006.

TAITEL, Y.; BARNEA, D. **Two-phase slug flow**. Advances in Heat Transfer, Vol. 20, pp. 83-132, 1990.

TAITEL, Y.; BARNEA, D. **Effect of gas compressibility on a slug tracking model**. Chemical Engineering Science, Vol. 53, No. 11, pp. 2089-2097, 1998

TAITEL, Y.; BARNEA, D. **Slug-tracking model for hilly terrain pipelines**. SPE Journal, Vol. 5, No. 1, pp. 102-109, 2000.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. **A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow**. AIChE Journal, Wiley Online Library, Vol. 22, No. 1, p. 47-55, 1976.

TAITEL, Y.; SARICA, C.; BRILL, J. P. **Slug flow modeling for downward inclined pipe flow: theoretical considerations**. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 26, No. 5, pp. 833-844, 2000.

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

TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis**. Reading, Ma, Vol. 231, p. 32, 1977.

VICENCIO, F. E. C. **Caracterização experimental do escoamento intermitente líquido-gás em tubulações horizontais**. 2013. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da Teoria de Erros**. 2ª ed. Editora Edgard Blucher, 1996.

WALLIS, G. B. **One dimensional-two-phase flow**. New York: McGraw-Hil, 1969.

WEBER, M. E. **Drift in intermittent two-phase flow in horizontal pipes**. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Wiley Online Library, Vol. 59, No. 3, p. 398–399, 1981.

ZHENG, G.; BRILL, J. P.; TAITEL, Y. **Slug flow behavior in a hilly terrain pipeline**. International Journal Multiphase Flow, Vol. 20, No. 1, pp. 63-79, 1994.

ZHENG, G.; BRILL, J. P.; SHOHAM, O. **An Experimental Study of two-phase slug flow in hilly terrain pipelines**. SPE Production & Facilities, Vol. 10, No. 4, pp. 233-240, 1995.

APÊNDICE A – MEDIÇÃO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS

Para calcular as velocidades superficiais nas seções de testes é necessário conhecer, além do diâmetro do tubo, as vazões volumétricas das fases. A vazão de líquido é fornecida diretamente por um medidor do tipo Coriolis, enquanto a vazão de gás é medida por uma placa de orifício, que precisa ser previamente calibrada. Portanto, neste apêndice é inicialmente descrito o processo de calibração da placa de orifício e, em seguida, são apresentados os cálculos das velocidades superficiais.

CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

A calibração da placa de orifício é feita utilizando-se rotômetros da marca Rheotest Haake como padrão. Os rotômetros são graduados em uma escala de 0 a 100 e possuem fichas de calibração que relacionam a posição do flutuador nessa escala com a vazão volumétrica do gás.

Devido à compressibilidade do gás, essas fichas são válidas apenas para as condições de temperatura e pressão em que foi feita a calibração ($T_{cal} = 20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{cal} = 101,325\text{ kPa}$). Dessa forma, para obter a vazão volumétrica em condições diferentes, é necessário aplicar uma correção, da forma:

$$\dot{Q}_{Rot} = \dot{Q}_{cal} \sqrt{\frac{P_{cal} T_{Rot}}{P_{Rot} T_{cal}}}, \quad (\text{A1})$$

onde \dot{Q}_{cal} e \dot{Q}_{Rot} representam, respectivamente, as vazões volumétricas do gás nas condições de calibração e em que são realizadas as medições. Os valores de P_{Rot} e T_{Rot} denotam a pressão e temperatura nas condições de medição.

A vazão volumétrica na placa de orifício (\dot{Q}_{PO}) pode ser calculada, de acordo com a norma ISO 5167, pela equação (A2).

$$\dot{Q}_{PO} = C_d \varepsilon \frac{A_{orif}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{G_{PO}}}} \quad (\text{A2})$$

Onde C_d é o coeficiente de descarga do medidor, ε é o fator de expansão do gás, A_{orif} é a área do orifício, β é a razão entre o diâmetro do orifício e do tubo em que a placa está inserida, ΔP é a diferença de pressão medida na placa e ρ_{GPO} é a massa específica do gás na pressão de testes.

Percebeu-se que o produto entre o coeficiente de descarga e o fator de expansão pode ser expresso como uma função do número de Reynolds e da relação entre a queda de pressão na placa e a pressão de teste, ou seja:

$$C_d \varepsilon = f \left(\text{Re}, \frac{\Delta P}{P_{PO}} \right). \quad (\text{A3})$$

Portanto, o processo de calibração consiste em determinar uma equação, função de Re e $\Delta P / P_{PO}$, para o valor de $C_d \varepsilon$. Para isso, rearranja-se a equação (A2), chegando-se a:

$$C_d \varepsilon = \frac{\dot{Q}_{PO}}{\frac{A_{orif}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\rho_{GPO} 2\Delta P}}. \quad (\text{A4})$$

Foi montada uma bancada em que o ar pressurizado passa pela placa de orifício, por uma válvula e posteriormente pelo rotâmetro. Dessa forma, a vazão mássica na placa de orifício é a mesma que no rotâmetro ($\dot{Q}_{PO} \rho_{GPO} = \dot{Q}_{Rot} \rho_{G_{Rot}}$), e a equação (A4) pode ser escrita como:

$$C_d \varepsilon = \dot{Q}_{Rot} \frac{\rho_{G_{Rot}}}{\rho_{GPO}} \frac{\sqrt{1-\beta^4}}{A_{orif}} \sqrt{\frac{\rho_{GPO}}{2\Delta P}}. \quad (\text{A5})$$

Então a placa de orifício é submetida a diferentes pressões e vazões de ar, e para cada condição é calculado $C_d \varepsilon$ pela equação (A5), além de Re e $\Delta P / P_{PO}$. Com esses valores é proposta uma função polinomial, de segundo grau para $\text{Re}^{-0,5}$ e de terceiro grau para $\Delta P / P_{PO}$, que se ajusta aos dados de $C_d \varepsilon$.

Aplicando os valores calculados de $C_d \varepsilon$ na equação (A2) determina-se a vazão volumétrica de gás na placa de orifício através das medidas de pressão, não sendo mais necessário o uso dos rotâmetros.

Ao final do processo, comparando-se os valores de vazão volumétrica calculados com os efetivamente medidos encontrou-se um erro máximo de 2,9 %.

CÁLCULO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS NAS SEÇÕES DE TESTES

As velocidades superficiais do líquido (J_L) e do gás (J_G) nas seções de testes são definidas pelas equações (A6) e (A7).

$$J_L = \frac{\dot{Q}_{LST}}{A} \quad (A6)$$

$$J_G = \frac{\dot{Q}_{GST}}{A} \quad (A7)$$

Em que A é a área do tubo, \dot{Q}_{LST} e \dot{Q}_{GST} são as vazões volumétricas de líquido e gás, respectivamente, nas seções de testes.

Considerando o escoamento isotérmico e o líquido incompressível, a vazão volumétrica do líquido na seção de testes é igual à fornecida pelo instrumento, assim sua velocidade superficial é calculada diretamente pela equação (A6).

Na fase gasosa, devido à sua compressibilidade, a vazão volumétrica em duas seções do escoamento com pressões diferentes não é a mesma. Porém, pela conservação da massa, sabe-se que a vazão mássica de gás na placa de orifício é igual à vazão mássica na seção de testes. Dessa forma, tem-se que:

$$\rho_{GPO} \dot{Q}_{GPO} = \rho_{GST} \dot{Q}_{GST}, \quad (A8)$$

onde ρ_{GPO} e ρ_{GST} são respectivamente as massas específicas do gás na placa de orifício e na seção de testes, \dot{Q}_{GPO} e \dot{Q}_{GST} são as vazões volumétricas nas mesmas regiões. Isolando-se o valor de \dot{Q}_{GST} na equação (A8) e substituindo na equação (A7) chega-se a equação (A9).

$$J_G = \frac{\rho_{GPO}}{\rho_{GST}} \frac{\dot{Q}_{GPO}}{A} \quad (A9)$$

Considerando que o ar se comporta como um gás ideal, sua massa específica pode ser escrita como:

$$\rho_G = \frac{P}{RT}, \quad (\text{A10})$$

onde R é a constante do gás, que no caso do ar vale 287 J/(kg.K).

Como o escoamento é considerado isotérmico, substituindo as massas específicas da equação (A9) pelo apresentado na equação (A10), chega-se a equação (A11), que é utilizada na medição da velocidade superficial do gás nas seções de testes.

$$J_G = \frac{P_{PO}}{P_{ST}} \frac{\dot{Q}_{GPO}}{A} \quad (\text{A11})$$

Com P_{PO} e P_{ST} representando as pressões na placa de orifício e seção de testes.

APÊNDICE B – ANÁLISES DE INCERTEZAS

Neste apêndice é realizada uma análise das incertezas contidas no circuito experimental, visando avaliar a incerteza das medidas obtidas para as velocidades superficiais do líquido (J_L) e do gás (J_G), além da fração de gás (R_G). Essa análise é baseada no descrito por Vuolo (1996).

Incerteza pode ser definida como a indicação de quanto o valor medido pode diferir do valor verdadeiro do mensurando, em termos de probabilidades. Sua especificação em um resultado pode ser feita de diferentes maneiras, sendo as mais usuais: incerteza padrão (σ), incerteza expandida com confiança P ($k\sigma$) e limite de erro (L).

A incerteza padrão pode ser definida como o desvio padrão da distribuição de erros, a incerteza expandida com confiança P é um múltiplo da incerteza padrão e o limite de erro é o valor máximo admissível para o erro.

A interpretação dessas incertezas é baseada no conceito de intervalo de confiança. Portanto, define-se a confiança P de uma afirmativa como a probabilidade P de que essa afirmativa esteja correta. Assim, assumindo uma distribuição gaussiana para os erros, pode-se afirmar que o erro de uma medida em relação ao valor verdadeiro está no intervalo $(-\sigma, \sigma)$ com confiança $P = 68,27\%$, comparativamente, utilizando-se uma incerteza expandida com 3σ tem-se uma confiança $P = 99,73\%$.

O objetivo da análise realizada neste apêndice é determinar a incerteza padrão das medidas experimentais, sendo apresentados também os valores para uma incerteza expandida com confiança $P = 99,73\%$ (3σ).

PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

Uma grandeza R função de outras grandezas x_1, x_2, \dots, x_n pode ser expressa por $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Admitindo-se x_1, x_2, \dots, x_n como grandezas experimentais, com $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ sendo suas incertezas padrões correspondentes, consideradas independentes entre si, a incerteza padrão em R (σ_R) pode ser estimada pela equação (B1).

$$\sigma_R^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_n^2 \quad (\text{B1})$$

ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS DAS VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS

Os resultados são apresentados na forma de incerteza padrão relativa (ε), que é calculada pela divisão da incerteza padrão pelo valor da medida, como mostrado na equação (B2):

$$\varepsilon = \frac{\sigma_R}{R}. \quad (\text{B2})$$

Para efetuar o cálculo da propagação de incerteza para as variáveis de interesse, inicialmente é necessário definir quais são as incertezas no diâmetro, na altura de líquido adimensional e nos instrumentos de medição de vazão e pressão. Os valores utilizados são apresentados na Tabela B1.

Tabela B1 – Incertezas padrões relativas nos instrumentos utilizados	
Mensurando	Incerteza padrão relativa (ε)
Diâmetro do tubo (D)	$\pm 0,10\%$
Vazão volumétrica de líquido (\dot{Q}_L)	$\pm 0,10\%$
Pressão na placa de orifício (P_{PO})	$\pm 0,40\%$
Pressão na seção de testes (P_{ST})	$\pm 0,40\%$
Vazão volumétrica de gás na placa (\dot{Q}_{GPO})	$\pm 2,2\%$
Altura de líquido adimensional (h_L / D)	$\pm 2,4\%$

O diâmetro do tubo foi medido com um paquímetro, com resolução de 0,05 mm. De acordo com Vuolo (1996), é comum utilizar a incerteza padrão como a

metade da menor escala de divisão do instrumento, nesse caso $\sigma = 0,025$. Para obter a incerteza padrão relativa esse valor é dividido pelo diâmetro medido.

As incertezas padrões relativas nos valores da vazão volumétrica do líquido e nos medidores de pressão são obtidas nos certificados de calibração fornecidos pelas fabricantes.

Para avaliar a vazão na placa de orifício é considerada a incerteza do instrumento usado como referência e o erro encontrado no processo de calibração, descrito no apêndice A. O instrumento usado na calibração foi um rotâmetro, graduado de 0 a 100 com a menor divisão igual a 1, sabendo-se que nas medições sempre foram usados valores maiores que 25 em sua escala, a incerteza padrão relativa da vazão volumétrica do rotâmetro foi estimada como $0,5/25 = 0,02$, ou seja, 2,0 %. O erro máximo no processo de calibração foi de $L = 2,9\%$, como, segundo Vuolo (1996), a incerteza padrão pode ser estimada por $\sigma = L/3$, a incerteza padrão relativa no processo de calibração foi considerada 0,97 %. Dessa forma, a incerteza padrão relativa da vazão volumétrica na placa de orifício foi calculada considerando as duas incertezas citadas anteriormente através da raiz quadrada da soma dos seus quadrados.

A incerteza da altura de líquido adimensional foi estimada durante a calibração do sensor resistivo. Na calibração são feitas medidas de tensão para um escoamento monofásico de líquido durante 120 segundos, sendo que a média desses resultados é posteriormente usada para normalizar as medidas de tensão que representam o escoamento, calculando o valor de h_L/D . O desvio padrão encontrado na tensão de calibração será então considerado como a incerteza padrão para todas as medidas de tensão. Com isso, é possível propagar a incerteza das medidas de tensão para a altura adimensional de líquido pela equação (B1). Considerando uma tensão de referência igual a 50 % e um h_L/D mínimo de 0,2, encontra-se o valor de 2,4 % para a incerteza padrão relativa na altura de líquido adimensional.

Com esses valores, aplica-se a equação (B1), de propagação de incertezas, nas equações (B3), (B4) e (B5) que calculam J_L , J_G e R_G em função das variáveis apresentadas na Tabela B1.

$$J_L = \frac{\dot{Q}_L}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (\text{B3})$$

$$J_G = \frac{P_{PO}}{P_{ST}} \frac{\dot{Q}_{G_{PO}}}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (\text{B4})$$

$$R_G = 1 - \frac{1}{\pi} \left[\arccos\left(1 - \frac{2h_L}{D}\right) - \left(1 - \frac{2h_L}{D}\right) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2h_L}{D}\right)^2} \right] \quad (\text{B5})$$

As incertezas padrões relativas obtidas para essas variáveis são apresentadas na Tabela B2.

Tabela B2 – Incertezas padrões relativas calculadas

Mensurando	Incerteza padrão relativa (ε)
J_L	$\pm 0,23\%$
J_G	$\pm 2,3\%$
R_G	$\pm 3,4\%$

Considerando uma incerteza expandida com confiança $P=99,73\%$ (3σ) os valores para J_L , J_G e R_G são respectivamente: 0,69 %, 6,9 % e 10 %.

APÊNDICE C – RESULTADOS MÉDIOS

Neste apêndice são apresentados os resultados médios obtidos pelos sensores resistivos nos experimentos. Nas Tabelas (C1) a (C12) são mostrados os valores, para cada ponto nas quatro seções de testes e em todas as inclinações avaliadas, dos seguintes parâmetros: velocidade da bolha (V_B), frequência (f), comprimento da bolha (L_B), comprimento do pistão (L_S), fração de gás na bolha (R_{GB}) e fração de gás no pistão (R_{GS}).

Tabela C1 – Valores médios de V_B (m/s)

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P01	1,09	1,12	1,13	1,13	1,09	1,08	1,09	-	1,08	1,07	1,12	-	1,08	1,12	1,08	-
P02	1,63	1,69	1,70	1,72	1,65	1,64	1,67	1,65	1,62	1,61	1,66	1,50	1,62	1,67	1,64	1,31
P03	2,21	2,28	2,31	2,35	2,23	2,23	2,24	2,27	2,16	2,16	2,25	2,21	2,18	2,26	2,24	2,19
P04	2,83	2,94	2,90	2,96	2,82	2,80	2,85	2,95	2,81	2,72	2,83	2,95	2,74	2,84	2,85	2,91
P05	1,11	1,13	1,14	1,14	1,12	1,11	1,12	-	1,11	1,10	1,09	-	1,10	1,12	1,10	-
P06	1,66	1,69	1,71	1,72	1,67	1,66	1,68	1,65	1,65	1,64	1,67	1,59	1,65	1,69	1,66	-
P07	2,25	2,30	2,32	2,36	2,24	2,23	2,27	2,25	2,21	2,22	2,26	2,21	2,19	2,28	2,27	2,23
P08	2,86	2,95	2,94	3,02	2,87	2,83	2,88	2,93	2,81	2,90	2,87	2,85	2,82	2,92	2,89	2,93
P09	1,68	1,71	1,73	1,74	1,71	1,70	1,72	1,71	1,69	1,68	1,72	1,67	1,64	1,68	1,66	-
P10	2,24	2,31	2,34	2,38	2,26	2,27	2,31	2,33	2,25	2,25	2,31	2,31	2,21	2,28	2,27	2,26
P11	2,82	2,93	2,95	3,02	2,89	2,88	2,93	2,99	2,87	2,87	2,94	3,01	2,80	2,90	2,87	2,93
P12	3,47	3,60	3,59	3,73	3,43	3,46	3,57	3,68	3,46	3,46	3,52	3,74	3,39	3,57	3,50	3,67
P13	1,70	1,74	1,75	1,78	1,73	1,71	1,76	1,72	1,70	1,72	1,77	1,70	1,64	1,71	1,73	1,66
P14	2,30	2,35	2,37	2,42	2,31	2,31	2,34	2,37	2,27	2,30	2,34	2,35	2,25	2,32	2,31	2,32
P15	2,91	2,97	3,00	3,09	2,90	2,88	2,95	3,02	2,88	2,89	2,93	3,02	2,86	2,95	2,89	3,01
P16	3,54	3,60	3,62	3,73	3,53	3,48	3,56	3,69	3,44	3,49	3,50	3,70	3,38	3,59	3,48	3,68
P17	4,12	4,26	4,24	4,43	4,06	4,12	4,15	4,43	4,05	4,07	4,10	4,50	3,98	4,24	4,13	4,37
P18	2,31	2,34	2,39	2,45	2,33	2,34	2,39	2,41	2,26	2,25	2,40	2,38	2,26	2,32	2,32	2,32
P19	2,94	3,01	3,01	3,11	2,91	2,89	2,98	3,04	2,89	2,82	2,98	3,06	2,86	2,96	2,92	3,04
P20	3,57	3,61	3,61	3,76	3,49	3,44	3,58	3,71	3,43	3,39	3,58	3,73	3,41	3,59	3,51	3,69
P21	4,09	4,28	4,24	4,49	4,05	4,08	4,20	4,41	4,05	3,98	4,21	4,45	3,94	4,22	4,12	4,40
P22	2,33	2,39	2,41	2,46	2,33	2,34	2,40	2,37	2,28	2,24	2,42	2,37	2,24	2,37	2,38	2,37
P23	2,93	3,00	3,04	3,13	2,93	2,92	3,00	3,07	2,88	2,83	3,00	3,06	2,84	2,97	2,95	3,05

Tabela C2 – Valores médios de V_B (m/s)

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P24	3,58	3,58	3,64	3,78	3,50	3,51	3,59	3,74	3,38	3,41	3,59	3,76	3,40	3,60	3,54	3,72
P25	4,17	4,30	4,26	4,52	4,05	4,10	4,23	4,44	4,04	4,00	4,20	4,49	3,96	4,22	4,14	4,44
P26	4,75	4,97	4,94	5,26	4,66	4,70	4,89	5,17	4,65	4,63	4,88	5,27	4,60	4,86	4,78	5,15
P27	2,95	3,04	3,05	3,17	2,94	2,94	2,98	3,08	2,86	2,83	2,98	3,06	2,84	2,97	2,93	3,04
P28	3,60	3,61	3,68	3,83	3,53	3,52	3,62	3,72	3,50	3,44	3,59	3,75	3,39	3,57	3,54	3,72
P29	4,17	4,33	4,29	4,56	4,05	4,07	4,21	4,46	4,06	4,02	4,25	4,56	4,02	4,23	4,22	4,45
P30	4,77	4,99	4,91	5,30	4,66	4,70	4,88	5,19	4,65	4,60	4,87	5,27	4,62	4,90	4,80	5,13
P31	2,92	3,03	3,01	3,07	2,87	2,93	3,00	2,99	2,88	2,89	3,07	2,99	2,81	3,01	2,99	3,00
P32	3,57	3,75	3,69	3,83	3,49	3,51	3,62	3,72	3,53	3,44	3,59	3,78	3,41	3,59	3,56	3,75
P33	4,12	4,35	4,23	4,56	4,14	4,10	4,27	4,49	4,07	4,06	4,30	4,54	4,04	4,31	4,21	4,52
P34	4,70	5,02	4,92	5,33	4,76	4,77	4,92	5,22	4,69	4,68	4,90	5,22	4,62	4,98	4,86	5,20
P35	3,66	3,80	3,71	3,86	3,49	3,55	3,69	3,78	3,48	3,41	3,67	3,78	3,47	3,71	3,62	3,81
P36	4,18	4,35	4,28	4,61	4,21	4,20	4,26	4,57	4,12	4,02	4,30	4,59	4,15	4,37	4,27	4,59
P37	4,84	5,02	4,96	5,39	4,74	4,82	4,91	5,31	4,72	4,64	4,93	5,28	4,63	4,90	4,86	5,23
P38	3,63	3,78	3,62	3,76	3,50	3,47	3,65	3,63	3,46	3,40	3,78	3,72	3,39	3,72	3,76	3,75
P39	4,28	4,45	4,31	4,73	4,21	4,21	4,34	4,63	4,13	4,10	4,43	4,60	4,18	4,43	4,38	4,55
P40	4,91	5,03	4,98	5,46	4,78	4,76	4,97	5,28	4,82	4,70	5,00	5,29	4,60	4,97	4,93	5,27
P41	4,28	4,44	4,31	4,61	4,21	4,27	4,35	4,62	4,30	4,24	4,53	4,68	4,07	4,52	4,41	4,58
P42	5,10	5,10	5,07	5,59	4,82	4,85	5,02	5,37	4,86	4,78	5,02	5,41	4,73	5,10	5,02	5,32
P43	4,03	4,45	4,34	4,41	4,17	4,18	4,35	4,36	4,04	4,12	4,52	4,62	4,11	4,27	4,29	4,48
P44	4,91	5,10	5,06	5,42	4,91	4,91	5,12	5,29	4,96	4,93	5,13	5,33	4,52	4,96	4,97	5,21
P45	4,80	5,10	5,11	5,35	4,72	4,95	5,02	5,24	4,79	4,83	5,24	5,33	4,48	5,11	5,11	5,20

Tabela C3 – Valores médios de f (Hz)

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P01	4,18	4,11	4,71	4,33	4,91	5,29	3,67	-	5,24	4,55	3,48	-	4,14	4,25	3,50	-
P02	6,91	6,66	6,56	6,53	8,50	7,52	6,70	6,90	8,33	8,89	6,63	2,87	7,14	9,40	7,57	2,55
P03	10,99	10,54	10,38	10,15	11,46	11,98	11,59	10,72	11,52	10,97	10,88	9,94	11,04	10,56	10,62	9,71
P04	15,17	14,92	14,98	14,52	15,17	15,08	14,73	14,02	15,18	16,37	15,03	14,30	15,51	15,56	14,85	14,40
P05	2,49	2,24	2,38	1,98	2,69	2,50	2,30	-	2,36	2,14	2,01	-	2,24	2,06	1,87	-
P06	7,51	7,02	6,85	6,51	7,45	6,96	6,74	6,22	7,48	7,02	6,84	0,85	7,05	6,55	6,53	-
P07	11,23	10,72	10,59	10,22	11,05	10,67	10,46	10,03	11,45	11,02	11,13	8,92	11,45	10,80	11,17	8,77
P08	14,95	14,16	14,03	14,98	15,31	14,96	14,69	16,03	15,47	15,05	14,96	13,46	15,57	14,69	15,44	13,61
P09	3,89	3,51	3,40	3,27	4,00	3,62	3,42	3,04	4,05	3,56	3,46	1,38	3,56	3,21	3,12	-
P10	8,47	7,30	7,15	6,46	8,01	6,94	6,78	6,33	8,15	7,38	7,06	6,23	8,23	7,28	7,05	5,89
P11	11,78	10,91	10,93	9,92	11,60	10,56	10,17	9,98	11,61	10,69	10,49	10,39	12,37	11,13	10,83	12,54
P12	15,06	15,78	16,15	14,29	16,34	15,26	13,88	14,90	16,94	15,54	13,63	12,91	16,67	14,23	14,64	13,49
P13	1,67	1,56	1,47	1,48	1,51	1,41	1,40	1,35	1,67	1,40	1,43	1,08	1,56	1,43	1,40	0,67
P14	4,10	3,69	3,57	3,33	4,19	3,81	3,78	3,47	4,17	3,71	3,59	3,47	4,23	3,79	3,77	3,42
P15	7,49	6,38	6,45	6,04	7,36	6,78	6,55	6,00	7,16	6,52	6,54	6,14	7,59	6,74	6,75	6,88
P16	11,93	10,55	10,06	10,00	11,69	10,24	9,61	9,76	10,52	10,34	9,17	9,44	11,56	10,66	9,48	10,28
P17	15,97	14,83	15,69	14,35	15,76	14,50	13,40	14,83	14,49	14,83	13,27	12,37	16,65	13,63	13,90	15,88
P18	2,35	2,25	2,25	2,12	2,55	2,17	2,18	2,09	2,45	2,34	2,29	2,22	2,35	2,20	2,20	1,98
P19	4,46	4,04	4,01	3,94	4,38	4,27	4,50	3,92	4,44	4,12	4,08	3,82	4,66	4,27	4,33	4,10
P20	7,86	7,06	6,72	6,26	7,43	6,86	6,38	6,19	7,34	6,77	6,69	6,31	7,87	6,62	6,65	6,70
P21	10,94	10,17	9,85	10,13	11,08	10,01	10,01	9,64	11,14	10,93	9,34	9,59	11,61	9,61	9,49	8,71
P22	1,37	1,16	1,15	1,11	1,25	1,16	1,17	1,14	1,91	1,83	1,58	1,39	1,27	1,26	1,27	1,22
P23	3,26	3,03	2,99	2,92	3,54	3,07	3,17	3,02	3,43	3,24	3,09	2,97	3,43	3,13	3,05	3,07

Tabela C4 – Valores médios de f (Hz)

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P24	5,25	4,75	4,76	4,51	5,23	4,87	4,86	4,59	5,18	4,69	4,74	4,41	5,72	4,95	4,81	4,81
P25	7,87	7,84	7,38	7,56	7,97	7,78	7,29	7,34	7,89	6,88	7,15	6,69	7,45	7,27	7,26	7,06
P26	12,40	9,74	11,01	10,71	11,66	11,73	9,97	10,89	11,41	11,01	9,58	10,34	11,85	10,70	10,26	11,60
P27	2,35	2,02	1,96	1,88	2,27	2,05	1,95	1,92	1,96	1,89	1,85	1,78	2,14	1,96	1,96	1,88
P28	4,16	3,72	3,66	3,45	3,87	3,67	3,62	3,48	3,70	3,27	3,39	3,26	3,75	3,72	3,58	3,40
P29	5,61	5,45	5,77	5,75	6,25	5,95	5,60	5,32	6,12	5,44	5,49	5,15	6,16	5,39	5,34	5,38
P30	9,29	8,56	8,78	8,21	8,76	8,35	7,22	7,60	8,93	8,64	7,53	7,51	8,72	8,45	8,03	8,14
P31	1,27	1,15	1,07	0,98	1,68	1,20	1,17	1,06	1,67	1,08	1,04	0,99	1,77	1,25	1,16	1,03
P32	3,06	2,87	2,51	2,54	3,11	2,67	2,67	2,43	2,93	2,91	2,89	2,53	3,33	2,90	2,95	2,81
P33	4,55	4,25	4,44	4,29	4,63	4,10	4,14	4,16	4,51	4,04	3,92	3,77	4,43	4,20	4,06	4,01
P34	6,61	5,83	6,42	5,83	7,06	6,29	6,16	5,92	6,26	6,09	5,91	5,66	7,02	6,38	6,31	6,16
P35	2,16	1,80	1,84	1,73	1,97	1,63	1,65	1,49	1,84	1,71	1,65	1,60	2,00	1,71	1,61	1,57
P36	3,66	3,14	3,39	3,05	3,83	3,30	3,27	3,11	4,01	3,67	3,35	3,27	3,57	3,26	3,06	3,07
P37	5,25	4,61	4,77	4,39	5,23	4,67	4,52	4,44	5,37	4,82	4,70	4,81	4,86	5,01	5,01	4,80
P38	1,19	1,02	0,97	0,99	2,16	1,19	1,20	1,18	1,43	1,29	0,99	0,97	2,08	1,00	1,15	0,92
P39	2,82	2,73	2,36	2,34	2,43	2,44	2,23	2,23	2,77	2,21	2,64	2,15	2,96	2,37	2,25	1,97
P40	4,13	4,04	3,91	3,75	4,52	3,91	3,87	3,70	4,60	3,88	3,89	3,81	4,00	3,98	3,70	3,62
P41	2,05	1,61	1,42	1,49	2,22	1,86	1,53	1,47	1,78	1,99	1,57	1,57	1,94	1,60	1,47	1,42
P42	3,78	3,28	3,36	2,93	3,72	3,19	3,02	2,90	3,98	2,85	2,84	2,67	3,49	3,19	3,09	2,90
P43	1,47	0,96	1,55	1,02	1,00	1,05	1,04	0,87	1,87	0,96	0,87	0,87	2,16	1,75	0,93	0,87
P44	2,15	2,43	2,37	2,07	3,02	2,31	2,17	2,11	2,19	2,42	2,17	2,09	2,39	2,37	2,12	2,08
P45	1,68	1,79	1,58	1,56	1,96	1,53	1,50	1,48	1,80	1,63	1,42	1,34	2,59	1,66	1,53	1,67

Tabela C5 – Valores médios de L_B (m)

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P01	0,17	0,17	0,16	0,15	0,16	0,15	0,23	-	0,14	0,17	0,08	-	0,17	0,10	0,23	-
P02	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,11	0,17	0,09	0,09	0,11	0,59	0,10	0,09	0,11	0,64
P03	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,09	0,07	0,07	0,07	0,12	0,07	0,08	0,07	0,14
P04	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,08	0,06	0,06	0,06	0,09	0,06	0,06	0,06	0,09
P05	0,38	0,42	0,41	0,44	0,37	0,39	0,34	-	0,40	0,42	0,48	-	0,42	0,45	0,49	-
P06	0,14	0,15	0,16	0,17	0,14	0,15	0,17	0,23	0,14	0,15	0,16	3,60	0,15	0,17	0,17	-
P07	0,11	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,13	0,10	0,11	0,11	0,18	0,10	0,11	0,11	0,24
P08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,12	0,09	0,10	0,10	0,13
P09	0,37	0,40	0,41	0,43	0,37	0,39	0,43	0,51	0,37	0,40	0,43	1,53	0,36	0,39	0,40	-
P10	0,19	0,22	0,23	0,25	0,21	0,23	0,24	0,26	0,20	0,22	0,24	0,29	0,20	0,23	0,24	0,34
P11	0,15	0,17	0,17	0,18	0,16	0,17	0,19	0,19	0,16	0,17	0,18	0,20	0,15	0,16	0,17	0,18
P12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,13	0,13	0,15	0,15	0,13	0,13	0,14	0,16	0,12	0,14	0,14	0,14
P13	1,08	1,16	1,18	1,22	1,16	1,19	1,24	1,28	1,15	1,23	1,29	1,65	1,05	1,15	1,20	2,85
P14	0,46	0,50	0,52	0,55	0,46	0,48	0,51	0,55	0,46	0,50	0,53	0,57	0,44	0,49	0,51	0,58
P15	0,29	0,33	0,33	0,35	0,30	0,31	0,33	0,36	0,30	0,31	0,32	0,36	0,28	0,31	0,31	0,35
P16	0,21	0,23	0,24	0,25	0,21	0,23	0,24	0,25	0,22	0,23	0,24	0,27	0,20	0,22	0,24	0,25
P17	0,16	0,18	0,18	0,19	0,16	0,17	0,18	0,18	0,17	0,17	0,18	0,20	0,15	0,18	0,18	0,19
P18	0,96	0,99	1,01	1,07	0,94	1,01	1,04	1,11	0,91	0,94	1,03	1,08	0,90	0,97	0,99	1,08
P19	0,54	0,58	0,59	0,63	0,53	0,55	0,58	0,62	0,52	0,53	0,58	0,64	0,50	0,55	0,56	0,61
P20	0,35	0,38	0,39	0,42	0,36	0,38	0,40	0,42	0,35	0,37	0,39	0,44	0,34	0,39	0,38	0,43
P21	0,26	0,28	0,29	0,30	0,25	0,27	0,28	0,30	0,26	0,27	0,29	0,31	0,24	0,28	0,28	0,32
P22	2,01	2,12	2,14	2,25	2,07	2,16	2,19	2,30	1,85	1,88	2,11	2,22	2,00	2,14	2,19	2,31
P23	0,86	0,92	0,94	0,97	0,84	0,88	0,92	0,97	0,85	0,87	0,96	1,02	0,81	0,89	0,92	0,97

Tabela C6 – Valores médios de L_B (m)

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P24	0,56	0,60	0,61	0,65	0,54	0,58	0,59	0,64	0,54	0,58	0,61	0,67	0,52	0,59	0,60	0,66
P25	0,39	0,42	0,43	0,45	0,37	0,40	0,42	0,46	0,38	0,41	0,42	0,48	0,38	0,42	0,42	0,47
P26	0,28	0,33	0,32	0,35	0,28	0,29	0,32	0,34	0,29	0,29	0,32	0,36	0,27	0,31	0,30	0,33
P27	1,50	1,62	1,63	1,74	1,44	1,53	1,58	1,69	1,52	1,54	1,67	1,80	1,43	1,57	1,57	1,73
P28	0,85	0,90	0,92	0,99	0,83	0,86	0,90	0,95	0,84	0,88	0,91	0,99	0,82	0,89	0,90	0,99
P29	0,57	0,64	0,63	0,66	0,53	0,56	0,60	0,66	0,56	0,59	0,62	0,71	0,54	0,60	0,61	0,68
P30	0,39	0,43	0,44	0,50	0,40	0,42	0,45	0,50	0,40	0,40	0,44	0,52	0,39	0,43	0,43	0,48
P31	2,89	3,25	3,20	3,43	2,74	2,90	3,06	3,25	2,67	2,96	3,28	3,36	2,69	3,20	3,37	3,57
P32	1,27	1,42	1,42	1,49	1,22	1,31	1,35	1,48	1,30	1,30	1,38	1,57	1,17	1,29	1,29	1,42
P33	0,80	0,89	0,86	0,94	0,79	0,85	0,87	0,94	0,83	0,85	0,91	1,00	0,80	0,89	0,90	0,99
P34	0,57	0,67	0,64	0,71	0,57	0,60	0,63	0,70	0,57	0,60	0,62	0,70	0,55	0,62	0,61	0,68
P35	2,16	2,44	2,42	2,56	2,14	2,36	2,47	2,60	2,08	2,12	2,32	2,49	2,11	2,43	2,45	2,67
P36	1,14	1,30	1,27	1,37	1,18	1,25	1,27	1,40	1,10	1,13	1,24	1,37	1,20	1,35	1,35	1,50
P37	0,81	0,89	0,88	0,97	0,81	0,86	0,90	0,99	0,80	0,83	0,88	0,98	0,79	0,85	0,85	0,96
P38	3,90	4,33	4,26	4,40	3,32	3,98	4,37	4,38	3,73	3,94	4,65	4,87	3,37	4,19	4,58	4,96
P39	1,73	1,91	1,94	2,09	1,79	1,82	1,90	2,04	1,71	1,87	1,98	2,17	1,75	2,05	2,08	2,30
P40	1,15	1,22	1,22	1,35	1,07	1,14	1,21	1,32	1,08	1,13	1,21	1,33	1,09	1,18	1,22	1,35
P41	2,74	3,10	3,15	3,24	2,79	2,79	3,19	3,51	2,77	2,84	3,13	3,39	2,66	3,18	3,20	3,51
P42	1,58	1,66	1,66	1,88	1,55	1,67	1,75	1,95	1,58	1,65	1,75	1,96	1,52	1,71	1,71	1,90
P43	4,64	5,62	5,35	5,78	5,01	4,98	5,59	6,27	4,36	5,19	6,06	6,41	4,03	4,71	5,19	6,12
P44	2,37	2,48	2,45	2,63	2,25	2,40	2,46	2,67	2,35	2,44	2,57	2,79	2,00	2,30	2,37	2,59
P45	3,39	3,64	3,78	3,77	3,17	3,61	3,79	3,93	3,38	3,43	3,93	4,30	2,91	3,70	3,85	4,18

Tabela C7 – Valores médios de L_s (m)

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P01	0,13	0,13	0,13	0,15	0,11	0,13	0,09	-	0,12	0,11	0,26	-	0,13	0,21	0,10	-
P02	0,17	0,19	0,19	0,19	0,14	0,17	0,17	0,10	0,15	0,15	0,17	0,06	0,16	0,16	0,16	0,07
P03	0,16	0,18	0,19	0,19	0,16	0,16	0,17	0,16	0,15	0,16	0,17	0,14	0,16	0,17	0,17	0,12
P04	0,15	0,17	0,17	0,17	0,14	0,15	0,15	0,17	0,14	0,14	0,15	0,15	0,13	0,15	0,15	0,15
P05	0,16	0,17	0,19	0,22	0,16	0,18	0,27	-	0,18	0,20	0,15	-	0,22	0,21	0,17	-
P06	0,11	0,12	0,13	0,14	0,11	0,12	0,12	0,10	0,11	0,12	0,12	0,03	0,13	0,14	0,13	-
P07	0,12	0,13	0,13	0,14	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11	0,12	0,12	0,10	0,11	0,12	0,12	0,07
P08	0,12	0,14	0,14	0,14	0,12	0,13	0,13	0,13	0,11	0,13	0,13	0,12	0,11	0,13	0,12	0,11
P09	0,17	0,19	0,20	0,20	0,16	0,18	0,18	0,17	0,16	0,19	0,18	0,08	0,18	0,20	0,18	-
P10	0,13	0,15	0,16	0,17	0,13	0,16	0,16	0,17	0,13	0,15	0,15	0,14	0,13	0,16	0,16	0,13
P11	0,13	0,15	0,15	0,17	0,13	0,15	0,15	0,16	0,13	0,15	0,15	0,15	0,12	0,14	0,15	0,12
P12	0,13	0,14	0,14	0,17	0,13	0,14	0,14	0,15	0,12	0,13	0,15	0,16	0,12	0,15	0,15	0,16
P13	0,27	0,31	0,33	0,32	0,30	0,32	0,31	0,27	0,29	0,33	0,31	0,19	0,29	0,31	0,30	0,12
P14	0,20	0,23	0,25	0,26	0,20	0,23	0,22	0,23	0,20	0,23	0,23	0,21	0,20	0,23	0,21	0,19
P15	0,18	0,21	0,22	0,22	0,18	0,20	0,20	0,22	0,17	0,19	0,20	0,20	0,17	0,19	0,18	0,19
P16	0,15	0,17	0,18	0,19	0,15	0,17	0,18	0,19	0,15	0,17	0,18	0,19	0,15	0,17	0,17	0,17
P17	0,13	0,15	0,16	0,19	0,14	0,16	0,17	0,19	0,14	0,15	0,18	0,20	0,13	0,17	0,17	0,16
P18	0,29	0,31	0,33	0,31	0,28	0,30	0,30	0,30	0,27	0,28	0,28	0,26	0,27	0,29	0,29	0,25
P19	0,24	0,27	0,29	0,28	0,24	0,25	0,26	0,26	0,23	0,24	0,24	0,25	0,23	0,25	0,24	0,24
P20	0,19	0,21	0,24	0,24	0,20	0,20	0,23	0,24	0,19	0,21	0,22	0,23	0,18	0,22	0,21	0,22
P21	0,17	0,18	0,21	0,21	0,17	0,19	0,20	0,20	0,15	0,16	0,20	0,22	0,16	0,20	0,20	0,22
P22	0,34	0,36	0,38	0,37	0,34	0,38	0,36	0,34	0,31	0,32	0,32	0,30	0,35	0,39	0,36	0,29
P23	0,26	0,28	0,30	0,30	0,26	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,26	0,28	0,27	0,26

Tabela C8 – Valores médios de L_s (m)

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P24	0,24	0,25	0,29	0,28	0,23	0,26	0,27	0,26	0,23	0,24	0,25	0,27	0,23	0,25	0,26	0,26
P25	0,20	0,22	0,24	0,24	0,20	0,21	0,23	0,24	0,20	0,23	0,23	0,25	0,21	0,22	0,23	0,24
P26	0,16	0,22	0,22	0,21	0,17	0,18	0,22	0,21	0,18	0,20	0,23	0,23	0,17	0,20	0,22	0,20
P27	0,29	0,34	0,37	0,36	0,27	0,33	0,32	0,31	0,31	0,32	0,33	0,32	0,30	0,32	0,32	0,30
P28	0,27	0,28	0,32	0,31	0,26	0,29	0,29	0,28	0,27	0,29	0,29	0,29	0,28	0,30	0,28	0,29
P29	0,25	0,26	0,28	0,29	0,23	0,26	0,26	0,26	0,22	0,26	0,27	0,29	0,23	0,26	0,26	0,26
P30	0,20	0,23	0,25	0,24	0,21	0,24	0,27	0,26	0,20	0,22	0,25	0,24	0,20	0,23	0,24	0,25
P31	0,29	0,35	0,41	0,41	0,24	0,33	0,34	0,34	0,29	0,36	0,34	0,33	0,31	0,37	0,37	0,35
P32	0,25	0,31	0,36	0,34	0,27	0,31	0,31	0,32	0,31	0,30	0,30	0,33	0,26	0,30	0,29	0,29
P33	0,26	0,29	0,32	0,30	0,26	0,30	0,31	0,30	0,27	0,28	0,29	0,32	0,28	0,31	0,31	0,31
P34	0,25	0,28	0,31	0,28	0,24	0,27	0,31	0,28	0,25	0,25	0,29	0,28	0,24	0,26	0,28	0,28
P35	0,29	0,36	0,41	0,41	0,29	0,37	0,36	0,38	0,30	0,32	0,35	0,34	0,29	0,36	0,34	0,35
P36	0,27	0,32	0,36	0,34	0,29	0,33	0,33	0,35	0,25	0,28	0,31	0,31	0,29	0,36	0,35	0,35
P37	0,28	0,31	0,33	0,35	0,28	0,30	0,33	0,33	0,26	0,28	0,31	0,31	0,29	0,30	0,33	0,31
P38	0,24	0,31	0,41	0,35	0,18	0,28	0,33	0,34	0,25	0,28	0,32	0,35	0,24	0,34	0,33	0,30
P39	0,28	0,34	0,39	0,36	0,30	0,36	0,34	0,33	0,30	0,36	0,33	0,35	0,28	0,38	0,38	0,39
P40	0,29	0,33	0,37	0,35	0,29	0,34	0,35	0,32	0,29	0,31	0,31	0,33	0,31	0,32	0,35	0,35
P41	0,25	0,36	0,39	0,39	0,25	0,33	0,33	0,37	0,27	0,31	0,31	0,33	0,28	0,37	0,39	0,36
P42	0,27	0,32	0,36	0,35	0,30	0,35	0,35	0,38	0,29	0,35	0,34	0,34	0,30	0,35	0,36	0,35
P43	0,16	0,28	0,27	0,26	0,24	0,27	0,31	0,36	0,21	0,33	0,29	0,31	0,17	0,22	0,24	0,33
P44	0,33	0,34	0,39	0,38	0,27	0,37	0,37	0,35	0,35	0,34	0,37	0,38	0,25	0,29	0,36	0,32
P45	0,26	0,32	0,36	0,36	0,24	0,33	0,32	0,36	0,21	0,29	0,32	0,32	0,20	0,36	0,33	0,36

Tabela C9 – Valores médios de R_{GB}

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P01	0,33	0,33	0,36	0,35	0,33	0,34	0,32	-	0,34	0,32	0,52	-	0,34	0,51	0,39	-
P02	0,33	0,35	0,37	0,33	0,32	0,33	0,33	0,23	0,33	0,32	0,34	0,20	0,34	0,34	0,35	0,23
P03	0,30	0,31	0,32	0,28	0,30	0,30	0,30	0,25	0,31	0,31	0,30	0,25	0,31	0,33	0,31	0,20
P04	0,30	0,30	0,29	0,26	0,31	0,28	0,27	0,23	0,31	0,31	0,29	0,22	0,33	0,32	0,30	0,21
P05	0,51	0,53	0,57	0,54	0,54	0,54	0,66	-	0,53	0,55	0,59	-	0,58	0,56	0,66	-
P06	0,46	0,48	0,50	0,46	0,48	0,47	0,47	0,38	0,46	0,44	0,48	0,31	0,50	0,49	0,51	-
P07	0,41	0,42	0,44	0,39	0,41	0,40	0,40	0,37	0,40	0,38	0,40	0,30	0,43	0,43	0,41	0,28
P08	0,38	0,40	0,39	0,36	0,39	0,39	0,38	0,34	0,37	0,36	0,38	0,31	0,40	0,41	0,38	0,30
P09	0,58	0,60	0,64	0,58	0,60	0,58	0,62	0,57	0,58	0,58	0,63	0,49	0,63	0,63	0,67	-
P10	0,50	0,52	0,54	0,50	0,51	0,50	0,52	0,51	0,49	0,49	0,51	0,47	0,51	0,52	0,53	0,44
P11	0,45	0,47	0,48	0,44	0,46	0,44	0,47	0,45	0,45	0,44	0,47	0,43	0,47	0,48	0,48	0,40
P12	0,43	0,44	0,44	0,43	0,48	0,46	0,45	0,44	0,44	0,43	0,46	0,43	0,45	0,48	0,48	0,43
P13	0,67	0,71	0,73	0,69	0,70	0,70	0,74	0,70	0,69	0,69	0,75	0,68	0,71	0,72	0,77	0,66
P14	0,60	0,63	0,65	0,61	0,60	0,60	0,62	0,61	0,61	0,59	0,62	0,59	0,62	0,63	0,64	0,58
P15	0,53	0,57	0,59	0,53	0,54	0,53	0,55	0,54	0,55	0,53	0,56	0,54	0,55	0,57	0,58	0,52
P16	0,48	0,52	0,53	0,49	0,51	0,51	0,54	0,52	0,51	0,49	0,53	0,50	0,52	0,53	0,57	0,48
P17	0,46	0,49	0,49	0,48	0,50	0,48	0,51	0,49	0,50	0,46	0,52	0,48	0,51	0,53	0,55	0,48
P18	0,67	0,70	0,72	0,67	0,69	0,66	0,70	0,69	0,68	0,67	0,69	0,66	0,70	0,70	0,72	0,68
P19	0,60	0,64	0,66	0,60	0,61	0,59	0,62	0,61	0,61	0,61	0,60	0,58	0,62	0,63	0,66	0,60
P20	0,55	0,59	0,60	0,56	0,56	0,54	0,59	0,56	0,57	0,56	0,58	0,56	0,58	0,59	0,63	0,56
P21	0,53	0,54	0,55	0,52	0,55	0,53	0,57	0,53	0,53	0,53	0,58	0,54	0,55	0,58	0,61	0,54
P22	0,73	0,76	0,78	0,73	0,74	0,73	0,77	0,75	0,71	0,71	0,74	0,73	0,75	0,75	0,79	0,75
P23	0,65	0,68	0,69	0,65	0,66	0,64	0,67	0,65	0,66	0,65	0,65	0,65	0,67	0,68	0,70	0,66

Tabela C10 – Valores médios de R_{GB}

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P24	0,61	0,64	0,65	0,61	0,61	0,60	0,63	0,60	0,62	0,61	0,63	0,59	0,62	0,63	0,66	0,61
P25	0,56	0,60	0,59	0,56	0,59	0,56	0,61	0,58	0,58	0,59	0,61	0,56	0,60	0,61	0,65	0,59
P26	0,54	0,58	0,56	0,54	0,56	0,54	0,60	0,56	0,56	0,57	0,61	0,56	0,57	0,59	0,63	0,55
P27	0,67	0,70	0,72	0,69	0,70	0,69	0,72	0,70	0,71	0,70	0,71	0,70	0,72	0,72	0,75	0,72
P28	0,64	0,68	0,69	0,65	0,65	0,64	0,66	0,65	0,66	0,65	0,67	0,66	0,67	0,68	0,71	0,66
P29	0,62	0,64	0,64	0,61	0,63	0,60	0,65	0,61	0,62	0,63	0,65	0,63	0,63	0,64	0,68	0,61
P30	0,59	0,61	0,61	0,57	0,60	0,58	0,64	0,59	0,60	0,61	0,65	0,59	0,61	0,63	0,66	0,59
P31	0,73	0,76	0,78	0,74	0,72	0,73	0,76	0,75	0,73	0,75	0,77	0,78	0,74	0,76	0,80	0,78
P32	0,68	0,70	0,72	0,69	0,69	0,68	0,70	0,69	0,68	0,68	0,70	0,70	0,70	0,70	0,73	0,70
P33	0,66	0,67	0,68	0,64	0,66	0,64	0,69	0,65	0,66	0,66	0,68	0,67	0,67	0,69	0,72	0,66
P34	0,64	0,65	0,65	0,61	0,63	0,62	0,66	0,63	0,64	0,63	0,67	0,65	0,64	0,66	0,69	0,64
P35	0,71	0,74	0,75	0,72	0,72	0,72	0,74	0,73	0,72	0,72	0,74	0,73	0,73	0,74	0,78	0,75
P36	0,69	0,71	0,72	0,68	0,68	0,66	0,71	0,69	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,74	0,70
P37	0,66	0,68	0,68	0,64	0,65	0,63	0,69	0,66	0,66	0,66	0,69	0,66	0,68	0,69	0,72	0,67
P38	0,73	0,76	0,79	0,74	0,72	0,73	0,75	0,75	0,73	0,73	0,77	0,76	0,74	0,76	0,80	0,77
P39	0,71	0,73	0,74	0,70	0,72	0,70	0,74	0,72	0,70	0,71	0,72	0,73	0,72	0,72	0,76	0,73
P40	0,68	0,71	0,71	0,66	0,68	0,66	0,71	0,68	0,68	0,68	0,70	0,69	0,70	0,71	0,74	0,69
P41	0,73	0,76	0,77	0,73	0,73	0,72	0,76	0,75	0,73	0,73	0,75	0,75	0,74	0,75	0,79	0,77
P42	0,70	0,72	0,73	0,69	0,71	0,68	0,73	0,72	0,70	0,70	0,72	0,72	0,72	0,73	0,76	0,72
P43	0,75	0,78	0,78	0,74	0,74	0,72	0,77	0,76	0,73	0,74	0,77	0,79	0,74	0,76	0,81	0,78
P44	0,74	0,75	0,75	0,72	0,72	0,71	0,75	0,75	0,73	0,73	0,75	0,75	0,74	0,75	0,78	0,74
P45	0,75	0,77	0,78	0,74	0,74	0,73	0,78	0,76	0,74	0,74	0,76	0,77	0,74	0,76	0,80	0,76

Tabela C11 – Valores médios de R_{GS}

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P01	0,005	0,004	0,005	0,003	0,004	0,004	0,003	-	0,003	0,003	0,163	-	0,003	0,063	0,002	-
P02	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001	0,003	0,002	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,001	0,004
P03	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,005	0,002	0,004	0,006	0,007	0,007	0,017	0,002	0,005	0,002	0,002
P04	0,013	0,017	0,015	0,022	0,014	0,017	0,016	0,019	0,018	0,031	0,034	0,025	0,017	0,020	0,016	0,023
P05	0,008	0,005	0,003	0,004	0,003	0,004	0,165	-	0,007	0,005	0,002	-	0,001	0,002	0,002	-
P06	0,001	0,002	0,002	0,002	0,003	0,007	0,002	0,007	0,002	0,002	0,006	0,014	0,003	0,003	0,002	-
P07	0,004	0,006	0,006	0,006	0,003	0,009	0,007	0,010	0,004	0,007	0,011	0,007	0,007	0,010	0,005	0,022
P08	0,015	0,021	0,019	0,030	0,014	0,042	0,028	0,043	0,018	0,028	0,032	0,030	0,020	0,027	0,022	0,040
P09	0,007	0,007	0,006	0,008	0,007	0,011	0,007	0,012	0,006	0,009	0,007	0,008	0,006	0,006	0,004	-
P10	0,019	0,016	0,011	0,016	0,021	0,026	0,022	0,031	0,016	0,027	0,018	0,026	0,015	0,019	0,012	0,033
P11	0,041	0,038	0,030	0,039	0,032	0,039	0,035	0,053	0,034	0,049	0,036	0,056	0,033	0,040	0,029	0,069
P12	0,061	0,067	0,060	0,085	0,107	0,132	0,070	0,105	0,069	0,086	0,070	0,099	0,067	0,080	0,060	0,105
P13	0,015	0,015	0,012	0,012	0,016	0,019	0,013	0,019	0,014	0,014	0,010	0,019	0,015	0,009	0,009	0,018
P14	0,030	0,035	0,031	0,032	0,025	0,047	0,033	0,042	0,032	0,041	0,028	0,037	0,027	0,029	0,019	0,039
P15	0,050	0,058	0,049	0,057	0,047	0,059	0,046	0,061	0,057	0,071	0,052	0,075	0,043	0,057	0,040	0,076
P16	0,070	0,087	0,076	0,103	0,083	0,120	0,089	0,122	0,085	0,105	0,078	0,104	0,086	0,095	0,071	0,107
P17	0,089	0,108	0,107	0,138	0,114	0,131	0,112	0,150	0,105	0,119	0,103	0,129	0,119	0,133	0,108	0,154
P18	0,034	0,046	0,035	0,035	0,050	0,051	0,041	0,047	0,039	0,037	0,035	0,021	0,035	0,041	0,033	0,048
P19	0,058	0,076	0,065	0,066	0,061	0,078	0,059	0,070	0,057	0,063	0,051	0,045	0,065	0,069	0,051	0,081
P20	0,082	0,108	0,093	0,110	0,090	0,101	0,084	0,107	0,096	0,088	0,081	0,103	0,102	0,103	0,085	0,116
P21	0,119	0,127	0,116	0,148	0,123	0,137	0,118	0,150	0,110	0,125	0,116	0,152	0,123	0,142	0,111	0,156
P22	0,053	0,057	0,046	0,040	0,050	0,054	0,042	0,036	0,046	0,036	0,035	0,022	0,050	0,047	0,037	0,044
P23	0,074	0,089	0,075	0,081	0,072	0,091	0,066	0,070	0,078	0,067	0,057	0,073	0,080	0,078	0,057	0,093

Tabela C12 – Valores médios de R_{GS}

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
P24	0,100	0,131	0,100	0,118	0,092	0,120	0,088	0,103	0,110	0,094	0,087	0,077	0,108	0,111	0,086	0,118
P25	0,112	0,141	0,122	0,152	0,127	0,141	0,127	0,150	0,118	0,135	0,118	0,120	0,132	0,143	0,117	0,159
P26	0,141	0,160	0,158	0,184	0,160	0,174	0,158	0,195	0,152	0,181	0,156	0,196	0,155	0,170	0,145	0,201
P27	0,083	0,090	0,079	0,078	0,080	0,106	0,073	0,074	0,088	0,085	0,074	0,055	0,093	0,094	0,081	0,098
P28	0,115	0,136	0,114	0,129	0,108	0,131	0,091	0,106	0,111	0,113	0,105	0,118	0,123	0,131	0,106	0,129
P29	0,138	0,146	0,137	0,156	0,150	0,149	0,131	0,148	0,143	0,148	0,137	0,155	0,132	0,142	0,112	0,148
P30	0,158	0,185	0,163	0,182	0,167	0,181	0,164	0,191	0,172	0,189	0,170	0,191	0,166	0,198	0,162	0,207
P31	0,112	0,118	0,106	0,095	0,082	0,114	0,078	0,072	0,105	0,096	0,091	0,100	0,114	0,107	0,090	0,096
P32	0,131	0,135	0,128	0,139	0,127	0,149	0,109	0,114	0,121	0,129	0,121	0,126	0,136	0,144	0,120	0,143
P33	0,152	0,159	0,149	0,158	0,146	0,160	0,149	0,158	0,159	0,157	0,150	0,167	0,159	0,170	0,144	0,168
P34	0,173	0,179	0,171	0,178	0,167	0,192	0,175	0,188	0,178	0,185	0,182	0,226	0,177	0,200	0,171	0,210
P35	0,151	0,150	0,140	0,144	0,149	0,166	0,120	0,119	0,148	0,141	0,135	0,108	0,155	0,159	0,138	0,147
P36	0,163	0,170	0,162	0,167	0,162	0,162	0,154	0,161	0,176	0,182	0,161	0,177	0,171	0,179	0,154	0,177
P37	0,169	0,190	0,179	0,194	0,175	0,182	0,177	0,184	0,186	0,184	0,184	0,195	0,198	0,205	0,180	0,206
P38	0,192	0,178	0,183	0,160	0,167	0,174	0,138	0,119	0,177	0,153	0,157	0,113	0,180	0,176	0,148	0,133
P39	0,177	0,197	0,178	0,170	0,183	0,178	0,171	0,180	0,183	0,180	0,164	0,175	0,206	0,182	0,169	0,171
P40	0,176	0,204	0,190	0,187	0,191	0,191	0,187	0,196	0,189	0,187	0,180	0,196	0,190	0,209	0,185	0,209
P41	0,189	0,207	0,194	0,188	0,209	0,193	0,193	0,189	0,195	0,195	0,187	0,184	0,209	0,201	0,183	0,193
P42	0,178	0,221	0,206	0,200	0,213	0,188	0,200	0,213	0,191	0,202	0,194	0,203	0,209	0,216	0,194	0,215
P43	0,212	0,263	0,216	0,215	0,216	0,228	0,200	0,173	0,213	0,211	0,196	0,190	0,206	0,243	0,210	0,192
P44	0,237	0,233	0,228	0,224	0,220	0,203	0,211	0,222	0,235	0,219	0,214	0,206	0,220	0,223	0,214	0,214
P45	0,267	0,254	0,236	0,241	0,248	0,226	0,233	0,232	0,232	0,230	0,229	0,209	0,230	0,259	0,222	0,218