

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

MATEUS COLLARES WEIGERT

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-
GÁS EM GOLFADAS EM DUTOS VERTICAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

MATEUS COLLARES WEIGERT

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-GÁS
EM GOLFADAS EM DUTOS VERTICAIS**

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

Orientador: Prof. Raul Henrique Erthal, Mestre Eng.

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

CURITIBA

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-GÁS EM GOLFADAS EM DUTOS VERTICAIS", realizado pelo aluno Mateus Collares Weigert, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

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

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

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

Prof. Paulo Henrique Dias dos Santos, Dr.
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 18 de agosto de 2014.

Dedico este trabalho ao meu fiel colega e
companheiro de grades curriculares, Lucas Machado
de Figueiredo.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial:

À minha família e amigos por tudo que fizeram por mim. Não tenho palavras para descrever tamanha alegria que é tê-los em minha vida.

Aos Professores Raul Erthal e Rigoberto Morales pela atenção e confiança depositada em mim. Suas orientações foram cruciais para conclusão do trabalho.

Ao Reinaldo Justiniano pelas mais variadas conversas e pela valiosa ajuda prestada durante os experimentos, sempre passando dicas e tirando dúvidas. Sem ele, com certeza a construção da bancada não seria a mesma.

Ao Fernando Castillo e ao Rafael Alves pela ajuda fornecida durante a execução deste trabalho. Seus programas foram essenciais para conclusão da monografia e, além disso, sempre que me apareceram dúvidas eles estavam no laboratório para saná-las com o maior prazer.

Ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP - e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH - ANP/MCT (PRH10-UTFPR-CT)

“A vingança nunca é plena, mata a alma e a envenena”.

Seu Madruga

RESUMO

WEIGERT, Mateus C. **Caracterização do Escoamento Bifásico Líquido-Gás em Golfadas em Dutos Verticais**. 2014, 101 f. Monografia – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Escoamentos bifásicos líquido-gás ocorrem em vários ramos da indústria e dependendo da vazão das fases, das propriedades dos fluidos e da inclinação da tubulação o escoamento pode se apresentar em diferentes padrões, sendo o escoamento em golfadas o mais comum na indústria do petróleo. Para o aprimoramento dos processos, seleção e projeto de equipamentos envolvidos é importante prever as características deste tipo de escoamento, porém é um desafio devido à complexidade de interação entre as fases que se comportam de maneira intermitente no tempo e no espaço. Neste contexto, o objetivo da presente monografia é analisar a influência das vazões de gás e de líquido nos parâmetros característicos do escoamento bifásico de água-ar no padrão em golfadas em uma tubulação vertical. Os principais parâmetros característicos - velocidade e comprimento da bolha alongada, comprimento do pistão, fração de vazio e frequência de passagem das células unitárias - foram obtidos através das imagens de uma câmera com alta taxa de aquisição de imagens (125 *fps*) e utilizando o sensor de malha de eletrodos (*Wire-Mesh Sensor*). Os experimentos foram realizados numa bancada de testes instalada no LACIT (Laboratório de Ciências Térmicas-UTFPR) com uma altura de 3,9 metros e utilizando uma tubulação de 25,8 mm de diâmetro interno. Após o processamento dos dados foi verificado que o acréscimo na razão entre as velocidades superficiais das fases gerou o mesmo estímulo no comprimento da bolha alongada, no comprimento do pistão e na fração de vazio na região da bolha. Já a frequência de passagem da célula unitária elevou-se com o incremento na velocidade superficial do líquido e a velocidade da bolha alongada apresentou maiores valores quanto maior a velocidade superficial da mistura.

Palavras-chave: Escoamento bifásico, escoamento em golfadas, tubulação vertical.

ABSTRACT

WEIGERT, Mateus C. **Characterization of Gas-Liquid Slug Flow in Vertical Pipes**. 2014, 101 f. Monografia – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Gas-liquid two-phase flows occur in many branches of industry. The flow can occur in different patterns depending on the flow rates, the properties of the phases and inclination of the tube. Slug flow is the most common in the oil industry and to improve processes, selection/design of the equipment is important predict the characteristics of this type of flow, but it is a challenge due to the complexity of interaction between the phases, that behave intermittently in time and space. In this context, the aim of this paper is to analyze influence of the gas-liquid flow in the characteristic parameters of air-water slug flow along vertical pipes. The main characteristic parameters - velocity and length of the Taylor bubble, length of the liquid slug, void fraction and frequency - were obtained by a camera with high image acquisition rate and using the Wire-Mesh Sensor. The experimental work on two-phase vertical upward flow was carried out at the LACIT (Laboratório de Ciências Térmicas-UTFPR) using a 25.8 mm internal diameter and 3.9 meters long transparent pipe. Results show that the higher the ratio between gas and liquid superficial velocities, the bigger is the bubble length, the liquid slug and the void fraction. Likewise, it was noticed that the frequency increases as the liquid superficial velocity increases, and the Taylor bubble velocity increases as the mixture velocity rises.

Keywords: Two-phase flow, slug flow, vertical pipes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de escoamento multifásico. (SCHLUMBERGER, 2014)	19
Figura 2 – Padrões de escoamento líquido-gás em dutos horizontais. (MEDINA, 2011. Modificado pelo autor).....	20
Figura 3 - Padrões de escoamento em dutos verticais. (Shoham, 2006. Modificado pelo autor).....	21
Figura 4 – Esquema de escoamento em golfadas em um oleoduto. (DEVADRILL, 2014).....	22
Figura 5 - Caracterização do escoamento em golfadas. (NAKAYAMA, 2011. Modificado pelo autor).....	27
Figura 6 - Mapa de escoamento em duto vertical de 25 mm de diâmetro. (BRENNEN, 2005. Modificado pelo autor)	30
Figura 7 - Mapa de fluxo em dutos verticais de Griffith e Wallis (1961). (SHOHAM, 2006).....	31
Figura 8 - Escoamento em golfadas em duto vertical. (Autoria própria).....	32
Figura 9 - Esquema do sensor de malha de eletrodo.....	33
Figura 10 - Mapeamento do WMS.	34
Figura 11 - Esquema da bancada experimental.....	38
Figura 12 - Foto da seção de teste.....	39
Figura 13 – Dimensões da tubulação vertical da bancada.....	40
Figura 14 - Compressor PEG.....	41
Figura 15 – Reservatórios de ar.	41
Figura 16 - Sistema de medição de vazão de ar.....	42
Figura 17 - Bomba centrífuga e o inversor de frequência.	43
Figura 18 - Medidor Coriolis.	43
Figura 19 - Reservatório inferior e superior de água.	44

Figura 20 - Misturador.	44
Figura 21 - Caixa de acrílico.....	45
Figura 22 - Câmera e lente.....	46
Figura 23 - Sensor de malha de eletrodos.	48
Figura 24 - Painel do programa <i>LabView</i>	49
Figura 25 - Programa da câmera.	50
Figura 26 - Programa do sensor de malha de eletrodos.	51
Figura 27 - Grade de teste representada no mapa de fluxo.....	52
Figura 28 - Visualização do escoamento através da série temporal da fração de vazio.....	56
Figura 29 - Conversão do sinal da fração de vazio em um sinal binário.	56
Figura 30 - Tratamento de imagem.	58
Figura 31 - Sequência de detecção do nariz da bolha alongada.....	58
Figura 32 - Identificação da cauda da bolha alongada.....	59
Figura 33 - Zoom no mapa de fluxo.	60
Figura 34 - Pontos que não apresentaram o padrão golfadas.	61
Figura 35 - Dispersão da frequência para B3P10.	64
Figura 36 - Dispersão da frequência para B3P10, ajustada.....	64
Figura 37 - Dispersão da frequência para B3P10, após melhoria na programação. .	65
Figura 38 - Variação da velocidade da bolha.	67
Figura 39 - Variação do comprimento da bolha.....	67
Figura 40 - Variação do comprimento do pistão.....	68
Figura 41 - Variação da frequência de passagem das células unitárias.	68
Figura 42 - Velocidade da bolha em função da velocidade superficial da mistura. ...	69
Figura 43 - Comprimento da bolha alongada em função da razão das velocidades superficiais.	70

Figura 44 - Comprimento do pistão em função da razão das velocidades superficiais.	71
Figura 45 - Frequência de passagem da célula unitária em função da velocidade superficial de líquido.	71
Figura 46 - Fração de vazio em função da razão da velocidade superficial do gás pelo do líquido.....	72
Figura 47 - Desvio padrão em função da velocidade da bolha alongada.....	72
Figura E 1 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 1.	93
Figura E 2 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 3.	93
Figura E 3 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 4.	94
Figura E 4 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 6.	94
Figura E 5 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 8.	94
Figura E 6 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 10.	94
Figura E 7 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 11.	95
Figura E 8 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 1.	95
Figura E 9 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 3.	95
Figura E 10 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 4.	96
Figura E 11 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 6.	96
Figura E 12 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 8.	96
Figura E 13 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 10.	96
Figura E 14 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 11.	97
Figura E 15 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 1.	97
Figura E 16 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 3.	97
Figura E 17 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 4.	98
Figura E 18 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 6.	98

Figura E 19 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 8.	98
Figura E 20 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 10.	98
Figura E 21 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 11.	99
Figura E 22 - Histograma da frequência obtida no ponto 1.	99
Figura E 23 - Histograma da frequência obtida no ponto 3.	99
Figura E 24 - Histograma da frequência obtida no ponto 4.	100
Figura E 25 - Histograma da frequência obtida no ponto 6.	100
Figura E 26 - Histograma da frequência obtida no ponto 8.	100
Figura E 27 - Histograma da frequência obtida no ponto 10.	100
Figura E 28 - Histograma da frequência obtida no ponto 11.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grade de teste.....	51
Tabela 2 - Velocidades superficiais reais.	62
Tabela 3 - Média dos valores dos parâmetros característicos.	62
Tabela 4 - Erro relativo entre WMS e câmera.	63
Tabela 5 - Comparação entre valores obtidos pelo WMS e pela câmera após ajuste na programação.	66
Tabela 6 – Diferenças relativas entre os valores gerados pela câmera e pelo WMS após ajuste na programação.....	66
Tabela 7 - Dados médios da velocidade da bolha alongada.....	69
Tabela D1 - Velocidade superficial real.	88
Tabela D2 - Valores dos parâmetros característicos obtidos pelo WMS nos ensaios preliminares.	88
Tabela D3 - Valores dos parâmetros característicos obtidos pela câmera.	89
Tabela D4 - Desvio Padrão de cada parâmetro característico nos ensaios preliminares.	89
Tabela D5 - Valores dos parâmetros característicos gerados pela nova programação do WMS.	90
Tabela D6 - Desvio padrão do WMS após ajustes na programação.	91
Tabela D7 - Novo desvio padrão de cada parâmetro característico.	91

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

A	Área transversal da seção do tubo	[m ²]
A_o	Área do orifício	[m ²]
C	Coefficiente de descarga	[-]
d	Diâmetro da tubulação	[m]
d_i	Diâmetro interno da tubulação	[m]
d_o	Diâmetro do orifício	[m]
f	Frequência de passagem da célula unitária	[Hz]
Fr	Número adimensional de Froude	[-]
g	Aceleração da gravidade	[m ² /s]
j	Velocidade superficial da mistura	[m/s]
j_G	Velocidade superficial do gás	[m/s]
j_L	Velocidade superficial do líquido	[m/s]
L_B	Comprimento da bolha alongada	[m]
L_P	Comprimento do pistão de líquido	[m]
L_U	Comprimento da célula unitária	[m]
\dot{m}	Vazão mássica	[Kg/s]
\dot{m}_{PO}	Vazão mássica na placa de orifício	[Kg/s]
\dot{m}_{ST}	Vazão mássica na seção de teste	[Kg/s]
P	Pressão absoluta	[Pa]
P_1	Pressão absoluta à montante	[Pa]
P_{ST}	Pressão na seção de teste	[Pa]
Q	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
Q_L	Vazão volumétrica do líquido	[m ³ /s]

Q_{PO}	Vazão volumétrica na placa de orifício	[m ³ /s]
Q_{RO}	Vazão volumétrica no rotâmetro	[m ³ /s]
Q_{ST}	Vazão volumétrica na seção de teste	[m ³ /s]
R	Constante universal do ar	[J/(Kg.K)]
Re	Número de Reynolds	[-]
T	Temperatura	[K]
T_1	Temperatura à montante	[K]
T_{ST}	Temperatura na seção de teste	[K]
t_B	Tempo de passagem da bolha alongada	[s]
t_U	Tempo de passagem da célula unitária	[s]
t_P	Tempo de passagem do pistão	[s]
u_{RO}	Incerteza relativa do rotâmetro	[-]
u_A	Incerteza relativa da área da tubulação	[-]
u_{A_o}	Incerteza relativa da área do orifício	[-]
u_{β}	Incerteza relativa de beta	[-]
u_{CY}	Incerteza relativa dos coeficientes de descarga e expansão	[-]
u_{d_i}	Incerteza relativa do diâmetro interno da tubulação	[-]
u_{d_o}	Incerteza relativa do diâmetro do orifício	[-]
u_{j_G}	Incerteza relativa da velocidade superficial do gás	[-]
u_{j_L}	Incerteza relativa da velocidade superficial do líquido	[-]
u_P	Incerteza relativa da pressão	[-]
$u_{Q_{PO}}$	Incerteza relativa da vazão volumétrica da placa de orifício	[-]
u_T	Incerteza relativa da temperatura	[-]
V_B	Velocidade da bolha alongada	[m/s]
Y	Coefficiente de expansão	[-]

Letras gregas

α	Fração de vazio	[-]
α_B	Fração de vazio média na região da bolha alongada	[-]
α_L	Fração de vazio média na região do pistão	[-]
β	Relação entre os diâmetros do orifício e da tubulação	[-]
ΔP	Diferencial de pressão	[Pa]
ρ_1	Massa específica do gás à montante	[Kg/m ³]
ρ_{PO}	Massa específica na placa de orifício	[Kg/m ³]
ρ_{ST}	Massa específica na seção de teste	[Kg/m ³]

Índices

- ()₁ À montante
- ()_B Bolha alongada
- ()_G Gás
- ()_i Interno
- ()_j Mistura
- ()_L Líquido
- ()_o Orifício
- ()_P Pistão
- ()_{PO} Placa de orifício
- ()_{RO} Rotâmetro
- ()_{ST} Seção de teste
- ()_U Célula unitária

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contexto do Tema	19
1.2	Caracterização do Problema	23
1.3	Objetivos	24
1.4	Justificativa	24
1.5	Etapas do Trabalho	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	Escoamento bifásico	26
2.2	Parâmetros característicos	26
2.2.1	Velocidades superficiais	26
2.2.2	Comprimento da célula unitária, comprimento do pistão de líquido e comprimento da bolha alongada	27
2.2.3	Velocidade da bolha alongada	28
2.2.4	Frequência da célula unitária	29
2.2.5	Fração de vazio	29
2.3	Mapas de Fluxo	30
2.3.1	Mapas de fluxo com coordenadas dimensionais	30
2.3.2	Mapas de fluxo com coordenadas adimensionais	31
2.4	Escoamento vertical em golfadas	32
2.5	Sensor de malha de eletrodos	33
2.6	Revisão bibliográfica de escoamento bifásico líquido-gás	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Bancada experimental	38
3.2	Especificação técnica dos componentes da bancada	40
3.2.1	Compressor de ar	40
3.2.2	Reservatório de ar	41
3.2.3	Medidor de vazão volumétrica de ar	42
3.2.4	Bomba centrífuga	42
3.2.5	Medidor de vazão volumétrica de água	43
3.2.6	Reservatórios de água	43
3.2.7	Misturador	44
3.2.8	Tubulação em acrílico	45
3.2.9	Caixa retangular em acrílico	45
3.2.10	Câmera de alta taxa de aquisição de imagens	46
3.2.11	Sensor de malha de eletrodos	47
3.2.12	Medidor de pressão da seção de teste	48
3.3	Sistemas de aquisição de dados	49
3.3.1	Monitoramento da bancada de teste	49
3.3.2	Sistema de aquisição de imagens	49

3.3.3	Sistema de aquisição de dados do WMS	50
3.4	Grade de teste	51
3.5	Procedimentos operacionais	52
3.5.1	Partida da bancada	52
3.5.2	Desativar a bancada	53
3.5.3	Procedimentos de medição	54
3.6	Processamento dos dados	55
3.6.1	Processamento dos dados do WMS	55
3.6.2	Processamento das imagens	57
4	RESULTADOS	60
4.1	Pontos que não apresentaram bolha alongada	60
4.2	Velocidades superficiais reais dos experimentos	62
4.3	Valores dos parâmetros característicos	62
4.4	Valores dos parâmetros característicos após ajustes no programa	65
4.5	Análise dos resultados	68
4.5.1	Velocidade da bolha alongada	69
4.5.2	Comprimento da bolha alongada	70
4.5.3	Comprimento do pistão	70
4.5.4	Frequência de passagem da célula unitária	71
4.5.5	Fração de vazio da bolha alongada e do pistão	71
4.5.6	Desvio padrão	72
5	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO	78
	APÊNDICE B – CÁLCULO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS NA SEÇÃO DE TESTE	81
	APÊNDICE C – ANÁLISE DE INCERTEZAS	83
	APÊNDICE D – RESULTADOS	88
	APÊNDICE E – HISTOGRAMAS	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

Escoamentos multifásicos se caracterizam quando duas ou mais fases escoam simultaneamente através de uma tubulação, que muitas vezes devido à complexidade na modelagem matemática, são simplificados para o escoamento bifásico de líquido-gás.

Na Figura 1 observa-se um exemplo de escoamento multifásico em um duto horizontal. Nota-se a presença de três fases, na qual, o fluido azul por possuir maior massa específica, encontra-se na parte inferior da tubulação. Também é possível observar o nariz da bolha alongada localizada na região superior da tubulação. A fonte não referênciam quais são os fluidos.



Figura 1 - Exemplo de escoamento multifásico. (SCHLUMBERGER, 2014)

Durante o escoamento bifásico as fases se arranjam de diferentes formas conhecidas como padrões de escoamento. A variação dos padrões depende das vazões de líquido e de gás, das propriedades dos fluidos, das condições de operação e das características geométricas do duto (SOUZA, 2009). Na Figura 2 são mostrados esquemas com os padrões comumente encontrados no escoamento em tubulações horizontais.

Note que na Figura 2a, onde é apresentado o padrão de escoamento estratificado, as fases de líquido e gás são separadas pela gravidade, na qual a fase líquida escoam na parte inferior da tubulação e a gasosa escoam na região superior. Este escoamento ocorre para baixas vazões de gás e de líquido (SHOHAM,2006).

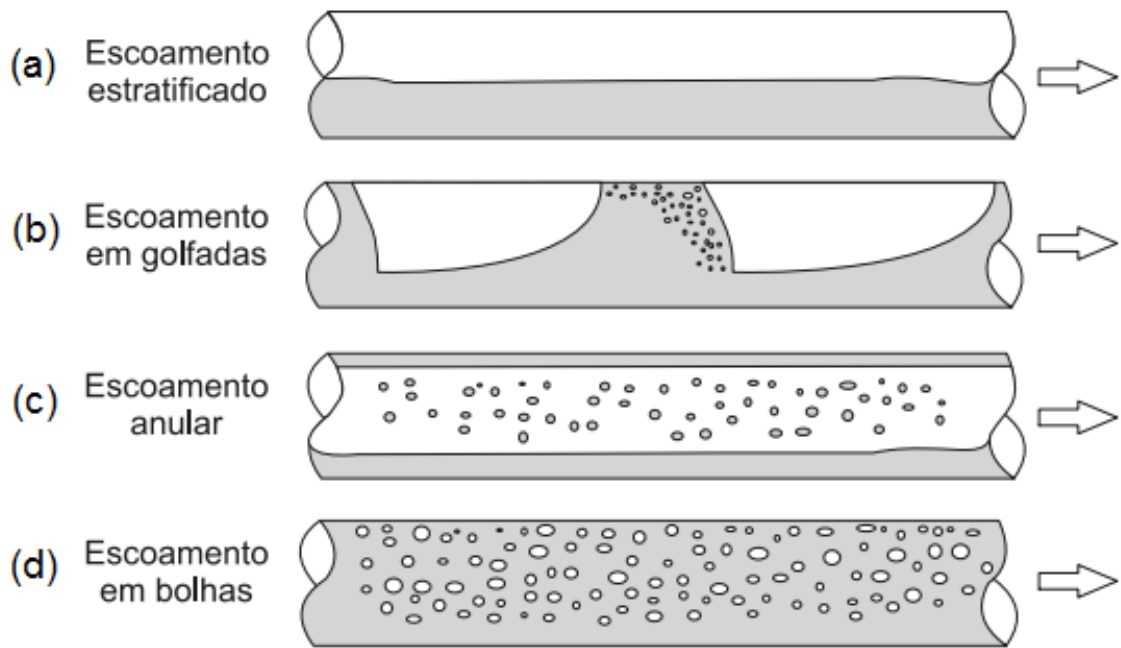


Figura 2 – Padrões de escoamento líquido-gás em dutos horizontais. (MEDINA, 2011. Modificado pelo autor)

Com o aumento da vazão de gás, ocorre o surgimento de bolhas alongadas bem definidas e de pistões de líquidos aerados (com bolhas), caracterizando o escoamento em golfadas (PANDOLFO, 2011), conforme a Figura 2b.

O padrão de escoamento anular, Figura 2c, ocorre para altas vazões de gás e se caracteriza pela presença de um filme líquido por toda extensão da tubulação, sendo mais espesso na parte inferior do duto devido ao efeito da gravidade, enquanto a fase gasosa escoava na região central. Pequenas bolhas se desprendem do filme líquido e são arrastadas pelo gás (SHOHAM,2006).

Para altas vazões de líquido, a fase líquida se torna contínua e nota-se a presença de bolhas discretas que tendem a ocupar a região superior da tubulação devido ao efeito do empuxo (PANDOLFO, 2011), como esquematizado na Figura 2d.

Em dutos verticais, os principais padrões de escoamentos são: Bolhas, Golfadas, Agitado, Anular e Disperso. A Figura 3 esquematiza esses padrões de escoamento.

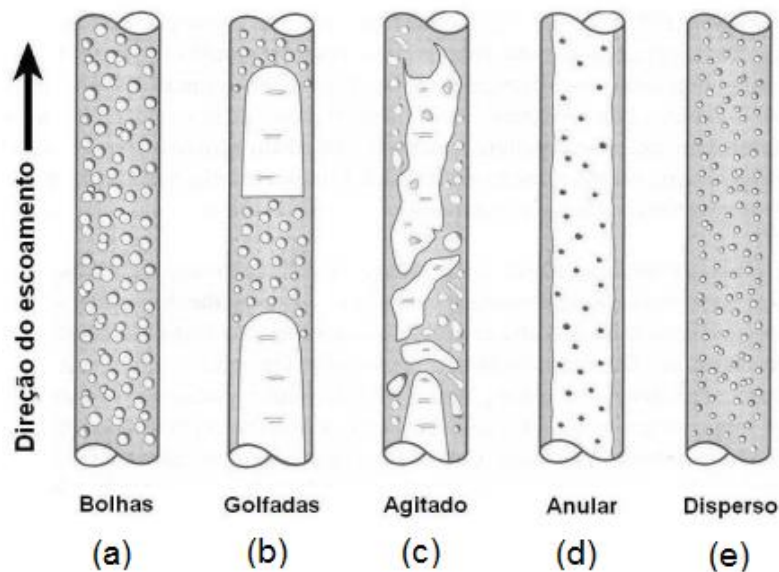


Figura 3 - Padrões de escoamento em dutos verticais. (Shoham, 2006. Modificado pelo autor)

Segundo Soares (2010), o padrão bolhas, conforme na Figura 3a, ocorre para baixas vazões de gás e de líquido, na qual, pequenas bolhas desenvolvem um movimento ascendente oscilatório (em “zigzag”) com baixa turbulência. Quando a vazão de líquido é muito elevada, o padrão de bolhas se desenvolve para disperso, Figura 3e, e é identificado pela presença de bolhas discretas carregadas pelo meio líquido. Mendonça e Medeiros (2008) citam que o diâmetro da bolha no escoamento disperso é menor do que os evidenciados no padrão bolhas, diminuindo a possibilidade de coalescência das mesmas.

O escoamento bifásico de líquido-gás em golfadas apresenta bolhas alongadas, também conhecidas como bolhas de Taylor, que possuem um tamanho aproximadamente igual ao da tubulação, como observado na Figura 3b. Enquanto a bolha sobe, um filme líquido escoar na direção oposta pelas paredes da tubulação. Entre as bolhas de Taylor, pistões de líquido aerados se intercalam caracterizando um escoamento intermitente (MENDONÇA; MEDEIROS, 2008).

Escoamento agitado, Figura 3c, é considerado uma transição entre os padrões em golfadas e o anular e caracteriza-se por um escoamento caótico, sem definições claras das interfaces das fases. Já no anular, o gás escoar no interior do tubo envolvido por um filme líquido. O núcleo gasoso normalmente é composto de gotículas que são arrastadas, caracterizando um aerossol (MENDONÇA; MEDEIROS, 2008), como visualizado na Figura 3d.

As principais diferenças entre os escoamentos em dutos horizontais e verticais se deve à aceleração da gravidade. Na Figura 2 pode-se perceber que em todos os padrões de escoamento horizontais a fase gasosa, que possui menor massa específica, tende a escoar na região superior da tubulação. Já na Figura 3, Shoham (2006) explica que o escoamento vertical tende a ser simétrico em relação ao eixo da tubulação por apresentar menor influência da gravidade na forma das bolhas.

O escoamento em golfadas, dentre os padrões apresentados, é o mais presente em aplicações industriais, tais como evaporadores, condensadores, reatores químicos, motores de combustão interna, poços de petróleo e oleodutos. Um esquema, representado pela Figura 4, contém um duto de uma linha de produção de petróleo em corte onde se observa uma bolha alongada, caracterizando o escoamento em golfadas.

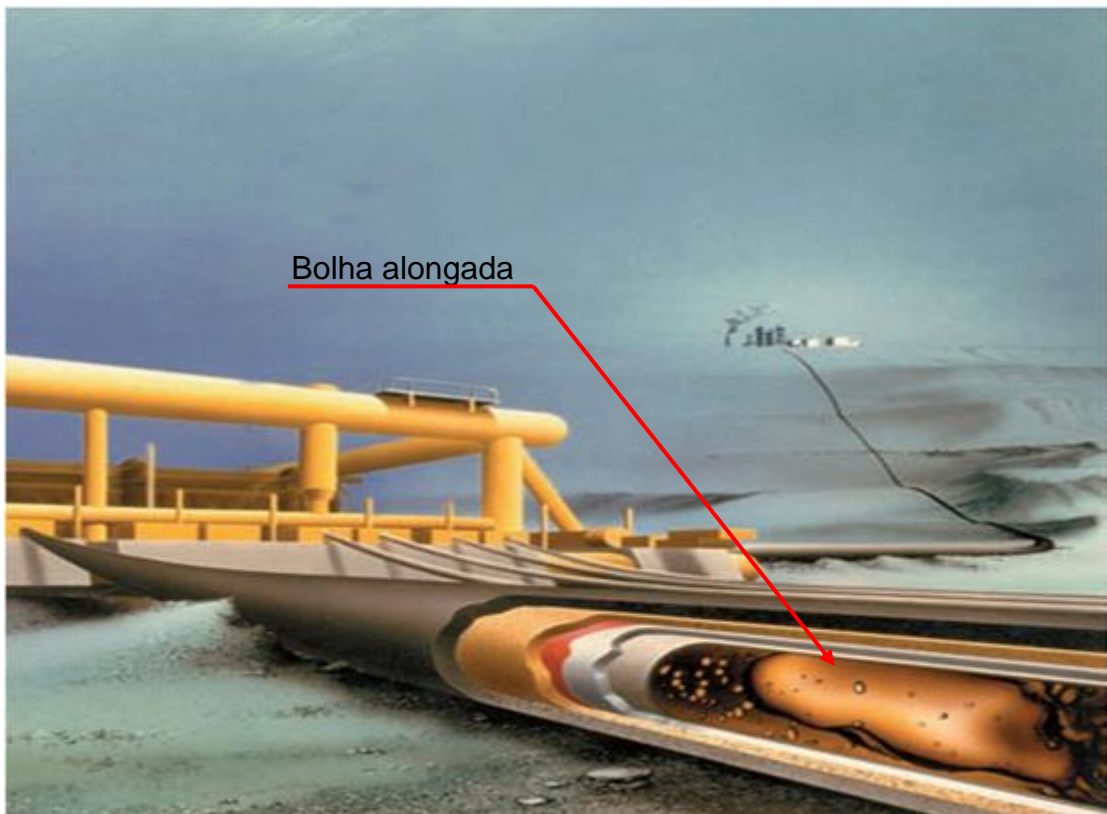


Figura 4 – Esquema de escoamento em golfadas em um oleoduto. (DEVADRILL, 2014)

Por estar presente em várias aplicações industriais, fica evidente a importância de compreender os fenômenos físicos envolvidos nos escoamentos bifásicos a fim de permitir o aprimoramento dos processos e seleção/projeto de equipamentos.

Porém há uma complexidade no escoamento em golfadas que é devida ao fato do escoamento ser intermitente, ou seja, a frequência das fases ao longo do duto e do tempo não é periódica, mesmo quando as vazões do líquido e do gás na entrada sejam constantes (FRANKLIN, 2004).

Uma das maneiras de compreender este fenômeno é avaliando o comportamento dos parâmetros característicos do escoamento (comprimento da célula unitária, do pistão de líquido e da bolha alongada, velocidade da bolha alongada, frequência da célula unitária e fração de vazio). Com o conhecimento destes parâmetros é possível caracterizar o escoamento em golfadas e fornecer dados de entrada para o desenvolvimento de modelos matemáticos para este fenômeno.

1.2 Caracterização do Problema

Escoamentos bifásicos líquido-gás vêm sendo amplamente estudados devido às suas diversas aplicações. Prever o padrão de escoamento de um processo industrial auxilia no dimensionamento dos dutos, equipamentos e acessórios envolvidos. Modelos matemáticos normalmente são usados para este fim, no entanto, devido à complexidade dos fenômenos físicos envolvidos, é comum alimentá-los com correlações obtidas a partir de dados experimentais.

Devido à dependência dos simuladores computacionais (resultante dos modelos matemáticos) de correlações empíricas, e considerando a intermitência do escoamento, existe a necessidade de caracterizar detalhadamente o escoamento bifásico, de forma a avaliar o comportamento físico da evolução das fases (estruturas).

Especificamente, o escoamento bifásico em golfadas é caracterizado por uma sucessão intermitente de estruturas bem definidas. Wallis (1969) introduziu o conceito de célula unitária que é composto por uma bolha alongada (bolha de Taylor) seguida por um pistão de líquido contendo pequenas bolhas dispersas. Estas estruturas evoluem de maneira intermitente, podendo existir coalescência e quebra de bolhas ao longo do escoamento.

1.3 Objetivos

Neste trabalho é realizado um estudo experimental do comportamento do escoamento bifásico de água e ar no padrão em golfadas em dutos verticais para diferentes combinações de vazão.

Os testes experimentais são realizados numa bancada de testes, devidamente equipada para este trabalho e instalada no Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT) da UTFPR-CT. Os parâmetros característicos do escoamento bifásico em golfadas (comprimento de pistão, comprimento da bolha, velocidade translacional da bolha, fração de vazio e frequência de passagem das células unitárias) são extraídos experimentalmente utilizando o sensor de malha de eletrodos (*Wire-Mesh Sensor*) e uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens. Na sequência, é verificada a influência da variação das velocidades superficiais de cada fase nos valores destes parâmetros.

1.4 Justificativa

Devido à complexidade do padrão em golfadas se comportar de maneira intermitente no tempo e no espaço, é de fundamental importância levantar experimentalmente os parâmetros característicos do escoamento. Com as medidas experimentais é possível obter uma melhor compreensão dos fenômenos físicos envolvidos, além de servir como dados de entrada de simulações numéricas, para validação de modelos matemáticos e aproveitamento das imagens para melhorias no programa de reconhecimento de imagem e do sensor de malha de eletrodos.

Portanto, esta proposta justifica-se, pois, com os parâmetros característicos obtidos para cada combinação de vazões, será possível avaliar o comportamento físico da evolução das fases no escoamento em golfadas em dutos verticais.

1.5 Etapas do Trabalho

Este estudo está dividido em um total de cinco capítulos e cinco apêndices.

No primeiro capítulo foi feita uma introdução ao escoamento bifásico e seus principais padrões de escoamento, dentre eles, foi explicada a importância do padrão em golfadas na indústria. Para finalizar, foram mostrados os objetivos a serem atingidos e as justificativas para desenvolvimento deste estudo.

No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica, citando e explicando os termos técnicos e assuntos relevantes utilizados no trabalho. O capítulo termina com as revisões bibliográficas de trabalhos experimentais similares ou que agreguem algum conhecimento ao assunto.

No terceiro capítulo é feita a descrição do circuito experimental, apresentando os equipamentos e os programas computacionais utilizados para realização dos experimentos. Em seguida é definida a grade de teste, junto com os procedimentos aplicados antes, durante e depois dos testes. Para finalizar, são explicados os processamentos de dados realizados para obter os parâmetros característicos.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos junto com as análises feitas com base neles, e no quinto capítulo, a conclusão do trabalho.

No Apêndice A é explicado o processo de calibração da placa de orifício utilizada para medir a vazão de gás na bancada e no Apêndice B é apresentado o cálculo das velocidades superficiais na seção de teste. No Apêndice C é feita a análise de incerteza experimental contida nos valores das velocidades superficiais. No Apêndice D estão as médias todos os valores obtidos para as três baterias de testes e no Apêndice E constam os histogramas de todos os dados processados, para todos os pontos da grade de teste, obtidos pela primeira bateria.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos teóricos necessários para um melhor entendimento do trabalho, assim como algumas investigações feitas a respeito do assunto.

Primeiramente é apresentado o escoamento bifásico, em seguida são mostrados os parâmetros característicos que identificam este tipo de escoamento, a definição de mapas de fluxo, e então, é tratado do escoamento vertical em golfadas. Para finalizar são abordados na revisão bibliográfica alguns trabalhos que tratam de escoamentos bifásicos líquido-gás.

2.1 Escoamento bifásico

Escoamento bifásico se caracteriza quando duas fases escoam simultaneamente através de uma tubulação. É um fenômeno mais complexo que o monofásico por causa da distribuição espacial das duas fases (DUKLER; HUBBARD, 1975).

Conforme variação da vazão das fases, da geometria da tubulação, das condições de operação e das propriedades físicas dos fluidos, o padrão de escoamento pode ser alterado (SOUZA, 2009).

2.2 Parâmetros característicos

Para estudar escoamentos bifásicos é necessário definir alguns termos e parâmetros, tais como: velocidades superficiais, comprimento da célula unitária, comprimento do pistão de líquido, comprimento da bolha alongada, velocidade da bolha alongada, frequência da célula unitária e fração de vazio.

2.2.1 Velocidades superficiais

Como em escoamentos bifásicos há a presença de duas fases distintas, é necessário diferenciar as velocidades de cada fase. As velocidades superficiais do líquido e do gás, j_L e j_G , são aproximadas pela razão da vazão volumétrica da referida fase (Q) pela área transversal da seção do duto (A), conforme a equação (1).

$$j_L = \frac{Q_L}{A} \quad e \quad j_G = \frac{Q_G}{A} \quad (1)$$

A soma de j_L e j_G resulta na velocidade superficial da mistura (j), observado na equação (2).

$$j = j_L + j_G \quad (2)$$

2.2.2 Comprimento da célula unitária, comprimento do pistão de líquido e comprimento da bolha alongada

Na Figura 5, que esquematiza um escoamento bifásico ascendente numa tubulação vertical, é possível identificar o comprimento do pistão de líquido (L_p), definido como a distância entre duas bolhas alongadas, o comprimento da bolha alongada (L_B), também conhecida como bolha de Taylor, que é a distância compreendida entre o nariz e a cauda da bolha, e o comprimento da célula unitária (L_U), definido como a soma de L_p e L_B .

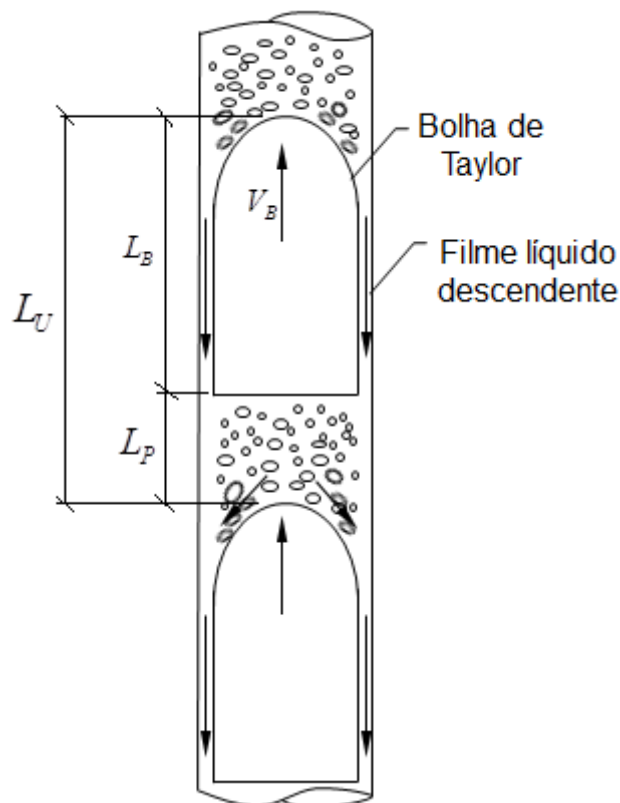


Figura 5 - Caracterização do escoamento em golfadas. (NAKAYAMA, 2011. Modificado pelo autor)

2.2.3 Velocidade da bolha alongada

Velocidade da bolha alongada (V_B), representada na Figura 5, é um parâmetro importante no escoamento em golfadas. É afetada pelo gradiente de pressão no duto e pela quantidade de líquido na frente do nariz da bolha, que, quanto maior é o volume de líquido, maior será a resistência de translação e, portanto, menor a velocidade da bolha.

Esse parâmetro é definido como a razão entre o comprimento da bolha alongada (L_B) e o tempo (t_B) em que a bolha leva para passar por uma determinada seção da tubulação, representada pela equação (3).

$$V_B = \frac{L_B}{t_B} \quad (3)$$

Porém, devido à velocidade do pistão ser menor que a da bolha, este comprimento tende a aumentar, afetando o valor da velocidade, mas por dificuldade em encontrar a cauda em meio à aeração, a velocidade do pistão é considerada igual à da bolha.

Para tentar contornar esse possível erro na determinação da velocidade da bolha alongada nos experimentos, o cálculo foi feito como a distância percorrida pelo nariz da bolha dividido pelo intervalo de tempo em que isso ocorre.

Nicklin *et al.* (1962) apresenta a equação (4) que pode ser utilizada para calcular a velocidade translacional da bolha alongada.

$$V_B = 1,2j + 0,35\sqrt{gd_i} \quad (4)$$

Onde j é a velocidade superficial da mistura, g a aceleração da gravidade e d_i o diâmetro interno da tubulação. O segundo termo representa a velocidade da bolha alongada em uma tubulação vertical com velocidade superficial de líquido nula. O primeiro termo é o acréscimo na velocidade da bolha quando ocorre o escoamento bifásico.

2.2.4 Frequência da célula unitária

É a frequência de repetição da célula unitária no escoamento (f) e é definida como o inverso do tempo em que a célula unitária leva para passar por uma determinada seção da tubulação (t_U), como mostrado na equação (5).

$$f = \frac{1}{t_U} \quad (5)$$

Como a célula unitária é composta pela bolha alongada mais o pistão, resulta-se nas equações (6) e (7):

$$L_U = L_B + L_P \quad (6)$$

$$t_U = t_B + t_P \quad (7)$$

Onde t_P é o tempo de passagem do pistão e é definido pela equação (8). Note que a velocidade do pistão é aproximada para a velocidade da bolha.

$$t_P = \frac{L_P}{V_B} \quad (8)$$

Substituindo as equações (3), (7) e (8) na equação (5), obtemos a equação(9).

$$f = \frac{V_B}{L_B + L_P} \quad (9)$$

2.2.5 Fração de vazio

Fração de vazio (α) é definida como a razão entre a área da seção transversal ocupada pelo gás (A_G) e a área total da tubulação (A), conforme a equação (10).

$$\alpha = \frac{A_G}{A} \quad (10)$$

Pode ser calculada a fração de vazio média na região da bolha alongada (α_B) ou na região do pistão (α_P).

2.3 Mapas de Fluxo

São mapas que relacionam os padrões de escoamento com as vazões ou com a velocidade superficial das fases, podendo ser plotados em coordenadas dimensionais ou adimensionais.

2.3.1 Mapas de fluxo com coordenadas dimensionais

Os mapas de fluxo são normalmente elaborados em coordenadas dimensionais devido à grande quantidade de parâmetros característicos existentes nos escoamentos bifásicos. Por isso existem vários mapas deste tipo e cada um é específico para os fluidos e para as condições em que foram desenvolvidos os experimentos (LUBNICKI, 2011).

A Figura 6 é um exemplo de um mapa de fluxo com coordenadas dimensionais desenvolvido por Brennen (2005). Neste mapa é possível observar a influência das vazões das fases no tipo de padrão de escoamento. Por exemplo, para uma vazão superficial de líquido (j_L) de 1 m/s e uma vazão superficial de gás (j_G) de 10^{-1} m/s o escoamento encontra-se no padrão de bolhas. Aumentando gradativamente o valor de j_G o escoamento vai evoluindo para golfadas, agitado e após um j_G de aproximadamente 10 m/s o padrão se torna anular.

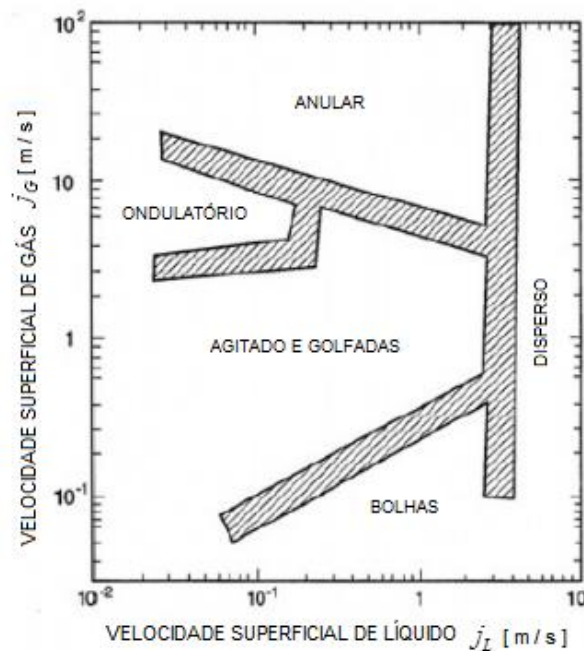


Figura 6 - Mapa de escoamento em duto vertical de 25 mm de diâmetro. (BRENNEN, 2005. Modificado pelo autor)

2.3.2 Mapas de fluxo com coordenadas adimensionais

Diferente dos mapas dimensionais, os adimensionais foram elaborados para generalizar seu uso. Para isso levam em conta várias propriedades dos fluidos ou do escoamento através de grupos adimensionais e, portanto, são mais gerais ou abrangentes. (LUBNICKI, 2011)

Na Figura 7 é possível prever qual será o padrão do escoamento apenas conhecendo características básicas do escoamento, como velocidades superficiais das fases, gravidade e diâmetro interno da tubulação.

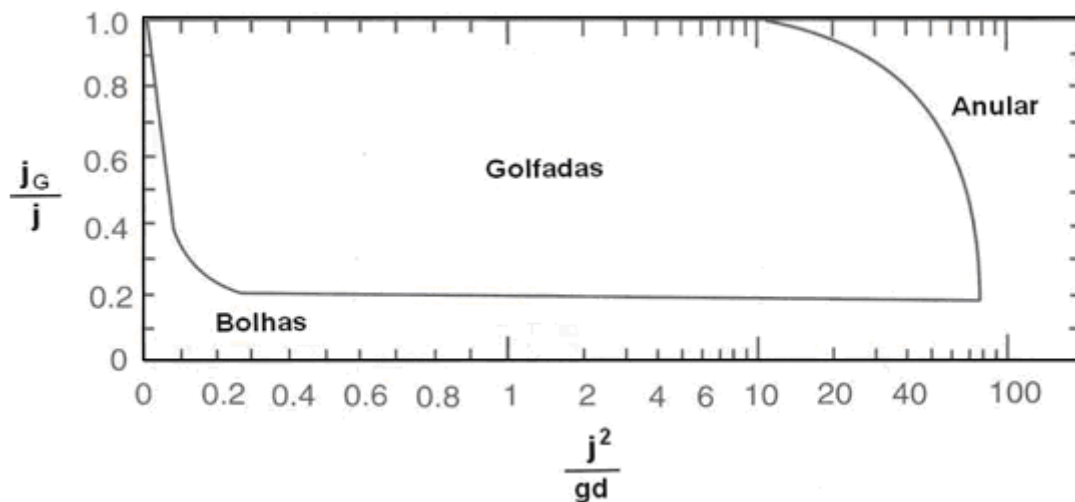


Figura 7 - Mapa de fluxo em dutos verticais de Griffith e Wallis (1961). (SHOHAM, 2006)

O número adimensional representando no eixo das abscissas é o de Froude elevado ao quadrado. Onde o número de Froude é definido pela equação (11) e elevando ao quadrado se obtém a equação (12).

$$Fr = \frac{j}{\sqrt{gd}} \quad (11)$$

$$Fr^2 = \frac{j^2}{gd} \quad (12)$$

2.4 Escoamento vertical em golfadas

No escoamento vertical em golfadas a maior quantidade de gás se apresenta no formato de bolha alongada, também conhecida como bolha de Taylor, ocupando a porção central da seção transversal e o líquido escoando pelas paredes do tubo (SHOHAM, 2006).

Utilizando a câmera de alta taxa de aquisição de imagens foram obtidas várias imagens de um escoamento em golfadas na seção de teste da bancada. A Figura 8 é composta de quatro imagens, da mesma bolha alongada, escolhidas para representação do escoamento vertical em golfadas. Observa-se o nariz, o corpo e a cauda da bolha alongada, bolhas dispersas na cauda formando a região de esteira, bolhas dispersas no pistão e, praticamente, a ausência de gás no filme líquido.

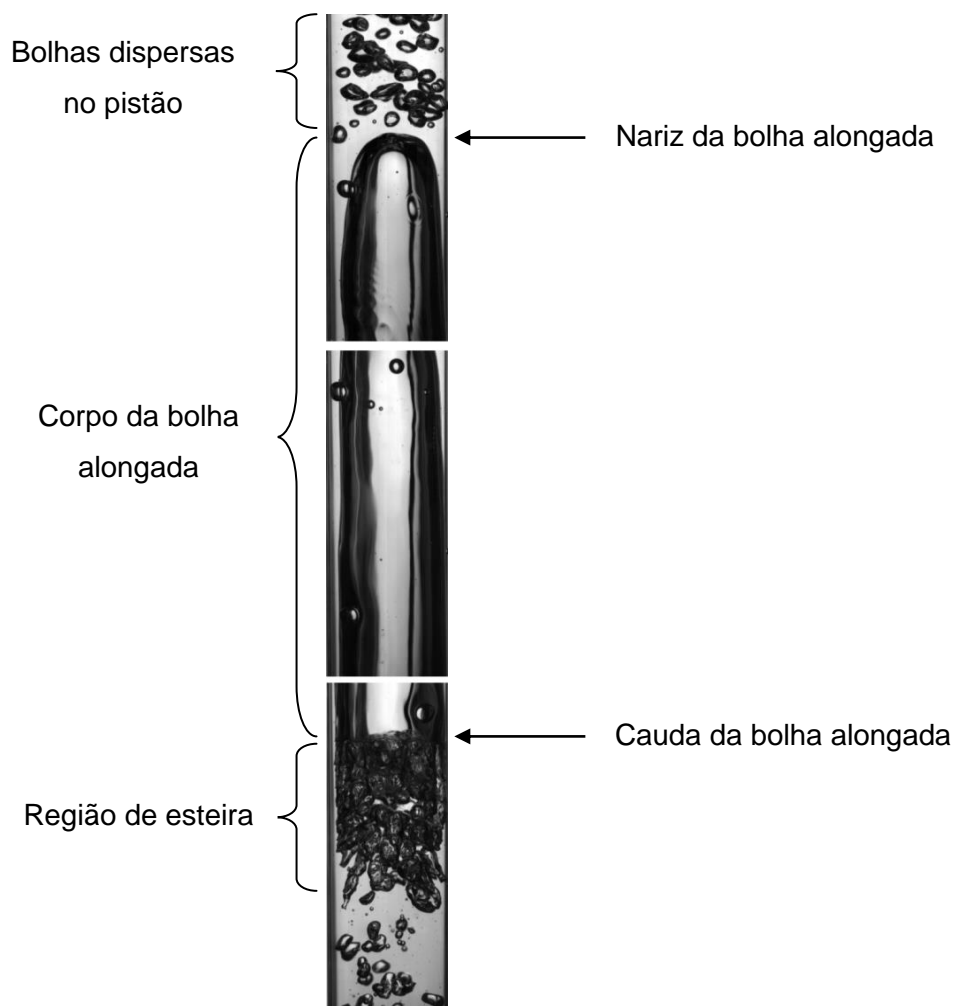


Figura 8 - Escoamento em golfadas em duto vertical. (Autoria própria¹)

¹ As indicações de autoria de figuras ou tabelas, quando omitidas são do próprio autor.

2.5 Sensor de malha de eletrodos

O sensor de malha de eletrodos, também chamado de WMS (Wire-Mesh Sensor), permite determinar a distribuição de fases na seção transversal da tubulação. Ele é composto por uma placa que possui dois arranjos de fios paralelos de aço inoxidável e cada arranjo é perpendicular entre si. Os números de fios variam de acordo com o diâmetro da tubulação ou qualidade requerida dos dados experimentais. Na Figura 9 são esquematizados dois WMS em série instalados em uma tubulação.

Seu princípio de funcionamento é um mapeamento da seção transversal do escoamento baseado na diferença da capacitância elétrica entre as duas fases. Para isso, o primeiro arranjo de eletrodos a entrar em contato com o fluido são excitados eletricamente, se caracterizando como emissor, enquanto o outro arranjo funciona como receptor (SHARAF ET AL., 2011).

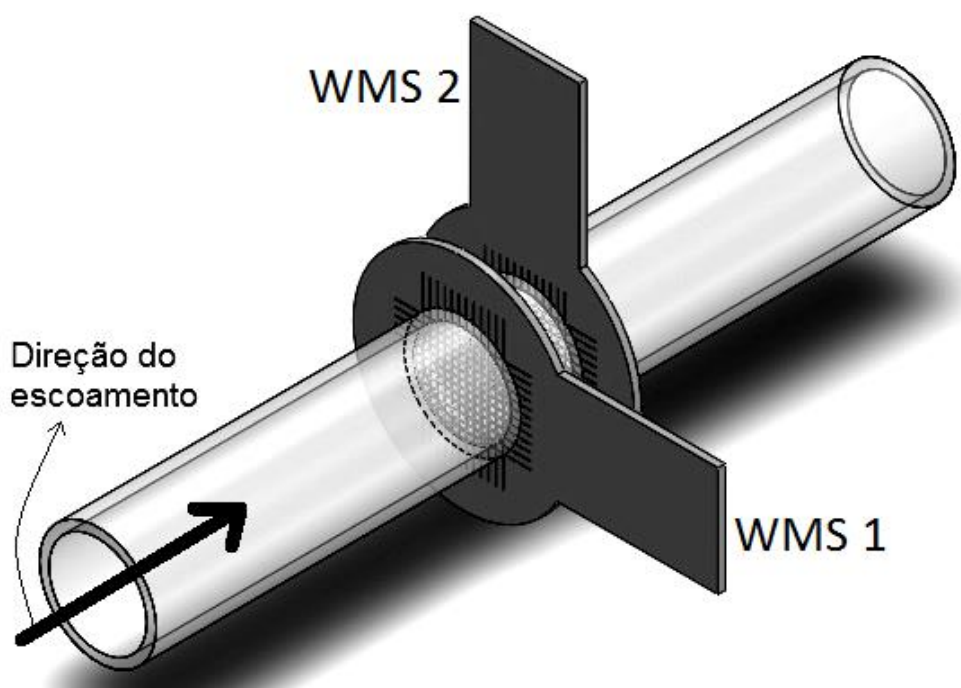


Figura 9 - Esquema do sensor de malha de eletrodo.

Na Figura 10 é apresentado um exemplo de mapeamento de um escoamento vertical bifásico água-ar no padrão golfadas gerado por dois WMS e, cada um é constituído por dois arranjos de 12 fios cada (12x12), na qual os pixels azuis representam apenas o escoamento da água e o vermelho escuro apenas do ar. É possível observar, que no centro do WMS 1 escoam a fase gasosa envolta por um

filme líquido e no WMS 2 escoam apenas líquido. Então, conhecendo a distância entre os dois e o instante de tempo em que a bolha surge em cada um, é possível calcular a velocidade da bolha.

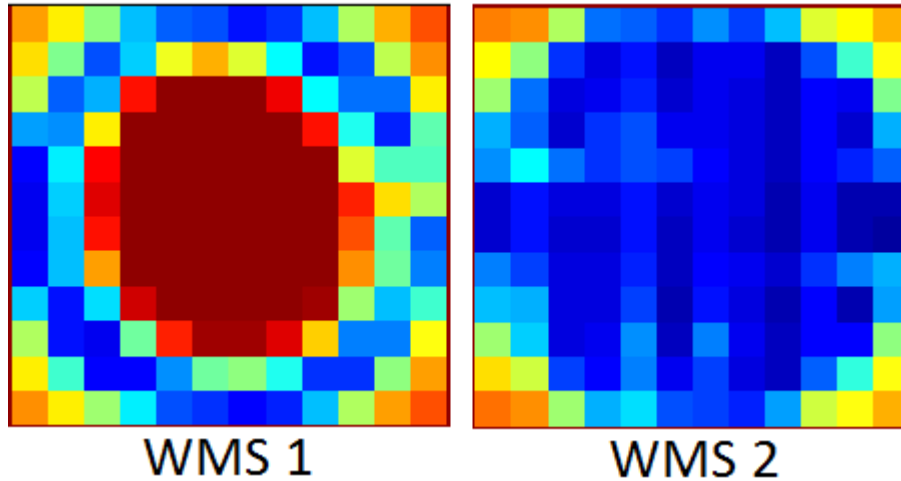


Figura 10 - Mapeamento do WMS.

2.6 Revisão bibliográfica de escoamento bifásico líquido-gás

Com intuito de conhecer novas técnicas de visualização de escoamento, de fatores que alteram seus padrões e os parâmetros característicos, foi feito uma busca em trabalhos que possam servir como referência para este.

Mi *et al.* (2000) utilizando sensores não intrusivos, um magnético que capta informações hidrodinâmicas e um de impedância para obter velocidade da golfada, fração de vazio, frequência de passagem da célula unitária e os comprimentos da bolha de Taylor e do pistão de líquido, realizaram um estudo experimental do escoamento vertical em golfadas. Analisando os dados obtidos, mostraram que a velocidade de líquido é mínima perto da região da cauda da bolha e o valor pode ser negativo ou positivo dependendo das condições do escoamento. Além disso, baseado nos resultados experimentais, foi desenvolvida uma correlação que permite mensurar a fração de vazio do pistão de líquido.

Hout *et al.* (2001) realizaram um estudo experimental em dois tubos com diâmetros diferentes (0,024 e 0,054 m) para várias condições de escoamento, onde as medições foram realizadas por um sensor de fibra óptica que detecta a passagem da interface do líquido/gás. Esta técnica permite mensurar as velocidades instantâneas do nariz e da cauda da bolha alongada, além do comprimento da

golfada. Os resultados obtidos foram comparados com correlações empíricas retiradas da literatura e concluíram que, para o tubo de menor diâmetro, a velocidade da bolha de Taylor pode ser aproximada pela equação de Nicklin. Já para o duto de maior diâmetro a velocidade de translação da bolha permanece notavelmente maior do que a prevista por Nicklin, mesmo perto da saída da tubulação.

Mudde e Saito (2001) realizaram um estudo a respeito da similaridade hidrodinâmica entre o escoamento bolhas em uma tubulação com o líquido estagnado e escoando. A mistura bifásica de água e ar passava através de um duto com 14,9 mm de diâmetro interno e 8 m de altura e na seção de teste, os parâmetros característicos, tais como, velocidade superficial, fração de vazio, velocidade da bolha e tamanho da bolha, foram mensurados utilizando um sensor laser e quatro pontos de fibra óptica. Na média, a fração de vazio foi de 5,2% para bolhas com o líquido estagnado (velocidade superficial de líquido igual a zero) e de 5,5% para o escoamento com velocidade superficial do líquido de 0,175 m/s. Pelo ponto de vista hidrodinâmico, as duas formas de operação foram muito similares e em muitos aspectos foi verificado uma superposição das características das bolhas nos dois casos.

Silva (2006) analisa a influência da oscilação da tubulação vertical nos padrões de escoamento bifásico de água e ar em dutos verticais. Variando a oscilação da tubulação em até 1 Hz para diversas combinações de vazões superficiais, concluiu que os padrões de escoamento permaneceram praticamente inalterados. Porém, para escoamento em golfadas, notou um aumento linear da perda de carga com o aumento da oscilação da tubulação. Desta forma, a vibração da tubulação devido ao escoamento, não afetará o mapa de fluxo.

Rodrigues (2008) apresenta um estudo do estado da arte das correlações empíricas abordadas na literatura para calcular a velocidade da bolha alongada e frequência de passagem da célula unitária no escoamento bifásico líquido-gás em golfadas em dutos horizontais, porém, algumas correlações também se aplicam para escoamento vertical. O autor faz uma análise comparativa entre os resultados gerados pelas correlações com os dados experimentais obtidos da literatura. Nesta análise, chega-se a um erro relativo de 20% para o escoamento turbulento e 40%

para escoamento em regime laminar. A explicação para esses erros deve-se ao fato que poucas correlações levam em consideração as propriedades dos fluidos e inclinação da tubulação. Uma das conclusões que obteve foi que há uma dependência da frequência das células unitárias com a viscosidade do líquido, gerando um erro maior na frequência calculada pelas correlações no escoamento com líquido de alta viscosidade.

Bueno (2009) por meio de sensores de impedância, variando as velocidades superficiais das fases e o ângulo de inclinação da tubulação (variando de horizontal até vertical), realizou uma análise do comportamento dos parâmetros do escoamento bifásico de água e ar em função das vazões e das inclinações. Concluiu que o comprimento da bolha não depende da vazão de gás, mas sim, da razão líquido/gás e que o comprimento do pistão não apresenta uma correlação com os outros parâmetros. Verificou que para uma mesma velocidade superficial de mistura e mesma inclinação da tubulação, há dois valores de velocidade da bolha. Segundo seus dados experimentais, quando $j_G / j_L > 1,8$ ocorre um aumento súbito de V_B para as inclinações entre 30° e 75°.

Kaji e Azzopardi (2009) avaliaram o efeito do diâmetro da tubulação no escoamento bifásico líquido-gás em dutos verticais, particularmente, na periodicidade das estruturas bifásicas. Com uma incerteza de medição no escoamento de ar de 5% e 7% no de água, variando o diâmetro de 0,5 até 70 mm e utilizando um sensor desenvolvido por Fossa (1998), concluíram que as correlações citadas apresentam melhores resultados para diâmetros de 20 a 30 mm e que a espessura média de filme e a taxa de fluxo de gás nas transições de golfadas/agitado e agitado/anular aumentam com o aumento do diâmetro. Por outro lado, o gradiente de pressão, frequência de passagem da célula unitária e velocidades diminuem.

Sturza e Kovalski (2010) obtêm os parâmetros característicos, do escoamento bifásico de água e ar em golfadas com mudança de direção da tubulação, utilizando uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens. Neste trabalho apresentam uma metodologia para tratamento e análise das imagens obtidas pela câmera por meio de um algoritmo computacional, implementado no ambiente MatLab®. Concluem que essa metodologia é satisfatória.

Nakayama (2011), por meio de um programa computacional, analisa os modelos para reconhecimento de padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos verticais, comparando-os com dados experimentais que obteve da literatura, além disso, avalia a influência da viscosidade do fluido, diâmetro da tubulação e pressão de operação. Por meio de análises comparativas, concluiu que existem divergências entre os modelos de transição. Por exemplo, entre os modelos de transição de bolhas discretas para o padrão pistonado, verificou que o modelo de Taitel *et al.* (1980) apresentou a melhor concordância com os dados experimentais para pequenos diâmetros de tubos (25 mm). Observou também, que o aumento do diâmetro do tubo não influencia na transição entre esses dois padrões e que os modelos não são apropriados para prever essa transição para variações da viscosidade do fluido.

Alves (2013) realizou um experimento em tubulação horizontal, para verificar a influência da pressão no escoamento em golfadas, utilizando uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens (500 *fps*) e transdutores de ultrassom. Concluiu que mantendo as vazões volumétricas das fases constantes e variando a pressão até 6 bar, não há alteração significativa nos parâmetros de escoamento. Entretanto, mantendo as vazões mássicas constantes e variando a pressão até 6 bar, há um aumento na frequência de passagem da célula unitária e uma diminuição na velocidade da bolha e no comprimento da bolha. Não observando uma tendência no comprimento do pistão.

Neste cenário espera-se que o presente trabalho promova um avanço para o estado da arte vigente sobre o estudo de escoamento bifásico de água e ar no padrão em golfadas e em dutos verticais, servindo como referência para futuros estudos nesta área.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Bancada experimental

A bancada experimental, ilustrada na Figura 11 é composta por uma tubulação vertical, onde se encontra a seção de teste, por linhas de água e de ar e pelo misturador que é responsável pela combinação das vazões de gás e de líquido gerando o escoamento bifásico, posicionado na base da coluna.

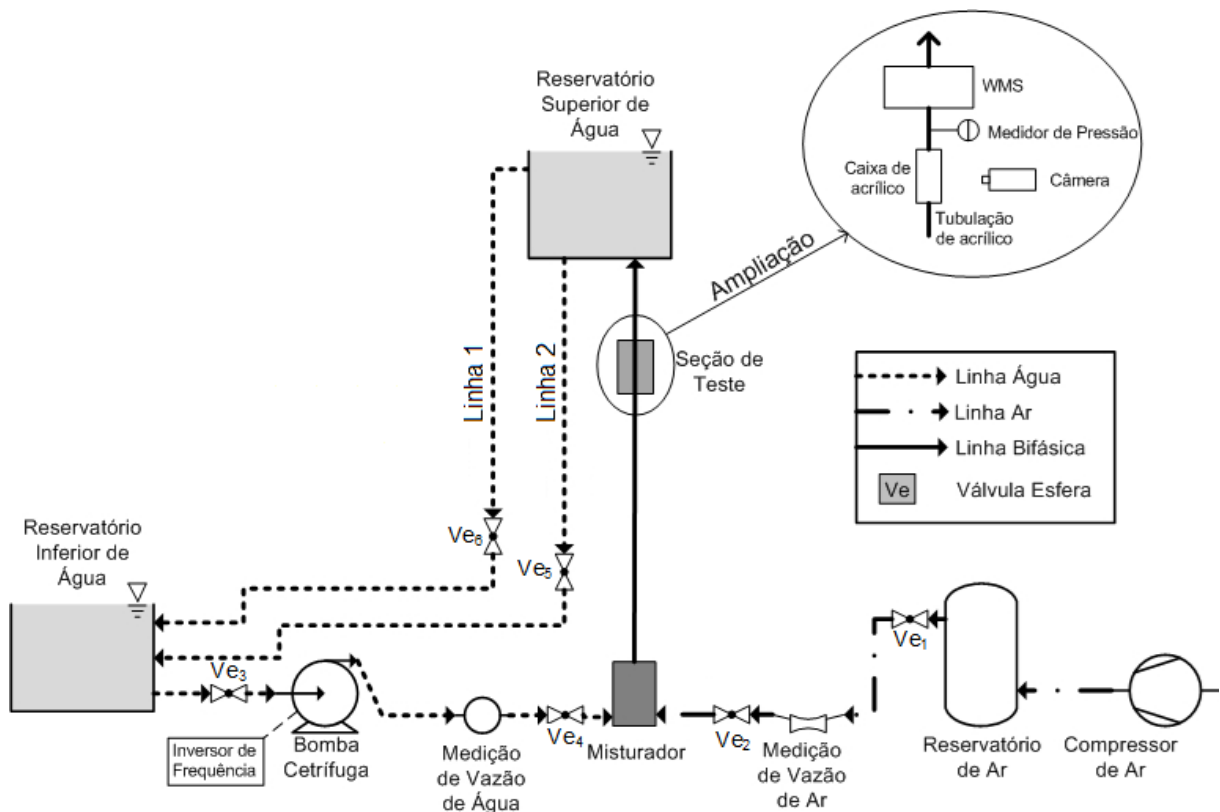


Figura 11 - Esquema da bancada experimental.

O sistema de controle e medição da vazão volumétrica do gás é composto por um compressor, três reservatórios de ar conectados em série, um medidor de vazão volumétrica e a válvula Ve_2 para controle desta vazão. O ar é coletado pelo compressor, após armazenamento e passa pelo medidor de vazão para então chegar ao misturador.

O sistema de controle e medição da vazão volumétrica do líquido é composto por um reservatório de água, uma bomba centrífuga, um inversor de frequência e um medidor de vazão volumétrica. A água armazenada no reservatório é bombeada até

o medidor de vazão volumétrica, para então chegar ao misturador. O controle desta vazão é feito variando a rotação da bomba através da atuação de um inversor de frequência, ligado ao motor de acionamento.

No misturador ocorre à formação da mistura bifásica e a partir deste ponto a tubulação se torna vertical. Após passar pela seção de teste, o escoamento alcança o reservatório superior de água.

Durante o funcionamento da bancada, a válvula Ve_5 se encontra fechada para enchimento do reservatório superior. A água que chega pela linha bifásica retorna para o reservatório inferior através da Linha 1, na qual funciona como um ladrão de água, para isso, a válvula Ve_6 permanece sempre aberta.

A Linha 2 é utilizada para esvaziar o reservatório superior e esta operação é realizada através da abertura da válvula Ve_5 .

A seção de teste, ampliação mostrada na Figura 12, é composta por uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens, um sensor de malha de eletrodos, um transmissor de pressão manométrica e uma caixa retangular em acrílico.



Figura 12 - Foto da seção de teste.

O transmissor de pressão possui a finalidade de obter a pressão na seção de teste, permitindo a correção da velocidade superficial do ar devido à perda de carga que ocorre ao longo da tubulação. As equações para cálculo e correção das velocidades superficiais se encontram no Apêndice B.

A caixa retangular em acrílico transparente, preenchida com água de forma a envolver externamente a tubulação vertical, é utilizada com a finalidade de reduzir as

distorções das imagens e dos efeitos de aquecimento que ocorrem devido à radiação da lâmpada que ilumina a seção de teste. No item 3.2.9 são apresentados mais detalhes da caixa.

As dimensões da tubulação vertical da bancada são apresentadas na Figura 13, sendo que os 580 mm destinados à seção de teste são ocupados pela caixa de acrílico, pela tomada de pressão e pelo sensor de malha de eletrodo.

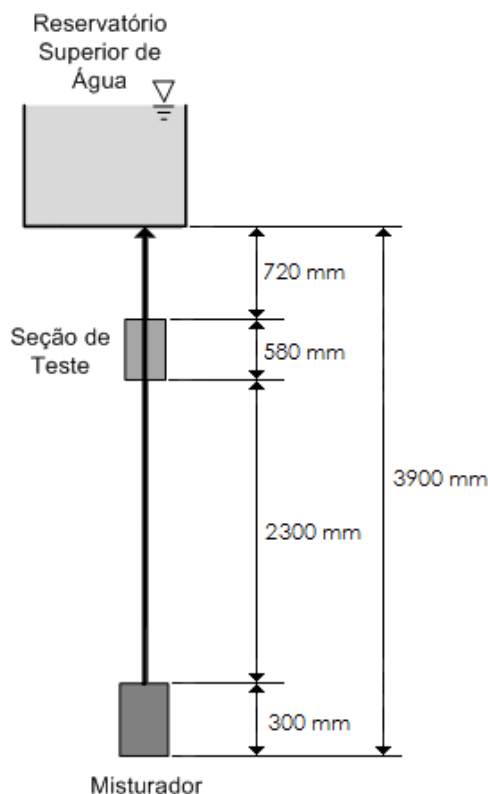


Figura 13 – Dimensões da tubulação vertical da bancada.

3.2 Especificação técnica dos componentes da bancada

Nesta seção são descritos todos os equipamentos utilizados para realização do experimento, tais como: compressor de ar, reservatórios, medidores de vazão, bomba centrífuga, misturador, tubulação e caixa em acrílico, câmera, sensor e transmissor de pressão.

3.2.1 Compressor de ar

O compressor utilizado (Figura 14) possui um deslocamento teórico de 10 pés³/min (17 m³/h), volume do reservatório de 100 litros e uma pressão máxima de 120 psi (8,2 bar).



Figura 14 - Compressor PEG.

3.2.2 Reservatório de ar

Para garantir a estabilidade no fornecimento de gás, foram utilizados três reservatórios sendo dois de 100 litros e um de 500 litros, todos com a pressão máxima de trabalho de 13,6 bar. Na Figura 15 é possível identificar os três reservatórios utilizados.



Figura 15 – Reservatórios de ar.

3.2.3 Medidor de vazão volumétrica de ar

Na Figura 16 é apresentado o sistema para medir vazão volumétrica de ar de até 0,7 m³/s, que é composto por uma placa de orifício de 1 mm de diâmetro, um transmissor de pressão diferencial e um transmissor de pressão manométrica. Este sistema foi calibrado com dois rotômetros de diferentes escalas cobrindo a faixa de vazão desejada. Detalhes da calibração e dos rotômetros se encontram no Apêndice A.



Figura 16 - Sistema de medição de vazão de ar.

Ambos transmissores possuem compatibilidade com o protocolo *Foundation Fieldbus* e exatidão de $\pm 0,10\%$, segundo o fabricante. Os modelos 2051CD (pressão diferencial) e 2051TG (pressão manométrica) trabalham, respectivamente, com pressões de 0 até 0,62 bar e de 0 até 10,3 bar. A função do transmissor de pressão manométrica é fornecer a pressão absoluta à montante da placa (P_1) e a função do transmissor de pressão diferencial é fornecer a queda de pressão (ΔP) que ocorre devido à placa de orifício. Com esses valores é possível mensurar a vazão volumétrica de ar que passa pela placa de orifício, conforme explicado no Apêndice A.

3.2.4 Bomba centrífuga

A bomba centrífuga utilizada, modelo BCIE602/7822, possui potência de 3CV, frequência de rotação de 60 Hz, pressão máxima de 20 metros de coluna de água e 15.000 l/h de vazão volumétrica.

A bomba é controlada por um inversor de frequência, modelo CFW08, que está conectado ao sistema de controle supervisório. A Figura 17 apresenta a bomba e o seu inversor.



Figura 17 - Bomba centrífuga e o inversor de frequência.

3.2.5 Medidor de vazão volumétrica de água

Medidor do tipo Coriolis, ilustrado na Figura 18, com vazão volumétrica máxima de até 8.160 l/h, foi utilizado para garantir a exatidão de $\pm 0,15\%$ na vazão volumétrica, $\pm 0,10\%$ na vazão mássica e de $\pm 0,10\%$ na massa específica do fluido, segundo o fabricante. Foi conectado ao sistema supervisório através da rede industrial do tipo *Fieldbus Foundation*.



Figura 18 - Medidor Coriolis.

3.2.6 Reservatórios de água

O reservatório inferior com capacidade para 350 litros possui a função de garantir a quantidade necessária de água durante os testes. O reservatório superior tem cerca de 40 litros e sua principal função é atuar como separador de água/ar. Ambos os reservatórios são exibidos na Figura 19.



Figura 19 - Reservatório inferior e superior de água.

3.2.7 Misturador

Na Figura 20 são mostradas três fotos do misturador. Uma vista de topo na qual é possível observar o comprimento e a entrada/saída de ar/água no misturador, uma foto em perspectiva da pedra porosa e dos tubos de cobre, e uma imagem com o misturador em funcionamento.

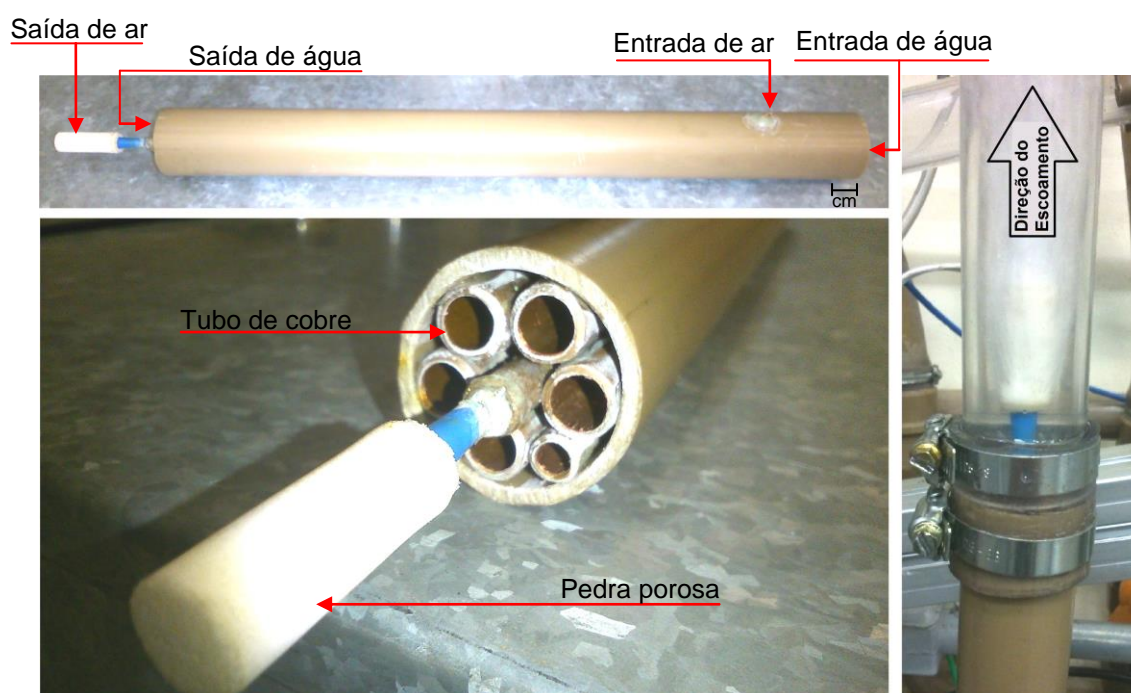


Figura 20 - Misturador.

O misturador foi fabricado no laboratório e é constituído por:

- Um tubo de PVC com 300 mm de comprimento e 32 mm de diâmetro externo;

- Dois tubos de cobre com diâmetros externos de 6 e 2 mm soldados entre si pelas pontas são os responsáveis por escoar o gás. Na extremidade do tubo maior (onde ocorre a saída do gás) foi fixada uma pedra porosa e a outra extremidade do tubo menor (entrada do gás) foi atravessada por um furo na tubulação de PVC.
- Cinco tubos de cobre com 10 mm de diâmetro, um com 6 mm e ambos com 100 mm de comprimento são os laminadores de fluxo.

3.2.8 Tubulação em acrílico

A tubulação em acrílico possui 3.120 milímetros de comprimento, diâmetro externo de 31,8 mm e 3 mm de espessura.

3.2.9 Caixa retangular em acrílico

Foi utilizada na seção de teste uma caixa de acrílico de 30 cm de comprimento, 11 cm de altura e 11 cm de largura. Pode-se notar na Figura 21 que a caixa de acrílico está preenchida com água e uma régua foi fixada ao longo da tubulação. Esta régua serve para determinar o tamanho, em milímetros, de cada pixel das imagens obtidas pela câmera.

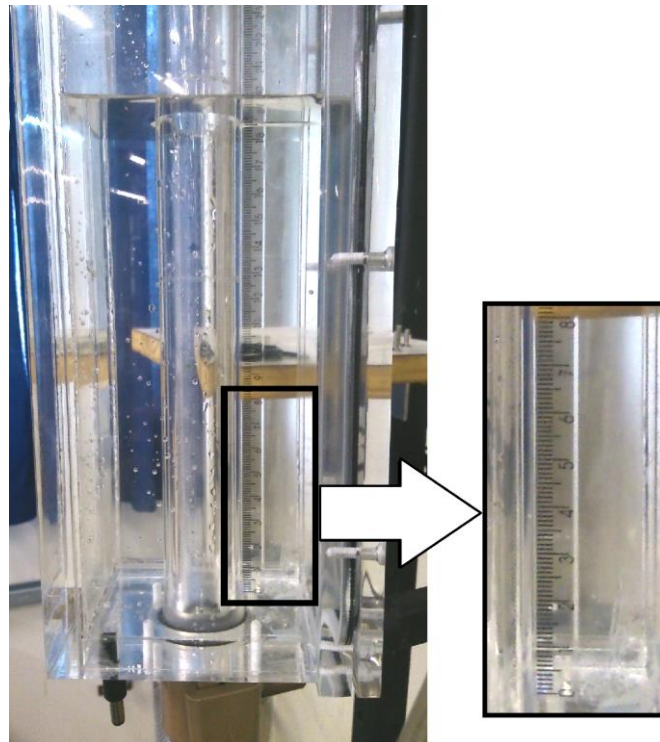


Figura 21 - Caixa de acrílico.

3.2.10 Câmera de alta taxa de aquisição de imagens

A câmera utilizada foi a FASTCAM SA4 modelo 500K-M3. O alto desempenho da tecnologia de sensores CMOS garante até 3600 fps (fotos por segundo) na resolução máxima de 1024x1024 pixels. Para a menor resolução (128x16 pixels), as fps aumentam para 500.000. Logo abaixo seguem outras características da câmera:

- Sensor: C-MOS com resolução 1024x1024 pixels;
- Memória interna: 8 GB;
- Interface: Gigabit Ethernet;
- Dimensões 153 mm (H) x 160 mm (W) x 242,5mm (D);
- Peso da câmera: 6,2 Kg;
- Temperatura de trabalho: 0 até 40 °C;
- Umidade relativa: 85% ou menos.

Além da câmera, foi utilizada uma lente com as seguintes características:

- Lente: AF Micro-Nikkor 60mm f/2.8D;
- Distância Focal: 60 mm;
- Peso: 440 g;
- Dimensões: 70 x 74,5 mm (Diâmetro x Comprimento);
- Abertura máxima: f/2,8.

Na Figura 22 estão representadas a câmera e a lente utilizadas.



Figura 22 - Câmera e lente.

Os parâmetros utilizados na filmagem foram: 125 fotos por segundo, 49,87 micro segundos de exposição do sensor por foto, resolução da imagem de 196 x 531 pixels e 180 segundos de filmagem, resultando em 22.500 imagens por medição (esse número de imagens ocupa 1,5 GB). Entre uma medição e outra, a câmera descarrega automaticamente as fotos no computador em que ela está conectada e essa transferência dura em média dez minutos.

O número de fotos por segundo foi determinado de forma a obter, para a maior vazão utilizada no experimento, no mínimo três imagens em que o nariz da mesma bolha é captado, permitindo assim calcular a velocidade da bolha.

O tempo de exposição do sensor foi determinado de forma a obter a imagem com maior clareza nos detalhes, pois, quanto menor este parâmetro, mais escura tende a ficar a imagem, entretanto, mais realçados se tornam os contornos das bolhas.

A resolução é definida selecionando a área de filmagem desejada. Os 196 pixels correspondem aos 25,8 mm do diâmetro interno da tubulação e os 531 pixels a altura de 700 mm que é cotada com auxílio da régua fixada na caixa de acrílico.

3.2.11 Sensor de malha de eletrodos

Foram utilizados dois sensores de malha de eletrodo, conforme a Figura 23, distanciados 51,5 mm. Cada sensor é composto por dois arranjos perpendiculares e espaçado entre si em 1,5 mm (aproximadamente a espessura da placa do sensor). Cada arranjo possui 12 fios de eletrodos (12x12) de diâmetro igual a 0,012 mm, igualmente espaçados em 2,1 mm.



Figura 23 - Sensor de malha de eletrodos.

Os parâmetros utilizados na obtenção dos dados pelo WMS foram de 1000 Hz de aquisição e 174,48 segundos, que é o maior tempo de medição para essa frequência de aquisição. Os valores de ganho, deslocamento e excitação foram ajustados empiricamente de forma a obter um mapeamento com a melhor resolução possível e estes valores foram: 51% de ganho, 65% de deslocamento e 65% de excitação.

Entre uma medição e outra é necessário salvar manualmente os dados captados pelo sensor, gerando cinco arquivos que totalizam 500 MB de memória, cuja transferência leva em torno de um minuto.

3.2.12 Medidor de pressão da seção de teste

Foi utilizado um transmissor de pressão manométrica com saída Foundation Fieldbus capaz de medir a pressão e temperatura do escoamento na seção de teste. Sua faixa é de 0 até 5 bar e a exatidão de $\pm 0,10\%$, garantida pelo fabricante, é aplicada tanto para medição da pressão quanto para a temperatura.

3.3 Sistemas de aquisição de dados

3.3.1 Monitoramento da bancada de teste

O monitoramento da bancada de teste é feito em tempo real por um sistema de aquisição de dados composto de transdutores conectados a um computador via protocolo *Foundation Fieldbus*. Os sinais, após adquiridos numa placa eletrônica, são processados através de um programa de supervisão desenvolvido no LACIT em plataforma *LabView* da *National Instruments*.

As funções mais relevantes do programa, cujo painel é mostrado na Figura 24, são: o controle automático da velocidade superficial do líquido, o cálculo da velocidade superficial em tempo real do gás, que por não possuir um controlador automático da vazão, é regulado manualmente por uma válvula, e a opção de gravar os dados que são recebidos pelo programa.

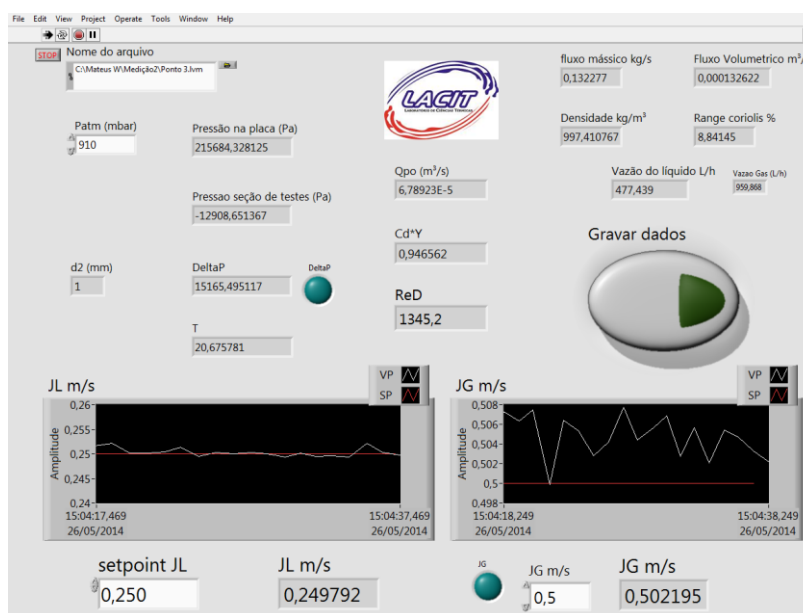


Figura 24 - Painel do programa *LabView*.

3.3.2 Sistema de aquisição de imagens

O sistema de aquisição de imagens é composto pela câmera e por um computador com dois terabytes de disco rígido, no qual está instalado o programa fornecido pelo fabricante para controlar a câmera. Nele é possível definir as características da filmagem, dentre elas, resolução, tempo de aquisição, tempo de exposição e número de fotos por segundo.

A Figura 25 é uma imagem do programa da câmera. Nela é possível visualizar os parâmetros utilizados durante as aquisições dos dados e uma das 22.500 imagens capturadas.

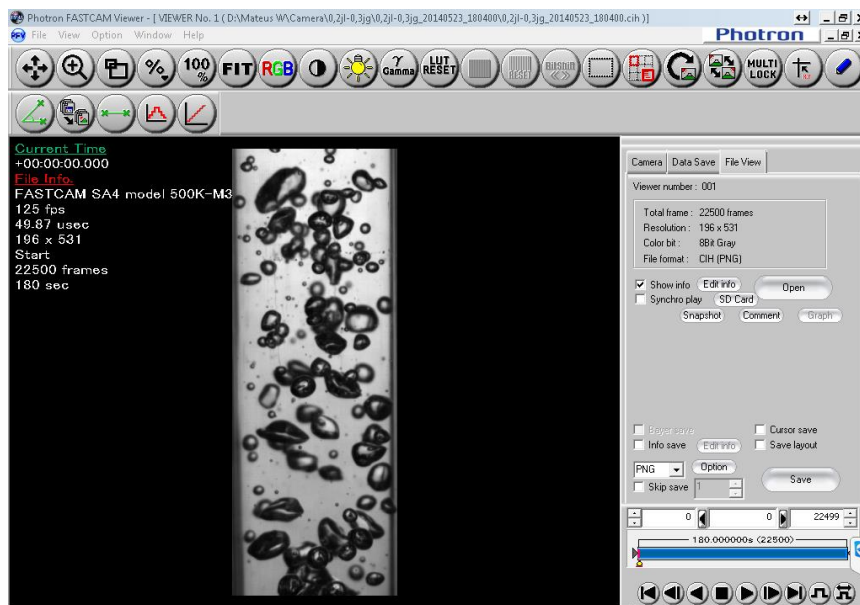


Figura 25 - Programa da câmera.

3.3.3 Sistema de aquisição de dados do WMS

O sistema de aquisição de dados do WMS é composto pelos dois sensores instalados em série, pelo equipamento eletrônico que os controla, pelo computador citado no item anterior e pelo programa computacional do WMS.

A Figura 26 representa o programa utilizado pelo WMS para aquisição de dados e nele é possível: Na aba *Online*, visualizar em tempo real a leitura do escoamento feita pelos dois sensores; Na aba *Adjust Online*, fazer ajustes no valor de ganho, deslocamento e excitação do sensor; Na aba *Acquisition*, definir o tempo e a frequência de medição e é onde se localiza as opções de começar e salvar a aquisição dos dados.

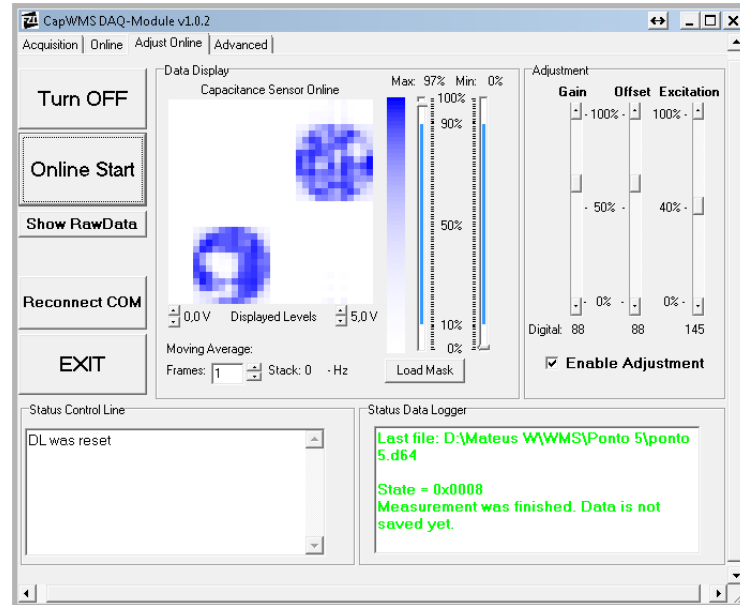


Figura 26 - Programa do sensor de malha de eletrodos.

3.4 Grade de teste

A grade de teste foi determinada levando em conta as limitações da bancada e, desta forma, foram selecionadas onze combinações de velocidades superficiais, apresentadas na Tabela 1. Cada ponto foi medido três vezes (três baterias), totalizando trinta e três pontos experimentais.

Tabela 1 - Grade de teste.

Ponto	$j_L (m/s)$	$j_G (m/s)$	$j (m/s)$
P1	0,2	0,3	0,5
P2	0,25	0,25	0,5
P3	0,25	0,5	0,75
P4	0,25	0,75	1
P5	0,3	0,2	0,5
P6	0,4	0,35	0,75
P7	0,5	0,25	0,75
P8	0,5	0,5	1
P9	0,75	0,25	1
P10	0,75	0,75	1,5
P11	1	0,5	1,5

Cada ponto da grade de teste foi plotado no mapa de fluxo baseado em Taitel, Barnea e Dukler (1980), conforme a Figura 27.

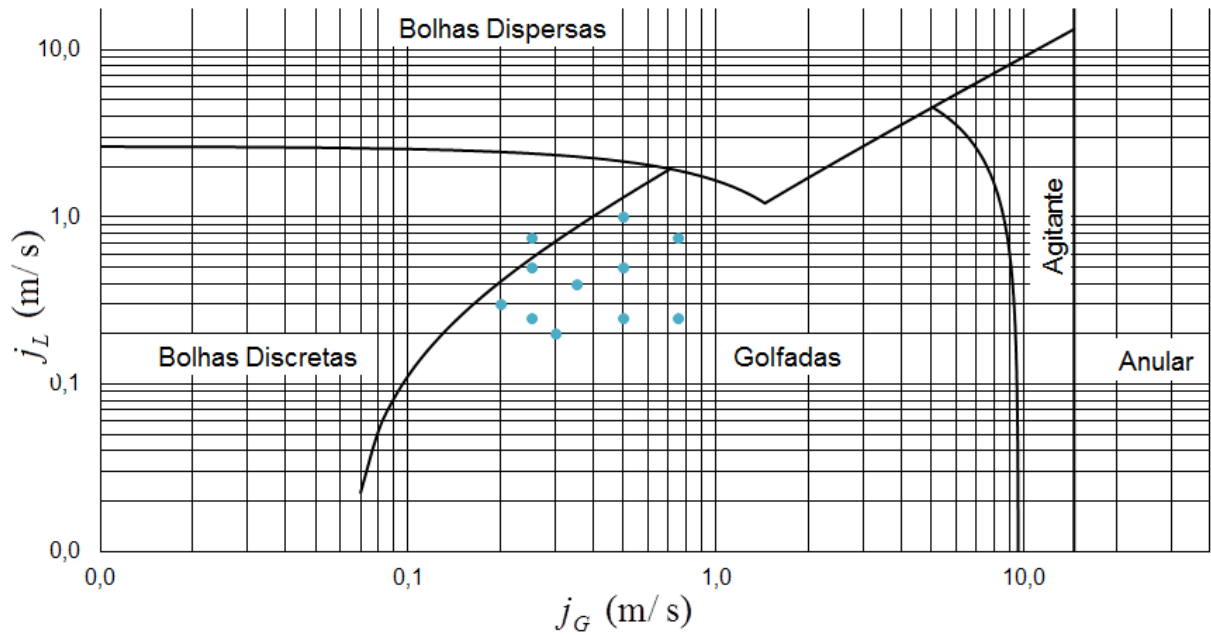


Figura 27 - Grade de teste representada no mapa de fluxo.

3.5 Procedimentos operacionais

Este item está dividido em três subitens, sendo os dois primeiros relacionados com a partida e o desligamento da bancada e terceiro diz respeito aos procedimentos experimentais de aquisição de dados.

3.5.1 Partida da bancada

Considerando que os equipamentos, WMS, câmera, caixa de acrílico e iluminação estão devidamente instalados e prontos para o uso, segue as seguintes etapas para ligar a bancada:

1. Preencher a caixa de acrílico com água.
2. Posicionar as válvulas de forma a liberar o escoamento do líquido do reservatório ao misturador.
3. Fechar a válvula 5 e abrir a 6, representadas na Figura 11.
4. Verificar se estão conectados os tubos que interligam o gás do compressor ao misturador passando pelos reservatórios de ar, placa de orifício e válvula de regulação da vazão de gás.

5. Verificar se a válvula do controle da vazão de gás está fechada e abrir lentamente a do reservatório de ar, de forma a pressurizar a linha de alimentação do misturador.
6. Ligar o computador dos sistemas de aquisição e o do controle da bancada.
7. Ligar a câmera, WMS e todos os equipamentos conectados a rede *Foundation Fieldbus*, quais sejam: sensores de pressão e o medidor de vazão de líquido.
8. Verificar se no painel supervisor, o controle do líquido está na opção de automático e, após isso, ligue o painel.
9. Ligar o disjuntor que ativa a bomba e o inversor de frequência.
10. Iniciar os sistemas de aquisição através dos seus respectivos programas.

3.5.2 Desativar a bancada

A seguir, segue as etapas para desativar a bancada:

1. Fechar as duas válvulas de gás (a de regulagem e a do reservatório).
2. Zerar a vazão de líquido no programa *LabView*.
3. Desligar o disjuntor da bomba e inversor de frequência, os equipamentos conectados via *Foundation Fieldbus* e o painel de controle.
4. Encerrar os sistemas de aquisição através dos seus respectivos programas.

5. Abrir a válvula 5 (representada na Figura 11) e, após escoamento de toda água da tubulação vertical, fechar a válvula 4.

3.5.3 Procedimentos de medição

- Antes da primeira medição de cada bateria de teste é necessário:
 1. Calibrar a placa de orifício utilizada no experimento. (Vide Apêndice A)
 2. Fazer medições com o WMS para o tubo vazio (apenas ar) para calibração do sensor.
 3. Atribuir um valor de j_L no programa supervisor. Por exemplo, $j_L = 0,3m/s$.
 4. Drenar o tubo que liga a tomada de pressão da seção de teste com o transmissor.
 5. Selecionar a região de filmagem, na qual, deve tangenciar a parede da tubulação, cuja extensão deve ser obtida através da leitura da escala, instalada na caixa de acrílico.
 6. Obter imagens e fazer medições com o WMS apenas com líquido.
- Entre cada medição é necessário:
 1. Verificar o correto funcionamento da câmera e desligar o WMS por dez segundos.
 2. Inserir o valor de j_L no programa supervisor e, utilizando a válvula de controle da vazão de gás, regular o j_G desejado.

3. Aguardar a estabilização das vazões. Caso j_L oscile demasiadamente, reduza a abertura da válvula de controle da vazão de líquido.
4. Atribuir os nomes dos próximos arquivos a serem gerados pela câmera e pelo programa supervisorio.
5. Gravar simultaneamente os dados gerados pelo programa supervisorio, câmera (sem alterar a região de interesse selecionada anteriormente) e WMS.
6. Salvar os dados do WMS no computador após concluir a aquisição.
7. Parar de gravar os dados gerados pelo programa supervisorio após concluir a filmagem.

3.6 Processamento dos dados

Realizadas as medições de todos os pontos propostos no item 3.4, começa a etapa de processamento dos dados, no qual, são obtidos os parâmetros característicos dos escoamentos. Como o processamento dos dados gerados pelo WMS é diferente dos gerados pela câmera, este item se divide em dois subitens.

3.6.1 Processamento dos dados do WMS

Como explicado no item 3.2.11, o mapeamento realizado pelo WMS resulta na série temporal da fração de vazio. A partir desta série é possível visualizar o escoamento, conforme observado na Figura 28, onde a imagem inferior é a série temporal da fração de vazio obtida pelo WMS, sendo o eixo das abscissas o tempo de medição em segundos e o eixo das ordenadas a fração de vazio em porcentagem. A imagem superior é a visualização bidimensional desta série.

Note que na Figura 28 o retângulo preto, localizado no centro da imagem superior, corresponde à leitura da fração de vazio identificada no centro da imagem inferior. Observe que enquanto o sensor 2, que apresenta o valor de 64%, está no

final da bolha alongada, o sensor 1, que apresenta o valor de 23%, já está na aeração do pistão.

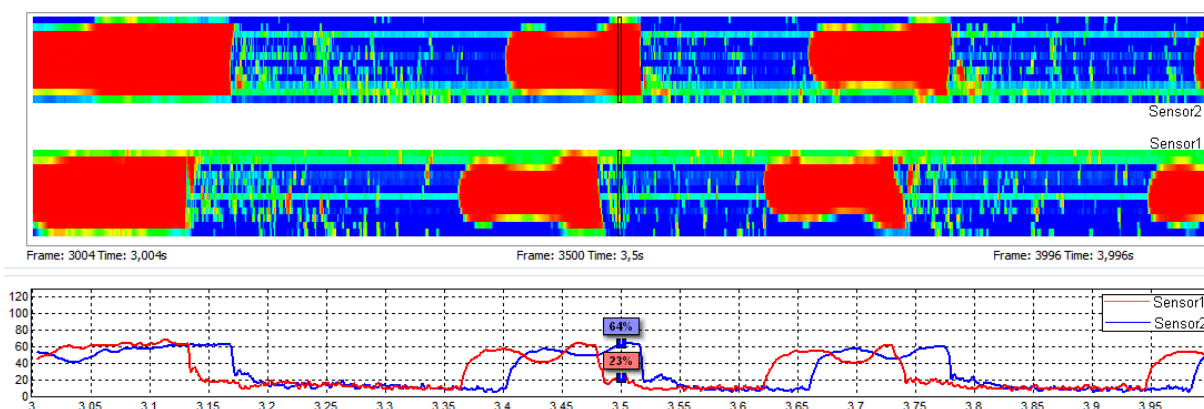


Figura 28 - Visualização do escoamento através da série temporal da fração de vazio.

Para obter os parâmetros característicos foi utilizado um algoritmo desenvolvido no programa *MatLab* proposto por Castillo (2013). Este programa busca transformar a série temporal da fração de vazio em um sinal binário, como ilustrado na Figura 29. O sinal de baixo valor indica a presença de pistão e o sinal de alto valor indica a presença da bolha alongada.

Essa transição entre bolha e pistão é definida por um Fator de Corte (FC), onde a fração de vazio localizada abaixo desse fator é definida como pistão e acima como bolha alongada. O FC é definido empiricamente pelo usuário, na qual é escolhido um valor da fração de vazio situado na transição entre bolhas alongadas e pistões.

A Figura 29 ilustra ainda a função binária gerada pela conversão. A abscissa dos dois gráficos corresponde à frequência em Hz e as ordenadas do gráfico superior e inferior correspondem, respectivamente, ao valor da fração de vazio e ao valor binário. Esse artifício é realizado para facilitar a identificação do nariz e da cauda da bolha pelo programa.

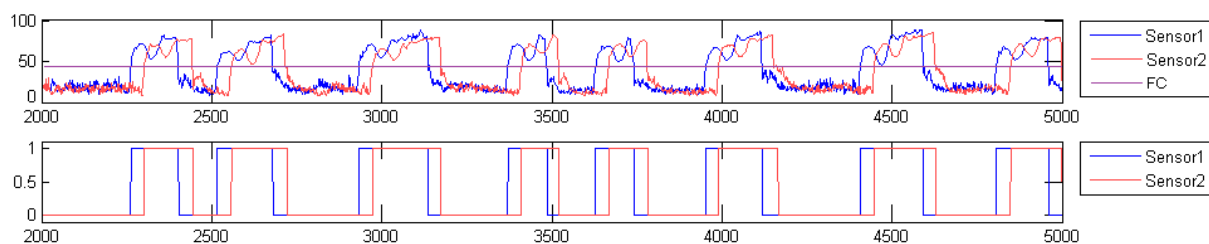


Figura 29 - Conversão do sinal da fração de vazio em um sinal binário.

O cálculo do tempo de passagem da bolha alongada (t_B) e do pistão (t_P) é feito pela relação do número de *frames* durante a passagem da bolha e do pistão pela taxa de aquisição de dados (1000 Hz). Em paralelo, outra função do programa calcula a média das frações de vazio (da bolha e do pistão).

A frequência da célula unitária é obtida calculando o inverso de seu tempo de passagem ($1/t_U$).

As velocidades das bolhas alongadas são calculadas dividindo a distância de separação das placas do WMS (51,5 mm) pelo tempo gasto pelo nariz para percorrer a distância entre cada sensor.

Por último são calculados os comprimentos da bolha e do pistão multiplicando a velocidade da bolha pelos seus respectivos tempos de passagem (t_B e t_P).

Os resultados são salvos em uma matriz na qual cada coluna é um parâmetro característico e cada linha é uma célula unitária identificada pelo programa. Com os valores obtidos é realizado um tratamento estatístico para apresentação dos parâmetros de cada ponto de medição.

3.6.2 Processamento das imagens

Para obter os parâmetros característicos a partir das imagens também foi utilizado um programa desenvolvido em *MatLab* proposto por Alves (2013). As etapas de processamento são parecidas com as do item anterior: Tratamento das imagens, detecção do nariz e da cauda da bolha e determinação dos parâmetros característicos.

Primeiramente é necessário fazer a conversão binária das imagens, resultando em imagens onde os pixels brancos correspondem ao líquido e os pretos os contornos das bolhas. A última parte do tratamento consiste em eliminar as bolhas que aparecem no pistão (aeração), pois elas podem dificultar a identificação do nariz da bolha alongada pelo programa.

Como forma de exemplo, a Figura 30 apresenta a imagem obtida pela câmera (a), a representação binária (b) e a resultante do processo de tratamento de imagem (c).

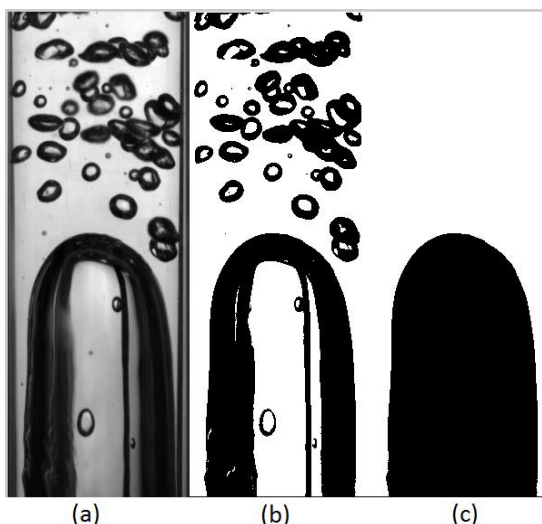


Figura 30 - Tratamento de imagem.

Após o tratamento o programa procura a primeira imagem na qual não há presença de uma bolha alongada, ou seja, sem pixel preto. Identificada essa imagem, parte-se para etapa de detecção do nariz da bolha, onde o programa escaneia as imagens no sentido oposto ao escoamento em busca do primeiro pixel preto, para então, determinar a posição de seu nariz nesta e em todas as imagens seguintes nas quais ele aparece. Isto permite o cálculo da média de velocidade da bolha (V_B).

A Figura 31 mostra uma sequência de imagens na qual o programa detecta e marca (linha horizontal preta) o nariz da mesma bolha alongada.



Figura 31 - Sequência de detecção do nariz da bolha alongada.

Identificado o nariz e calculada a velocidade, o programa percorre as próximas imagens até encontrar onde a quantidade de pixels pretos aumenta bruscamente, localizando assim a cauda da bolha e reiniciando a procura do próximo nariz. A Figura 32 apresenta uma imagem com a marcação (linha horizontal branca), feita pelo programa, onde foi identificada a cauda da bolha alongada.



Figura 32 - Identificação da cauda da bolha alongada.

Conhecendo a posição do nariz (x_N), da cauda (x_C) e do nariz da próxima bolha alongada (x_{NP}) em suas respectivas imagens, calcula-se seu comprimento pela equação (13) e o do pistão pela equação (14). Por último é calculada a frequência de passagem da célula unitária dividindo sua velocidade pelo seu comprimento, conforme a equação (9).

$$L_B = T_p(x_C - x_N) + \frac{V_B}{Ta}(\Delta \text{Im}) \quad (13)$$

$$L_S = T_p(x_{NP} - x_C) + \frac{V_B}{Ta}(\Delta \text{Im}) \quad (14)$$

Onde T_p é o tamanho do pixel (m/pixel), Ta é a taxa de aquisição de imagem da câmera (125 imagens por segundos) e ΔIm é o número de imagens entre a calda e o nariz da bolha.

Os resultados são salvos em uma matriz na qual cada coluna é um parâmetro característico e cada linha é uma célula unitária identificada pelo programa. Com os valores obtidos é realizado um tratamento estatístico para apresentação dos parâmetros de cada ponto de medição.

As frações de vazio não são obtidas por este processamento. Seria necessária uma programação mais complexa na tentativa de aproximar as frações de vazio bidimensional (calculada pela imagem) em uma tridimensional. Fica como recomendação para trabalhos futuros.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as médias dos valores dos parâmetros obtidos nas três baterias de testes do experimento. Os dados completos de todos os pontos para cada bateria estão no Apêndice D.

4.1 Pontos que não apresentaram bolha alongada

Antes de apresentar os resultados experimentais válidos, embora tenham sido previstos nos mapas de fluxo, dos onze pontos propostos pela grade de teste (Tabela 1), quatro (P2, P5, P7 e P9) não apresentaram o padrão golfadas e por isso serão ocultados no decorrer do trabalho. A Figura 33 é uma ampliação do mapa de fluxo da Figura 27 e os pontos 2, 5, 7 e 9 são marcados, podendo observar que destes, o P2 se encontra mais afastado da região de transição, o P5 e P7 estão razoavelmente próximos e o P9 está fora do padrão golfadas e foi escolhido com objetivo de verificar se a zona de transição estava de acordo com a prevista pelo mapa.

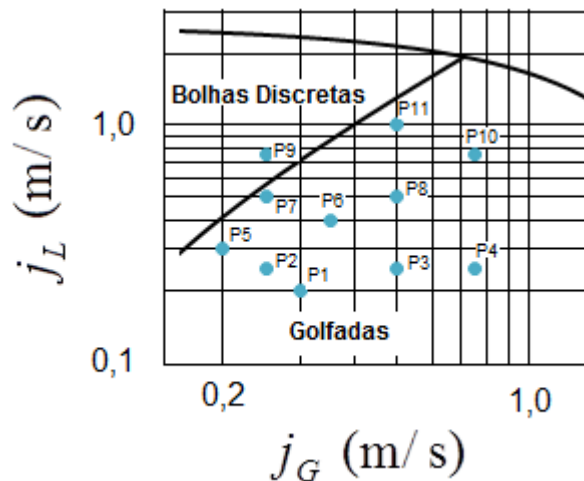


Figura 33 - Zoom no mapa de fluxo.

Com intuito de observar o escoamento nesses pontos, na Figura 34 são apresentadas três imagens de cada um, obtidas pela câmera. As imagens foram selecionadas na tentativa de se obter o maior número de bolhas aglomeradas, podendo notar que destes, o P2 é o que se aproxima mais do escoamento em golfadas, o P5 e P7 são similares na quantidade de bolhas e o P9 apresenta menos bolhas que os demais.

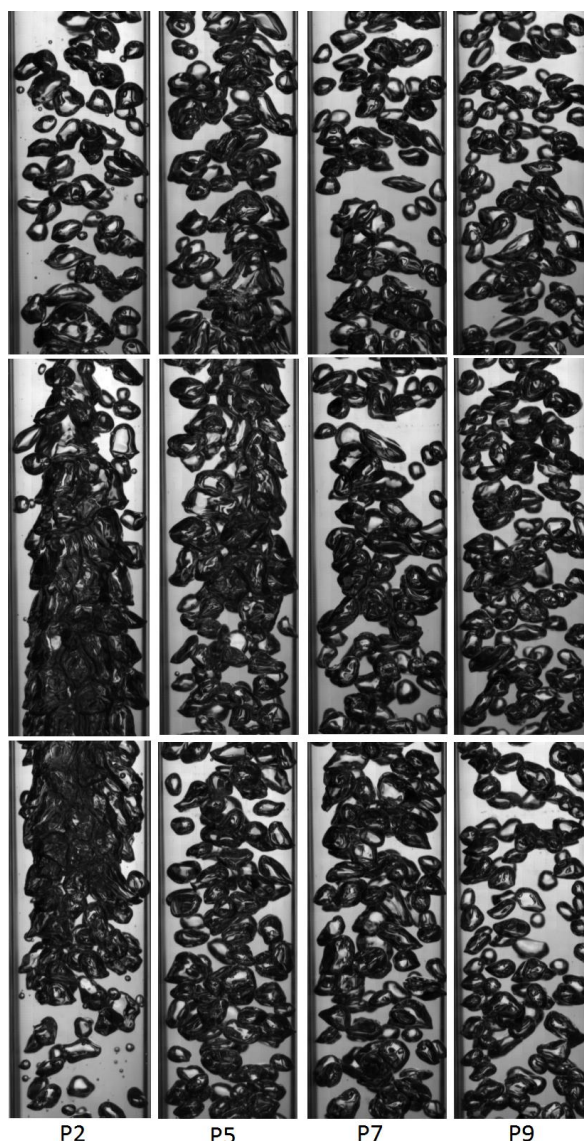


Figura 34 - Pontos que não apresentaram o padrão golfadas.

Pela análise de incerteza realizada no Apêndice C, onde $j_G = \pm 2,55\%$ e $j_L = \pm 0,25\%$, o P7 poderia se encontrar fora da região do escoamento em golfadas. Já os outros dois poderiam estar na região de desenvolvimento, visto que o comprimento do misturador até a seção de teste é de 2,3 metros, resultando em um $L/D = 90$ e a maioria dos autores trabalham com um comprimento característico entre 100 e 350. Uma justificativa sugerida por Soares (2010) é que possa haver um deslocamento na posição da linha de transição para baixo devido à forte dependência dos padrões com as características físicas das bancadas experimentais ou com as técnicas de medição de vazão empregadas na época.

4.2 Velocidades superficiais reais dos experimentos

Devido às oscilações no controle das velocidades superficiais, foram feitas as médias dos dados adquiridos pelo programa supervisorio para cada ponto experimental. Os valores são apresentados na Tabela 2, onde se pode notar a semelhança com os previstos pela grade de teste.

Tabela 2 - Velocidades superficiais reais.

	j_L (m/s)	j_G (m/s)
P1	0,200	0,303
P3	0,250	0,505
P4	0,250	0,750
P6	0,400	0,354
P8	0,500	0,504
P10	0,750	0,753
P11	1,000	0,504

4.3 Valores dos parâmetros característicos

Os valores dos parâmetros característicos obtidos após processamentos dos dados do WMS e da câmera são apresentados na Tabela 3 e o erro relativo entre eles, na

Tabela 4.

Tabela 3 - Média dos valores dos parâmetros característicos.

		V_B (m/s)	L_B (m)	L_p (m)	f (Hz)	α_B	α_P
Ponto 1	WMS	0,728	0,110	0,213	2,986	0,620	0,269
	Câmera	0,660	0,119	0,281	1,901		
Ponto 3	WMS	0,915	0,180	0,259	2,722	0,646	0,207
	Câmera	0,905	0,224	0,287	2,000		
Ponto 4	WMS	1,149	0,296	0,181	3,147	0,608	0,313
	Câmera	1,054	0,322	0,285	1,746		
Ponto 6	WMS	0,950	0,085	0,196	6,002	0,532	0,247
	Câmera	0,943	0,107	0,245	3,075		
Ponto 8	WMS	1,226	0,128	0,251	3,491	0,605	0,175
	Câmera	1,211	0,143	0,247	3,502		
Ponto 10	WMS	1,823	0,123	0,177	9,220	0,509	0,268
	Câmera	1,701	0,159	0,264	4,543		
Ponto 11	WMS	1,950	0,072	0,117	16,185	0,447	0,238
	Câmera	1,773	0,102	0,197	6,904		

Tabela 4 - Erro relativo entre WMS e câmera.

Erro Relativo (%)

	V_B	L_B	L_P	f
P1	9,37	8,54	31,48	36,35
P3	1,12	24,36	10,64	26,53
P4	8,30	8,79	57,28	44,51
P6	0,77	24,96	25,15	48,76
P8	1,21	11,57	1,64	0,32
P10	6,70	29,58	49,13	50,73
P11	9,10	40,39	68,70	57,34

Nota-se, com algumas exceções, uma grande discrepância nos valores obtidos pelo WMS e pela câmera. Uma das principais causas é devido ao valor do Fator de Corte (mencionado no item 3.6.1) ocasionando possíveis erros no processamento de dados do WMS. Na Tabela D4 é mostrado o desvio padrão dos pontos coletados pelo WMS e pela câmera, podendo observar o alto valor dos desvios por parte do sensor, exceto para velocidade da bolha alongada e para as frações de vazio.

Na tentativa de diminuir os altos valores dos desvios padrões, foi analisado o ponto que apresentou o maior valor (75,59 Hz), ponto 10 da bateria 3 de testes. A Figura 35 apresenta o gráfico de dispersão da frequência de passagem das células unitárias nesse ponto, ou seja, todos os valores de frequência para cada célula unitária identificada pelo sensor. Foram identificadas 797 células na qual os valores da frequência variaram de 2,069 até 250,4 Hz e destas, 237 apresentaram valores superiores a 50 Hz.

Para minimizar esses erros, foram eliminados os pontos que estão 5%, para mais e para menos, do desvio padrão em relação à mediana. O resultado é apresentado na Figura 36, na qual o número de células unitárias contabilizadas no cálculo cai para 553, a média passa para 5,81 Hz e o desvio padrão cai dos 75,59 para 2,19 Hz.

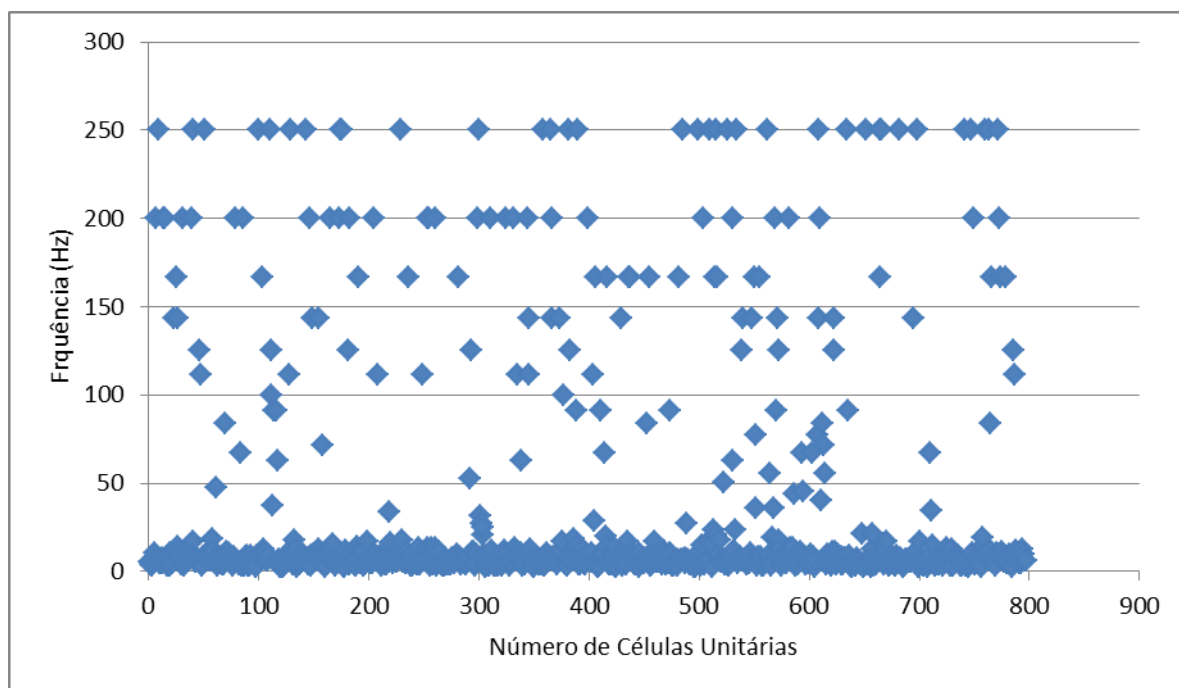


Figura 35 - Dispersão da frequência para B3P10.

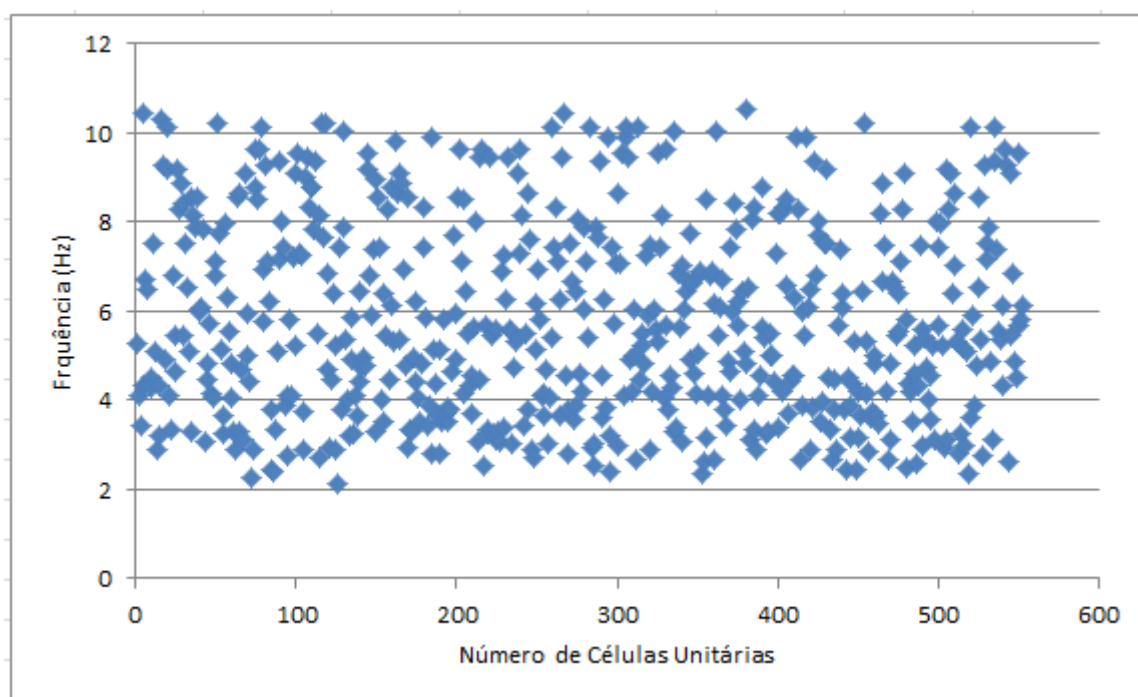


Figura 36 - Dispersão da frequência para B3P10, ajustada.

Porém, mesmo com essa redução, o erro relativo em relação ao valor obtido pela câmera (4,35 Hz) foi de 25,21%. Assim, foi necessária uma melhoria na programação de processamento dos dados do WMS, feita pelo criador do programa, e baseia-se, principalmente, na determinação automática do Fator de Corte.

4.4 Valores dos parâmetros característicos após ajustes no programa

Após serem feitos os ajustes no programa, foram obtidos novos resultados dos parâmetros característicos para cada ponto de medição do WMS. Em todos houve uma melhora significativa nos valores dos desvios padrões, por exemplo, a Figura 37 apresenta o gráfico de dispersão da frequência para o mesmo ponto citado anteriormente, possuindo uma média de 4,45 Hz e desvio padrão de 1,75 Hz. Com estes valores, o erro relativo em relação à câmera cai para 2,39% mesmo com alguns pontos se distanciando razoavelmente dos demais, entretanto, não foram em quantidade suficiente para alterar a média.

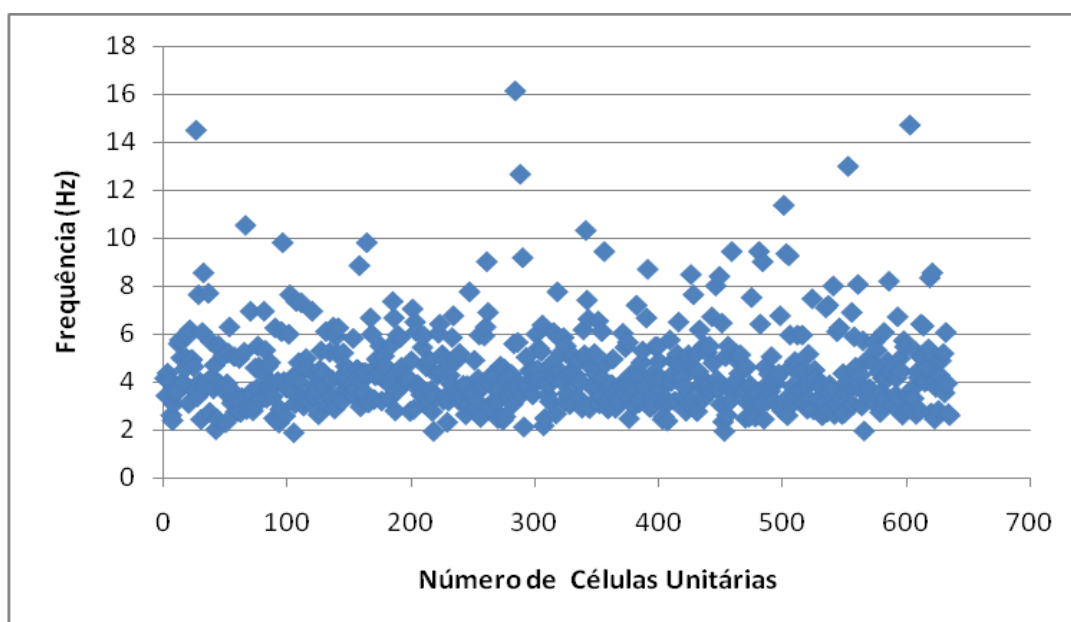


Figura 37 - Dispersão da frequência para B3P10, após melhoria na programação.

Os novos resultados dos parâmetros característicos e seus respectivos desvios padrões gerados após melhoria da programação são apresentados na Tabela D5 e Tabela D6, ambas localizadas no Apêndice D. Com esses novos valores, são feitas três novas tabelas: Tabela 5 que compara os novos dados obtidos pelo WMS com os da câmera; Tabela 6 que calcula o erro relativo entre eles; Tabela D7 que apresenta o desvio padrão de cada parâmetro.

Tabela 5 - Comparação entre valores obtidos pelo WMS e pela câmera após ajuste na programação.

		$V_B (m/s)$	$L_B (m)$	$L_P (m)$	$f (Hz)$	α_B	α_P
Ponto 1	WMS	0,622	0,126	0,282	1,750	0,575	0,254
	Câmera	0,660	0,119	0,281	1,901		
Ponto 3	WMS	0,884	0,243	0,271	1,884	0,672	0,250
	Câmera	0,905	0,224	0,287	2,000		
Ponto 4	WMS	1,131	0,396	0,267	1,866	0,687	0,313
	Câmera	1,054	0,365	0,290	1,746		
Ponto 6	WMS	0,927	0,107	0,250	3,030	0,524	0,229
	Câmera	0,943	0,107	0,245	3,075		
Ponto 8	WMS	1,165	0,152	0,243	3,304	0,555	0,225
	Câmera	1,211	0,143	0,247	3,502		
Ponto 10	WMS	1,786	0,174	0,265	4,550	0,580	0,248
	Câmera	1,701	0,159	0,264	4,543		
Ponto 11	WMS	1,796	0,093	0,188	7,462	0,421	0,222
	Câmera	1,773	0,102	0,197	6,904		

Tabela 6 – Diferenças relativas entre os valores gerados pela câmera e pelo WMS após ajuste na programação.

	Erro Relativo (%)				
	V_B	L_B	L_P	f	α_P
P1	6,18	5,17	0,57	8,63	0,254
P3	2,34	7,90	6,00	6,16	0,250
P4	6,87	7,77	8,51	6,43	0,313
P6	1,70	0,61	2,09	1,50	0,229
P8	3,94	5,94	1,78	6,00	0,225
P10	4,79	8,74	0,30	0,14	0,244
P11	1,29	9,62	4,98	7,47	0,228

Para melhor visualização dos valores, da Figura 38 a Figura 41 é apresentada a variação da velocidade da bolha, do comprimento da bolha, do comprimento do pistão e da frequência para cada ponto experimental. No geral observa-se uma boa aproximação entre os resultados, sendo o ponto 4 o que apresentou maiores erros relativos devido à intensa aeração no pistão ($\alpha_P = 0,313$), dificultando a identificação das bolhas alongadas pelos algoritmos.

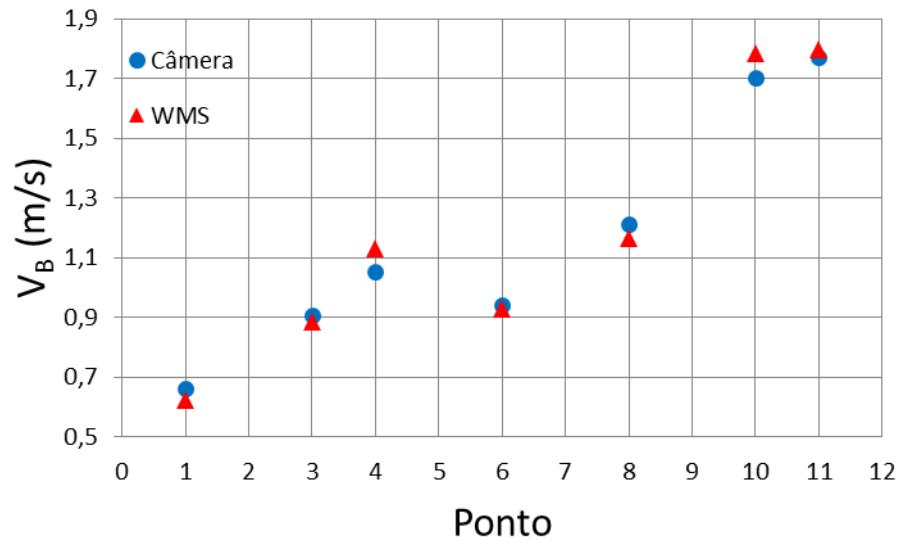


Figura 38 - Variação da velocidade da bolha.

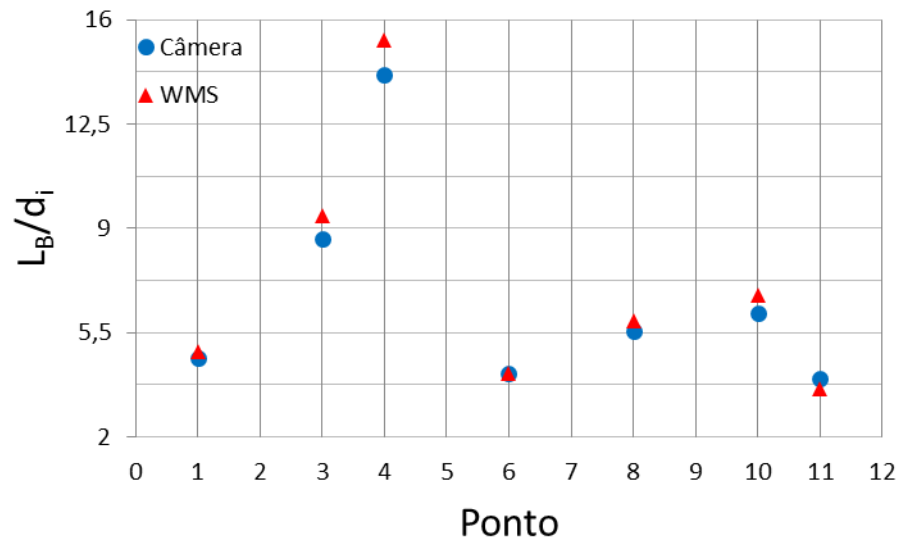


Figura 39 - Variação do comprimento da bolha.

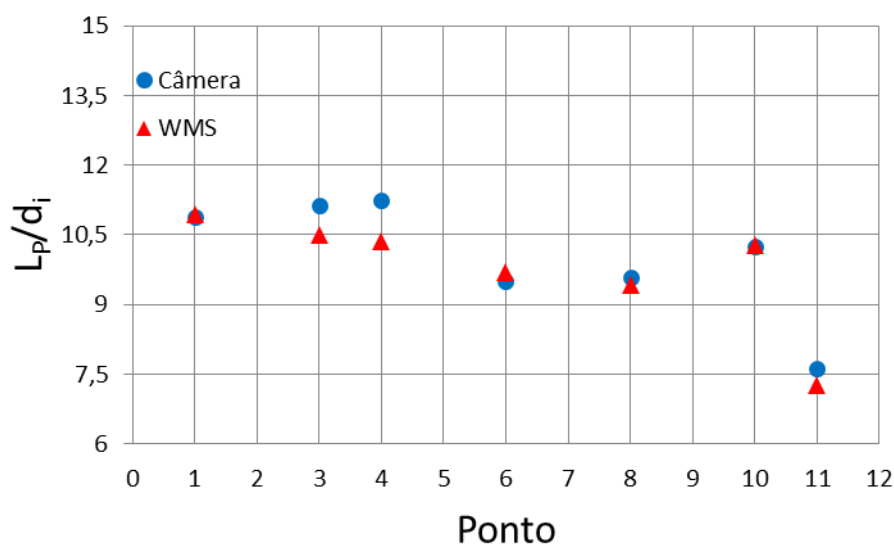


Figura 40 - Variação do comprimento do pistão.

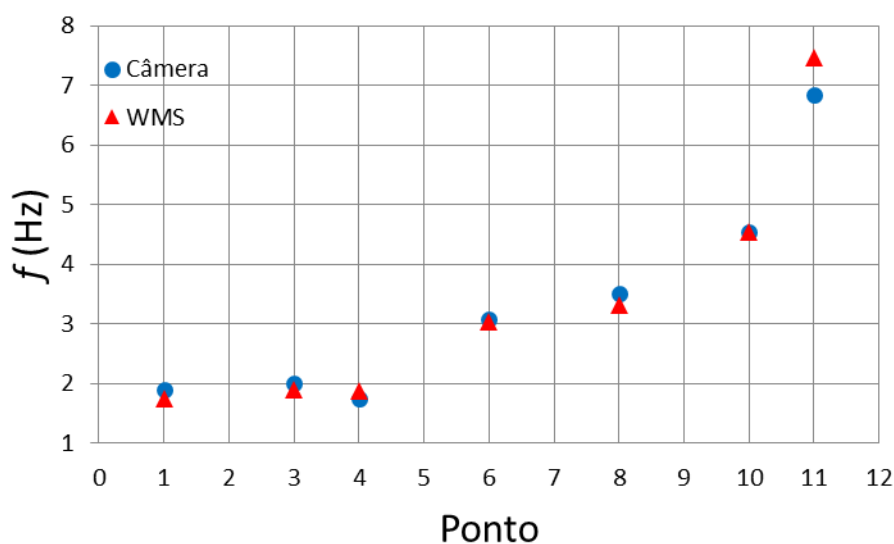


Figura 41 - Variação da frequência de passagem das células unitárias.

4.5 Análise dos resultados

Nesta seção é feita uma análise das tendências dos parâmetros de escoamento em função da variação nas velocidades superficiais. No Apêndice E constam os histogramas dos parâmetros característicos de todos os pontos para a primeira bateria de experimentos.

4.5.1 Velocidade da bolha alongada

Os valores médios de V_B obtidos pelo WMS e pela câmera são marcados na Figura 42. Observa-se um aumento na velocidade da bolha com o aumento da velocidade da mistura. A linha contida no gráfico é a equação (4) desenvolvida por Nicklin *et al* (1962) para obter a velocidade da bolha alongada. A linha pontilhada representa uma diferença de -20% da correlação proposta.

Uma possível razão para este erro é que o escoamento ainda não está completamente desenvolvido, uma vez que o comprimento característico da bancada experimental utilizada por Nicklin é cerca de 2,5 vezes maior.

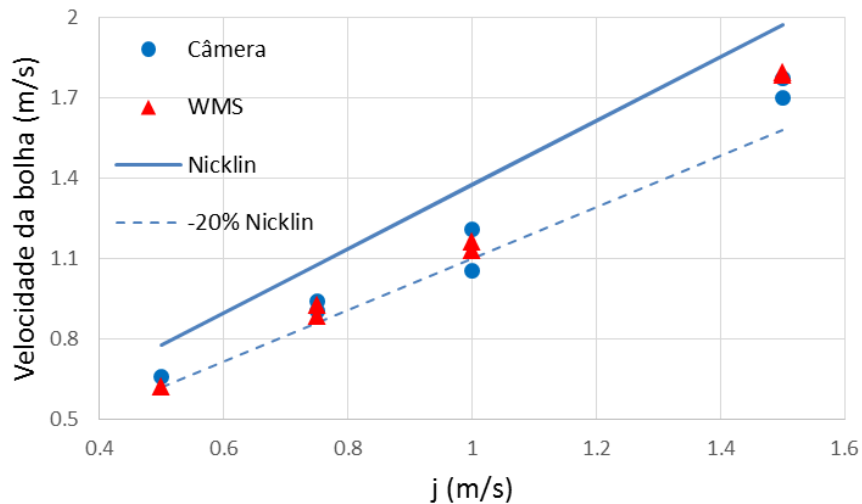


Figura 42 - Velocidade da bolha em função da velocidade superficial da mistura.

Além disso, pela Tabela 7, os dados mostram que para mesma velocidade da mistura, combinando os valores de j_L e j_G , aumentando j_L e diminuindo j_G , a velocidade da bolha aumenta.

Tabela 7 - Dados médios da velocidade da bolha alongada.

j_L	j_G	j	V_B Sensor	V_B Câmera
0,25	0,5	0,75	0,884	0,905
0,4	0,35	0,75	0,927	0,943
0,25	0,75	1	1,131	1,054
0,5	0,5	1	1,165	1,211
0,75	0,75	1,5	1,786	1,701
1	0,5	1,5	1,796	1,773

4.5.2 Comprimento da bolha alongada

Na Figura 43 é mostrado o aumento do comprimento médio da bolha em função do acréscimo na razão de velocidades superficiais (j_G / j_L).

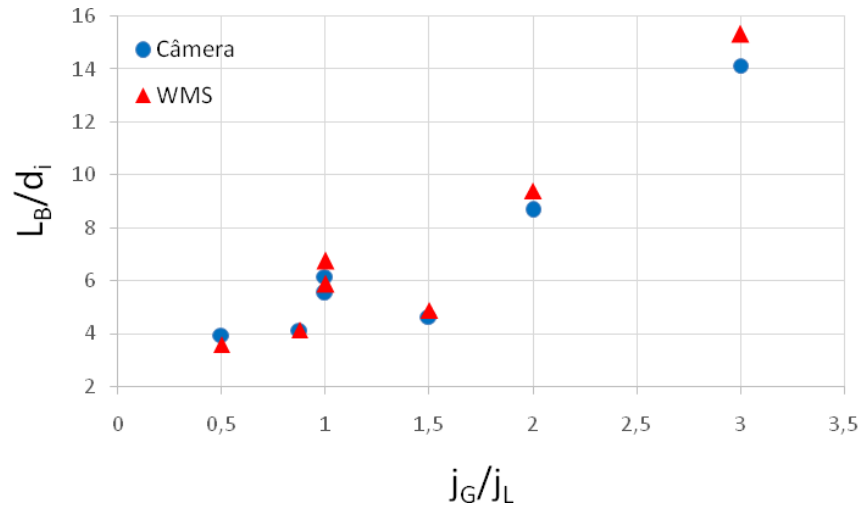


Figura 43 - Comprimento da bolha alongada em função da razão das velocidades superficiais.

4.5.3 Comprimento do pistão

Uma relação do comprimento do pistão pela razão j_G / j_L é apresentada na Figura 44. É possível perceber um aumento mais acentuado no comprimento do pistão para baixas razões de gás/líquido. Uma maior vazão de líquido em relação à vazão de gás faz com que o ar inserido na tubulação seja logo empurrado pelo líquido, impedindo uma coalescência maior de bolhas, com isso, aumentando a frequência de passagem das bolhas alongadas, diminuindo o comprimento do pistão e, conseqüentemente, aumentando a frequência de passagem das células unitárias.

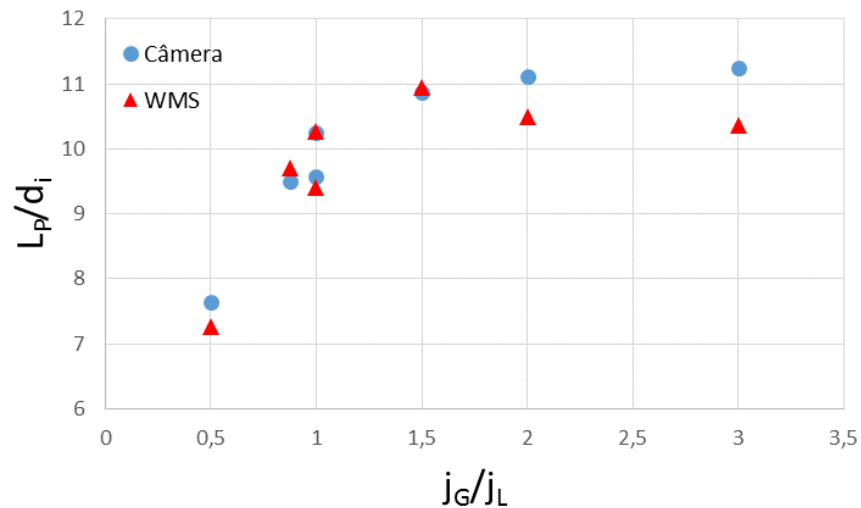


Figura 44 - Comprimento do pistão em função da razão das velocidades superficiais.

4.5.4 Frequência de passagem da célula unitária

Pela Figura 45 nota-se uma tendência do aumento da frequência com o aumento da velocidade superficial do líquido.

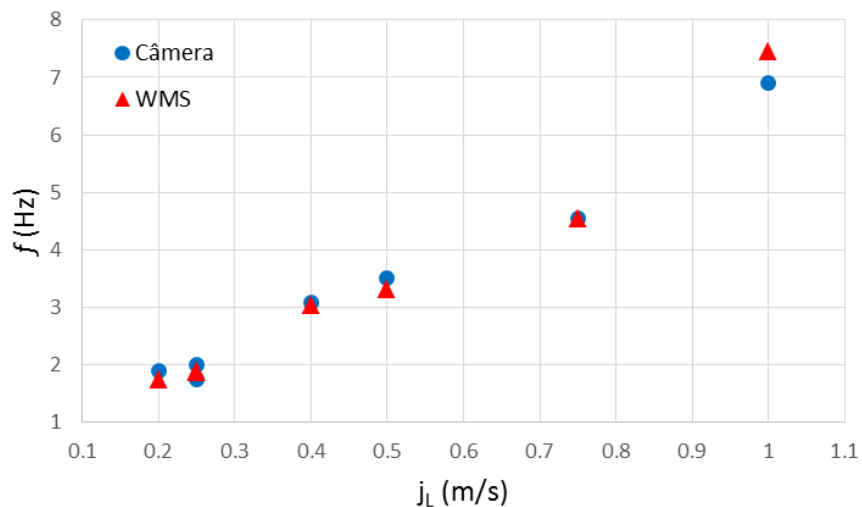


Figura 45 - Frequência de passagem da célula unitária em função da velocidade superficial de líquido.

4.5.5 Fração de vazio da bolha alongada e do pistão

Neste experimento ocorreu uma tendência do aumento da fração de vazio na região da bolha alongada (α_B) com o aumento da velocidade superficial do gás em relação ao do líquido. Já a fração de vazio na região do pistão (α_p) não se alterou significativamente. A Figura 46 apresenta o gráfico de α_B e α_p em relação à j_G/j_L .

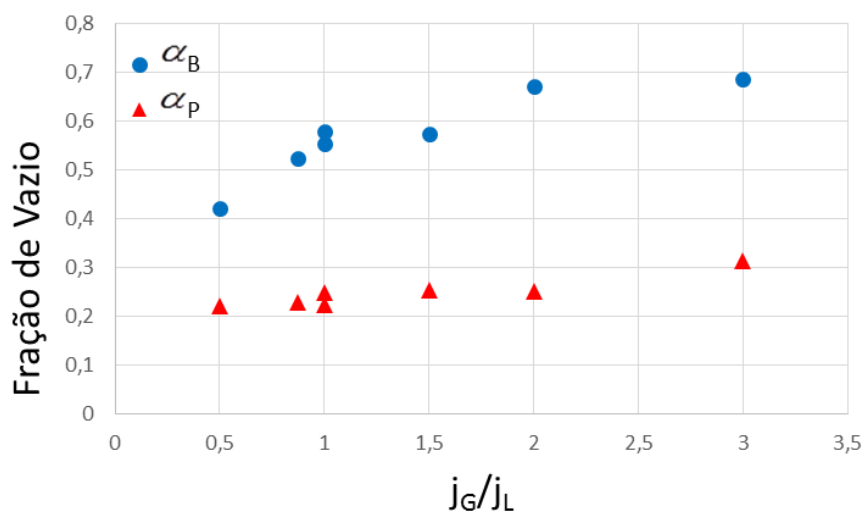


Figura 46 - Fração de vazio em função da razão da velocidade superficial do gás pelo do líquido.

4.5.6 Desvio padrão

O parâmetro característico que apresentou maior influência no desvio padrão foi a velocidade da bolha alongada. Pela Figura 47 nota-se um aumento na média dos desvios padrões com o aumento da velocidade da bolha alongada, ou seja, há um maior espalhamento dos dados quanto maior for a velocidade da bolha alongada. Além disso, um menor desvio padrão é encontrado pelo WMS em relação à câmera, para todos os pontos analisados.

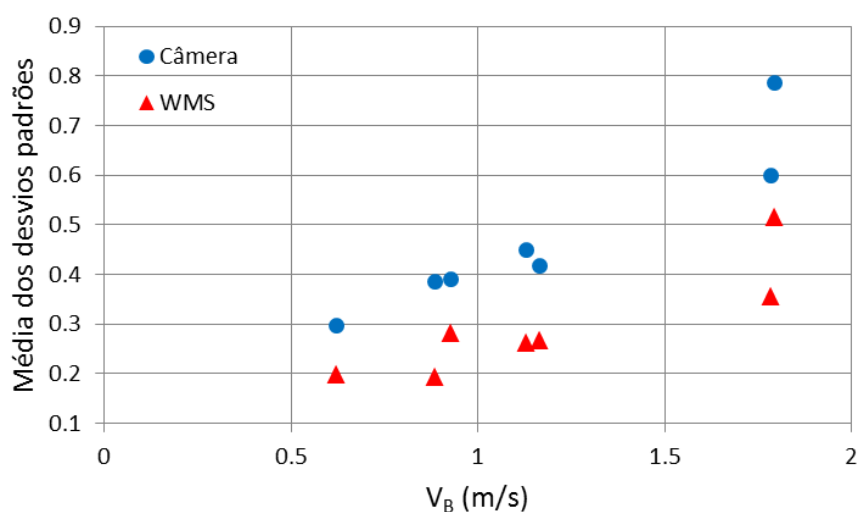


Figura 47 - Desvio padrão em função da velocidade da bolha alongada.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o estudo experimental do comportamento do escoamento bifásico de água e ar no padrão em golfadas em dutos verticais para diferentes combinações de vazão, com o objetivo de verificar a influência da variação das velocidades superficiais em cada parâmetro característico.

Um circuito de testes foi construído de forma a obter e coletar dados do escoamento. Para isso utilizou-se diversos equipamentos, dentre eles, um sensor de malha de eletrodos e uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens.

A análise dos resultados experimentais indicou que o processamento de dados da câmera e do WMS geraram valores com erros relativos na média de 4,8% e desvio padrão na média de 0,37. Os maiores erros relativos ocorreram por alguma ineficiência durante o processamento de dados, e os maiores desvios foram observados para os pontos com maiores velocidades de bolha alongada.

O comprimento da bolha, do pistão e da fração de vazio na bolha tenderam a aumentar com o aumento da razão j_G / j_L , além disso, foi observado um aumento mais acentuado no valor do comprimento do pistão (L_p) para valores de j_G / j_L menores que 1. O valor da fração de vazio no pistão (α_p) não se alterou a ponto de verificar alguma tendência como no valor da fração de vazio na bolha (α_B).

A frequência de passagem da célula unitária aumentou com o acréscimo da velocidade superficial do líquido.

O aumento da velocidade da mistura gerou a mesma resposta à velocidade da bolha alongada, que seguiu a tendência da equação proposta por Nicklin, porém com uma diferença em torno de 20%. Além disso, os dados mostraram que para mesma velocidade da mistura, aumentando j_L e diminuindo j_G , a velocidade da bolha aumenta.

De forma geral, a metodologia utilizada se mostrou eficiente na caracterização do escoamento bifásico líquido-ar em golfadas em dutos verticais, permitindo uma análise da influência da variação das velocidades superficiais nos parâmetros característicos.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Obter a fração de vazio na região do pistão e da bolha alongada por meio das imagens captadas pela câmera e comparar com os valores obtidos pelo sensor de malha de eletrodo;
- Desenvolver uma nova correlação para a velocidade da bolha e comparar com a de Nicklin;
- Comparar os parâmetros característicos obtidos com correlações atualizadas;
- Adicionar, tanto na programação do WMS quanto na da câmera, o cálculo da velocidade de deslocamento do pistão;
- Instalar na caixa de acrílico uma escala mais confiável;
- Aumentar o número de pontos experimentais com intuito de verificar onde se localiza a região de transição entre o padrão em bolhas dispersas e em golfadas;
- Aumentar o número de pontos experimentais que permita análise mais rebuscada dos dados;
- Substituir o reservatório superior de água que comporte vazões de água e de ar maiores, permitindo trabalhar com pontos experimentais mais próximos do padrão agitado;
- Trocar o medidor de vazão de gás por um automático e/ou com uma incerteza relativa menor que a do rotâmetro utilizado;
- Aumentar o comprimento característico da bancada experimental. Isso pode ser feito diminuindo o diâmetro da tubulação vertical ou aumentando a altura da seção de teste.

REFERÊNCIAS

ALVES, Rafael Fabrício. **Estudo da influência da pressão no escoamento bifásico gás-líquido em golfadas em dutos horizontais**. 2013. 90 f. Monografia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

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

CASTILLO, Fernando Enrique. **Caracterização Experimental do Escoamento Intermitente Líquido-Gás em Tubulações Horizontais**, 2013. 138 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DEVADRILL. **Trunkline flow assurance**. Disponível em <<http://www.devadrill.com/oilflow.html>> Acesso em: Fevereiro 19, 2014.

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

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2010. 710 p. ISBN 9788521617570.

FRANKLIN, E. **Modelagem numérica para seguimento dinâmico de bolhas em escoamento intermitente horizontal gás-líquido**. 2004. 231 f. Dissertação - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

HOUT, R.; BARNEA, D.; SHEMER, L. **Evolution of statistical parameters of gas-liquid slug flow along vertical pipes**. International Journal of Multiphase Flow 27, (2001) 1579-1602.

LUBNICKI, Frederico Miguel Fernández. **Estudo Numérico de Escoamento Turbulento em Padrão Anular Gás-Líquido em Dutos Verticais**. 2011. 100 f. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

MEDINA, César D. P. **Simulação numérica do escoamento bifásico líquido-gás em golfadas com transferência de calor em dutos horizontais**. 2011. 181 f. Dissertação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

MENDONÇA, Márcio Teixeira de; MEDEIROS, Marcello Augusto Faraco de (Ed.). **Turbulência**. Rio de Janeiro, RJ: ABCM, 2008. v. (Coleção cadernos de turbulência)

MUDDE, R. F.; SAITO, T. **Hydrodynamical similarities between bubble column and bubbly pipe flow**. J. Fluid Mech. (2001), vol. 437, 203-228.

NAKAYAMA, Andrea Erika. **Análise de modelos para o reconhecimento de padrões em escoamentos bifásicos líquido-gás ascendentes em tubulações verticais**. 2011. 169 f. Dissertação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

NICKLIN, D. J.; WILKES, J. O.; DAVIDSON, J. F. **Two-phase flow in vertical tubes**. Trans. Int. Chem. Eng. 40, 61-68, 1962.

PANDOLFO, Diego. **Estudo da influência da pressão no escoamento bifásico gás-líquido em golfadas em dutos horizontais**. 2011. 105 f. Monografia - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

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 - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

SCHLUMBERGER. **Multiphase flow solution**. Disponível em: <http://www.software.slb.com/PublishingImages/PIPESIM_Flow_TN.jpg> Acesso em: Fevereiro 19, 2014.

SHARAF,S; DA SILVA, M; HAMPEL, U; ZIPPE, C; BEYER, M; AZZOPARDI, B. **Comparison between wire mesh sensor and gamma densitometry void measurements in two-phase flow**. Measurement Science and Technology. 22 (2011) 104019 (13 f).

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

SILVA, Elinaldo Santos. **Estudo do escoamento bifásico em risers em movimento na produção marítima de petróleo em águas profundas.** 2006. 105 f. Dissertação – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

SOARES, Murilo Augusto. **Caracterização do escoamento bifásico gás-líquido utilizando o sensor de malha de eletrodos – *wire-mesh sensor*.** 2010. 94f. Monografia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SOUZA, Ricardo Pires Peçanha. **Escoamento bifásico líquido-gás: previsão de gradientes de pressão com a correlação de Lockhart & Martinelli e fluidodinâmica computacional.** 2009. 87 f. Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

STURZA, Arthur Claro; KOVALSKI, Sidney Augusto. **Visualização do escoamento em golfadas com mudança de direção.** 2010. 62 f. Monografia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

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

Y. Taitel; D. Barnea; A.E. Dukler. **Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes.** AIChE Journal, Vol. 26, No. 3, 345-354, 1980.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

Este apêndice explica como foi realizada a calibração da placa de orifício responsável por medir a vazão de gás na bancada.

A calibração é feita utilizando como padrão dois rotômetros modelos 96039 e 96044 da marca Rheotest Haake. Suas faixas de vazões são mostradas na Tabela A1.

Tabela A1 – Faixa de vazões dos rotômetros.

Modelo	Identificação	Faixa de vazões (20 – 100 SKT)
96039	R039	272 – 947 L / h
96044	R044	879 – 3179 L / h

Onde SKT é a escala (que varia de 0 a 100) marcada nos rotômetros e se relacionam linearmente com a vazão em litros por hora. A escala de 0 a 20 SKT não é utilizada por ser fundo de escala do equipamento, podendo gerar erros estatísticos durante o processo.

Os rotômetros são ligados em série com a placa de orifício e com o reservatório de ar, na qual a vazão é controlada por uma válvula.

Os mesmos transmissores de pressão citados neste trabalho são utilizados para calibração. Eles fornecem a pressão manométrica e a temperatura à montante da placa (P_1, T_1) e a queda de pressão que ocorre após a passagem do gás pela placa (ΔP).

Apresentado o circuito de calibração, parte-se para as equações envolvidas neste processo. A equação (A1) é para o cálculo da vazão volumétrica na placa de orifício.

$$Q_{PO} = CYA_o \sqrt{\frac{2\Delta P}{(1-\beta^4)\rho_1}} \quad (A1)$$

Onde Q_{PO} é a vazão volumétrica na placa de orifício, C é o coeficiente de descarga, Y é o coeficiente de expansão, A_o é a área do orifício, β é a relação

entre os diâmetros do orifício e da tubulação e, ρ_1 é a massa específica do gás à montante, que pode ser calculada pela equação (A2).

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1} \quad (\text{A2})$$

Sendo P_1 , T_1 e R , respectivamente, a pressão absoluta e a temperatura à montante e a constante do ar.

O produto do coeficiente de descarga pelo de expansão é expresso como uma função de Reynolds e da razão de $\Delta P / P_1$, conforme a equação (A3):

$$CY = CY(\text{Re}^{-0.5}, \Delta P / P_1) \quad (\text{A3})$$

Isolando CY da equação (A1) e substituindo Q_{PO} por Q_{RO} , temos a equação (A4):

$$CY = \frac{Q_{RO}}{A_o} \sqrt{\frac{(1-\beta^4)\rho_1}{2\Delta P}} \quad (\text{A4})$$

Onde Q_{RO} é medido pelo rotâmetro e as outras incógnitas são conhecidas ou obtidas pelos transmissores de pressão, permitindo assim o cálculo experimental de CY .

Etapas para o processo de calibração:

1. Selecionar e conectar o rotâmetro desejado à placa de orifício;
2. Regular a pressão de saída do gás do reservatório (começando em 1 bar);
3. Regular a vazão de gás começando em 20 SKT;
4. No programa supervisor, que calcula e grava os valores de $\text{Re}^{-0.5}$, $\Delta P / P_1$ e CY , além das propriedades do fluido, introduzir o valor de SKT lido no rotâmetro;
5. Gravar os dados por no mínimo 4 segundos, dando uma média de 10 pontos de medição;

6. Repetir item 3 e 4 até toda escala do rotâmetro ser percorrida. (Foi percorrida intercalando de 5 em 5 SKT);
7. Após chegar a 100 SKT volte para o passo 2 e aumente a pressão em 1 bar. Caso a pressão esteja nos 6 bar, passe para o próximo passo;
8. Feche a válvula do gás e retorne a pressão de saída para 1 bar;
9. Repita os passos de 1 a 8 para os dois rotômetros.

Os valores de $Re^{-0,5}$, $\Delta P/P_1$ e CY obtidos, são inseridos em uma tabela com intuito de encontrar uma função que correlaciona CY com $Re^{-0,5}$ e $\Delta P/P_1$. Foi proposta uma função polinomial de segundo grau para $Re^{-0,5}$ e do terceiro grau para $\Delta P/P_1$ utilizando o programa *Surfer 11*, conforme a equação seguinte:

$$\begin{aligned}
 CY = & A_{00} + A_{01} \Delta P/P_1 + A_{02} \Delta P/P_1^2 + A_{03} \Delta P/P_1^3 + \\
 & A_{10} Re^{-0,5} + A_{11} Re^{-0,5} \Delta P/P_1 + A_{12} Re^{-0,5} \Delta P/P_1^2 + \\
 & A_{13} Re^{-0,5} \Delta P/P_1^3 + A_{20} Re^{-0,5^2} + A_{21} Re^{-0,5^2} \Delta P/P_1 + \\
 & A_{22} Re^{-0,5^2} \Delta P/P_1^2 + A_{23} Re^{-0,5^2} \Delta P/P_1^3
 \end{aligned} \tag{A5}$$

Encontrada a função polinomial, ela é inserida no código do programa supervisorio, que é responsável pelo controle da bancada. Como ele está conectado aos transmissores de pressão pela rede *Fieldbus*, os valores de P_1 , T_1 e ΔP são retirados em tempo real, permitindo o cálculo de CY e, então, da vazão mássica de gás que passa pela placa de orifício (\dot{m}).

APÊNDICE B – CÁLCULO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS NA SEÇÃO DE TESTE

Neste apêndice são explicados os cálculos para a velocidade superficial do gás e do líquido na seção de teste.

Cálculo da velocidade superficial do gás na seção de teste

A velocidade superficial do gás é j_G é definida pela equação (B1).

$$j_G = \frac{Q_{ST}}{A} \quad (B1)$$

Onde Q_{ST} é a vazão volumétrica na seção de teste e A é a área transversal da tubulação.

Visto que a fase gasosa é compressível, então sua massa específica não é a mesma em duas seções do escoamento com pressões diferentes, entretanto, a vazão mássica é.

Aplicando a conservação de massa na tubulação de saída da placa de orifício e na seção de testes (equação (B2)) e, sabendo que $\dot{m} = \rho.Q$, obtemos a equação (B3).

$$\dot{m}_{PO} = \dot{m}_{ST} \quad (B2)$$

$$\rho_{PO}Q_{PO} = \rho_{ST}Q_{ST} \quad (B3)$$

Sendo ρ_{PO} e Q_{PO} , respectivamente, a massa específica e a vazão volumétrica do gás na placa de orifício; ρ_{ST} e Q_{ST} na seção de teste.

Isolando Q_{ST} da equação (B3) e substituindo na equação (B1) chega-se na equação (B4):

$$j_G = \frac{\rho_{PO}Q_{PO}}{\rho_{ST}A} \quad (B4)$$

Onde, A é calculada pela equação (B5) (d_i é o diâmetro da tubulação interna na seção de teste), ρ_{ST} pela equação (B6) (considerando que o ar se comporta como gás ideal), e Q_{p0} pela equação (A1).

$$A = \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (\text{B5})$$

$$\rho_{ST} = \frac{P_{ST}}{R.T_{ST}} \quad (\text{B6})$$

Com os dados obtidos dos transmissores de pressão, todas incógnitas para o cálculo do j_G são determinadas em tempo real pelo programa *LabView*.

Cálculo da velocidade superficial do líquido na seção de teste

Seu cálculo é mais simples, pois, além do líquido ser incompressível ($\rho = cte$), a vazão volumétrica (Q_L) é medida diretamente pelo medidor de vazão do tipo Coriolis. Assim, o cálculo de j_L na seção de teste é obtido pela equação (B7).

$$j_L = \frac{Q_L}{A} \quad (\text{B7})$$

APÊNDICE C – ANÁLISE DE INCERTEZAS

Neste apêndice são estimadas as incertezas contidas nos componentes do circuito experimental, visando avaliar a incerteza na medição das velocidades superficiais do líquido e do gás seguindo a metodologia descrita por Fox et al. (2010).

Suponha que um resultado R é função de n variáveis independentes, expresso matematicamente por $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$.

O efeito sobre R de um erro na medição de x_i pode ser dado pela equação (C1).

$$\delta R_i = \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \quad (C1)$$

Onde δR é a incerteza no resultado R e δx_i é a incerteza em cada variável x_i .

A variação relativa em R é dado por:

$$\frac{\delta R_i}{R} = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\delta x_i}{x_i} \quad (C2)$$

Escrevendo na notação de incerteza relativa, obtemos a equação (C3).

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} u_{x_i} \quad (C3)$$

Segundo a referência, a melhor representação para a incerteza relativa do resultado é dada pela equação (C4).

$$u_R = \pm \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C4)$$

As incertezas relativas das velocidades superficiais de líquido e de gás serão calculadas de acordo com a equação (C4), considerando as incertezas relativas de cada instrumento, apresentadas na Tabela C1.

Tabela C1 - Incerteza relativa dos instrumentos utilizados.

Variável	Incerteza Relativa
d_i	$\pm 0,10\%$
d_o	$\pm 0,05\%$
P	$\pm 0,05\%$
T	$\pm 0,25\%$
Q_L	$\pm 0,15\%$
Q_{RO}	$\pm 2,50\%$

O diâmetro interno da tubulação ($d_i = 25,8\text{mm}$) foi mensurado por um paquímetro com resolução de 0,05 mm. A incerteza é assumida como a metade da menor divisão marcada na escala do vernier, ou seja, 0,025 mm. A incerteza relativa é calculada dividindo a incerteza do instrumento pelo diâmetro, resultando em $\pm 0,10\%$.

O furo na placa de orifício ($d_o = 1\text{mm}$) foi feito por uma broca cujo diâmetro foi medido por um micrômetro de 0,001 mm de resolução. Sua incerteza relativa é de $\pm 0,05\%$.

A incerteza relativa dos medidores de pressão é fornecida pelo fabricante, que é de $\pm 0,05\%$.

A incerteza na medição da temperatura é definida como a metade da menor divisão da escala do instrumento, que é de 0,1°C. A máxima incerteza relativa é a razão da incerteza pela temperatura mínima medida, que foi de 20°C. Resultando em uma incerteza de $\pm 0,25\%$.

A incerteza relativa da vazão volumétrica de líquido é garantida pelo fabricante do equipamento, que é de $\pm 0,15\%$.

O rotâmetro tem sua incerteza estimada como a metade da sua menor divisão de escala, ou seja, 1/2 SKT. A incerteza relativa é calculada dividindo a incerteza

pelo menor valor utilizado na escala, que foi de 20 SKT, resultando em uma incerteza relativa de $\pm 2,50\%$.

Conhecidos os valores das incertezas relativas dos instrumentos utilizados, aplica-se a equação (C4) nas fórmulas fórmula de cada variável utilizada no cálculo das velocidades superficiais.

A seguir serão mostradas as etapas dos cálculos realizados para determinação das incertezas relativas das velocidades superficiais.

- Cálculo da incerteza relativa de ρ :

Considerando o ar como um gás perfeito, sua massa específica pode ser avaliada por, $\rho = \frac{P}{RT}$, logo, a incerteza relativa (u_ρ) será dada por:

$$u_\rho = \pm \left[\left(\frac{P}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} u_P \right)^2 + \left(\frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} u_T \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ substituindo } \rho, \frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{1}{RT} \text{ e } \frac{\partial \rho}{\partial T} = -\frac{P}{RT^2}$$

Obtém:

$$u_\rho = \pm \left[\left(\frac{\frac{P}{RT} \frac{1}{RT} u_P}{\frac{P}{RT}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{T}{RT} \left(-\frac{P}{RT^2} \right) u_T}{\frac{P}{RT}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Inserindo os valores de u_P e u_T da Tabela C1, resulta em $u_\rho = \pm 0,25\%$.

- Cálculo da incerteza relativa de A_o :

Conhecida a equação da área, $A_o = \frac{\pi d_o^2}{4}$, a incerteza relativa é calculada por:

$$u_{A_o} = \pm \left[\left(\frac{\frac{d_o}{\frac{\pi d_o^2}{4}} \frac{\pi d_o}{2} u_{d_o}}{\frac{d_o}{\frac{\pi d_o^2}{4}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ substituindo } u_{d_o} = \pm 0,05\%$$

Obtém o valor de $u_{A_o} = \pm 0,10\%$ e, da mesma forma, calcula-se a incerteza relativa da área da tubulação, resultando em $u_A = \pm 0,20\%$.

- Cálculo da incerteza relativa do β :

Sabendo que $\beta = \frac{d_o}{d_i}$, chega-se em:

$$u_\beta = \pm \left[\left(\frac{\frac{d_o}{d_o} \cdot 1}{\frac{d_o}{d_i}} u_{d_o} \right)^2 + \left(\frac{\frac{d_i}{d_o} \left(-\frac{d_o}{d_i^2} \right)}{\frac{d_i}{d_i}} u_{d_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Calculando, obtém o valor de $u_\beta = \pm 0,11\%$.

- Cálculo da incerteza relativa de CY :

Dada a equação: $CY = \frac{Q_{RO}}{A_o} \sqrt{\frac{(1-\beta^4)\rho_1}{2\Delta P}}$

Após fazer as cinco derivadas necessárias, chega-se em:

$$u_{CY} = \pm \left[(u_{Q_{RO}})^2 + (u_{A_o})^2 + (u_\beta)^2 + \left(\frac{1}{2} u_{\Delta P} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} u_{\rho_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Substituindo os valores, resulta em $u_{CY} = \pm 2,5\%$.

- Cálculo da incerteza relativa de Q_{PO} :

Após feita as cinco derivadas necessárias para a equação

$Q_{PO} = CYA_o \sqrt{\frac{2\Delta P}{(1-\beta^4)\rho_1}}$, chega-se em:

$$u_{Q_{PO}} = \pm \left[(u_{CY})^2 + (u_{A_o})^2 + (u_\beta)^2 + \left(\frac{1}{2} u_{\Delta P} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} u_{\rho_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Substituindo os valores, obtém que $u_{Q_{PO}} = \pm 2,52\%$

- Cálculo da incerteza relativa de j_G :

Conhecida a fórmula: $j_G = \frac{\rho_{PO} \cdot Q_{PO}}{\rho_{ST} \cdot A}$, e aplicando a equação (C4), resulta em:

$$u_{j_G} = \pm \left[(u_{\rho_{PO}})^2 + (u_{\rho_{ST}})^2 + (u_{Q_{PO}})^2 + (u_A)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Substituindo os valores, chega-se no valor de $u_{j_G} = \pm 2,55\%$.

- Cálculo da incerteza relativa de j_L :

Da equação $j_L = \frac{Q_L}{A}$, chegamos que $u_{j_L} = \pm 0,25\%$.

Na Tabela C2 são introduzidos os valores das incertezas relativas nas medidas das velocidades superficiais do líquido e do gás.

Tabela C2 - Incerteza relativa na velocidade superficial do líquido e do gás.

Variável	Incerteza Relativa
j_G	$\pm 2,55\%$
j_L	$\pm 0,25\%$

APÊNDICE D – RESULTADOS

Neste apêndice são apresentados os resultados para todos os pontos experimentais das três baterias de teste. Nas figuras e tabelas a seguir, B é a abreviação de bateria e P de ponto.

Tabela D1 - Velocidade superficial real.

	$j_L \text{ real}$	$j_G \text{ real}$
B1P1	0,2000	0,3012
B2P1	0,1999	0,3056
B3P1	0,1998	0,301
B1P3	0,2500	0,5077
B2P3	0,2500	0,5070
B3P3	0,2501	0,4994
B1P4	0,2500	0,7469
B2P4	0,2499	0,7483
B3P4	0,2499	0,7546
B1P6	0,3999	0,3564
B2P6	0,3999	0,3518
B3P6	0,3997	0,3532
B1P8	0,5000	0,5053
B2P8	0,5000	0,5039
B3P8	0,4999	0,5034
B1P10	0,7500	0,7511
B2P10	0,7500	0,7536
B3P10	0,7499	0,7532
B1P11	1,0000	0,5085
B2P11	1,0000	0,5013
B3P11	0,9999	0,5023

Tabela D2 - Valores dos parâmetros característicos obtidos pelo WMS nos ensaios preliminares.

	$V_B (m/s)$	$L_B (m)$	$L_p (m)$	$f (Hz)$	α_B	α_p
B1P1	0.721	0.105	0.203	3.150	0.578	0.285
B2P1	0.716	0.113	0.210	2.946	0.616	0.262
B3P1	0.748	0.112	0.228	2.862	0.665	0.259
B1P3	0.874	0.182	0.257	2.744	0.637	0.195
B2P3	0.889	0.184	0.215	2.581	0.659	0.207
B3P3	0.983	0.173	0.306	2.841	0.640	0.219
B1P4	1.098	0.214	0.160	3.155	0.613	0.301
B2P4	1.121	0.302	0.205	3.013	0.608	0.307
B3P4	1.228	0.373	0.179	3.273	0.604	0.330

B1P6	0.938	0.058	0.144	5.691	0.515	0.240
B2P6	0.921	0.082	0.182	6.035	0.512	0.242
B3P6	0.992	0.115	0.262	6.281	0.568	0.259
B1P8	1.245	0.125	0.233	3.372	0.601	0.169
B2P8	1.172	0.123	0.219	3.384	0.603	0.168
B3P8	1.260	0.136	0.301	3.717	0.611	0.187
B1P10	1.779	0.110	0.150	9.105	0.495	0.260
B2P10	1.779	0.103	0.177	9.449	0.489	0.259
B3P10	1.910	0.156	0.205	9.105	0.541	0.286
B1P11	1.910	0.066	0.138	16.976	0.445	0.245
B2P11	1.876	0.078	0.084	16.287	0.443	0.238
B3P11	2.063	0.074	0.128	15.293	0.453	0.231

Tabela D3 - Valores dos parâmetros característicos obtidos pela câmera.

	$V_B(m/s)$	$L_B(m)$	$L_p(m)$	$f(Hz)$
B1P1	0,632	0,097	0,295	1,873
B2P1	0,659	0,127	0,264	1,937
B3P1	0,689	0,134	0,283	1,892
B1P3	0,846	0,214	0,290	1,856
B2P3	0,867	0,200	0,257	2,091
B3P3	1,002	0,257	0,314	2,053
B1P4	1,009	0,329	0,302	1,814
B2P4	0,977	0,315	0,268	1,897
B3P4	1,175	0,450	0,300	1,527
B1P6	0,899	0,092	0,244	3,105
B2P6	0,921	0,093	0,254	3,062
B3P6	1,009	0,135	0,237	3,059
B1P8	1,139	0,125	0,233	3,599
B2P8	1,160	0,129	0,241	3,532
B3P8	1,334	0,175	0,267	3,375
B1P10	1,659	0,143	0,247	4,812
B2P10	1,717	0,150	0,263	4,725
B3P10	1,726	0,184	0,283	4,092
B1P11	1,755	0,109	0,208	6,633
B2P11	1,716	0,117	0,192	6,378
B3P11	1,846	0,080	0,190	7,702

Tabela D4 - Desvio Padrão de cada parâmetro característico nos ensaios preliminares.

	Desvio Padrão da câmera				Desvio Padrão do WMS					
	$V_B(m/s)$	$L_B(m)$	$L_p(m)$	$f(Hz)$	$V_B(m/s)$	$L_B(m)$	$L_p(m)$	$f(Hz)$	α_B	α_P
B1P1	0,149	0,041	0,159	1,436	4,965	18,765	15,640	10,189	0,060	0,052
B2P1	0,153	0,043	0,164	0,838	6,259	71,095	36,319	24,870	0,074	0,071

B3P1	0,176	0,066	0,152	0,745	4,492	35,256	3,381	36,554	0,087	0,074
B1P3	0,256	0,071	0,163	0,781	1,944	22,850	23,665	29,188	0,115	0,054
B2P3	0,179	0,074	0,144	0,797	5,979	8,065	61,448	22,654	0,089	0,063
B3P3	0,350	0,117	0,254	1,825	0,162	29,371	44,388	8,863	0,094	0,045
B1P4	0,449	0,156	0,580	1,404	0,697	6,278	9,063	44,481	0,114	0,064
B2P4	0,364	0,158	0,352	1,649	1,564	15,892	28,660	39,726	0,101	0,059
B3P4	0,680	0,261	2,224	2,577	0,174	9,376	34,050	26,998	0,128	0,068
B1P6	0,107	0,020	0,130	1,310	5,146	5,372	1,798	40,697	0,070	0,066
B2P6	0,120	0,022	0,127	1,335	2,373	17,304	8,495	47,298	0,067	0,061
B3P6	0,169	0,034	0,146	1,160	0,126	39,345	16,577	19,158	0,021	0,066
B1P8	0,125	0,030	0,118	1,386	1,127	9,324	4,730	28,152	0,059	0,046
B2P8	0,123	0,037	0,119	1,337	0,118	4,909	2,363	24,538	0,056	0,046
B3P8	0,294	0,060	0,140	1,233	0,094	24,947	2,970	22,099	0,077	0,044
B1P10	0,412	0,042	0,140	1,844	2,153	9,147	7,756	66,711	0,087	0,061
B2P10	0,350	0,048	0,158	1,763	4,352	15,913	5,222	69,786	0,088	0,059
B3P10	0,792	0,096	0,356	1,595	0,216	21,729	13,133	75,589	0,074	0,047
B1P11	0,390	0,033	0,150	4,863	5,046	15,396	6,359	34,010	0,066	0,063
B2P11	0,302	0,030	0,211	2,283	6,277	3,326	8,206	60,450	0,064	0,058
B3P11	0,268	0,026	0,123	2,300	2,805	9,515	4,473	69,755	0,090	0,059

Tabela D5 - Valores dos parâmetros característicos gerados pela nova programação do WMS.

	$V_B(m/s)$	$L_B(m)$	$L_P(m)$	$f(Hz)$	α_B	α_P
B1P1	0,608	0,120	0,263	1,821	0,535	0,260
B2P1	0,616	0,131	0,301	1,746	0,604	0,243
B3P1	0,640	0,127	0,283	1,681	0,584	0,258
B1P3	0,835	0,231	0,273	1,816	0,671	0,238
B2P3	0,844	0,218	0,272	1,909	0,664	0,248
B3P3	0,975	0,280	0,267	1,927	0,681	0,265
B1P4	1,056	0,342	0,304	1,936	0,680	0,302
B2P4	1,069	0,355	0,175	1,915	0,677	0,298
B3P4	1,269	0,489	0,324	1,746	0,703	0,337
B1P6	0,902	0,083	0,251	3,203	0,510	0,241
B2P6	0,895	0,090	0,247	3,137	0,504	0,229
B3P6	0,985	0,149	0,252	2,748	0,557	0,217
B1P8	1,107	0,136	0,241	3,234	0,541	0,220
B2P8	1,118	0,134	0,235	3,306	0,537	0,218
B3P8	1,270	0,186	0,252	3,372	0,588	0,236
B1P10	1,695	0,151	0,255	4,599	0,567	0,237
B2P10	1,695	0,151	0,255	4,599	0,567	0,237
B3P10	1,969	0,220	0,285	4,451	0,606	0,270
B1P11	1,793	0,106	0,161	8,231	0,378	0,220

B2P11	1,785	0,079	0,185	7,302	0,381	0,224
B3P11	1,810	0,094	0,216	6,852	0,504	0,222

Tabela D6 - Desvio padrão do WMS após ajustes na programação.

	$V_B(m/s)$	$L_B(m)$	$L_P(m)$	$f(Hz)$	α_B	α_P
B1P1	0,093	0,050	0,137	0,810	0,123	0,065
B2P1	0,075	0,054	0,148	0,598	0,112	0,054
B3P1	0,096	0,054	0,143	0,775	0,126	0,066
B1P3	0,107	0,084	0,121	0,595	0,094	0,055
B2P3	0,106	0,075	0,124	0,661	0,094	0,069
B3P3	0,134	0,101	0,136	0,766	0,106	0,074
B1P4	0,149	0,154	0,166	1,005	0,122	0,097
B2P4	0,159	0,134	0,070	0,908	0,126	0,090
B3P4	0,160	0,187	0,188	0,780	0,129	0,116
B1P6	0,096	0,042	0,115	1,472	0,122	0,070
B2P6	0,104	0,040	0,121	1,330	0,113	0,053
B3P6	0,099	0,050	0,108	0,983	0,098	0,060
B1P8	0,137	0,049	0,101	1,068	0,101	0,056
B2P8	0,126	0,045	0,090	1,132	0,103	0,056
B3P8	0,143	0,067	0,114	1,285	0,096	0,060
B1P10	0,239	0,055	0,102	1,520	0,073	0,050
B2P10	0,239	0,055	0,102	1,520	0,073	0,050
B3P10	0,273	0,079	0,119	1,749	0,062	0,049
B1P11	0,312	0,051	0,048	3,224	0,103	0,065
B2P11	0,301	0,036	0,071	2,205	0,103	0,065
B3P11	0,178	0,034	0,085	2,241	0,105	0,052

Tabela D7 - Novo desvio padrão de cada parâmetro característico.

	Desvio Padrão da Câmera				Desvio Padrão do WMS					
	$V_B(m/s)$	$L_B(m)$	$L_P(m)$	$f(Hz)$	$V_B(m/s)$	$L_B(m)$	$L_P(m)$	$f(Hz)$	α_B	α_P
B1P1	0,142	0,041	0,172	0,870	0,093	0,050	0,137	0,810	0,123	0,065
B2P1	0,093	0,041	0,141	0,830	0,075	0,054	0,148	0,598	0,112	0,054
B3P1	0,188	0,056	0,165	0,814	0,096	0,054	0,143	0,775	0,126	0,066
B1P3	0,134	0,064	0,166	0,645	0,107	0,084	0,121	0,595	0,094	0,055
B2P3	0,179	0,074	0,144	0,797	0,106	0,075	0,124	0,661	0,094	0,069
B3P3	0,216	0,117	0,254	1,825	0,134	0,101	0,136	0,766	0,106	0,074
B1P4	0,482	0,182	0,251	0,765	0,149	0,154	0,166	1,005	0,122	0,097
B2P4	0,369	0,157	0,202	0,720	0,159	0,134	0,070	0,908	0,126	0,090
B3P4	0,854	0,401	0,210	0,790	0,160	0,187	0,188	0,780	0,129	0,116
B1P6	0,107	0,020	0,130	1,310	0,096	0,042	0,115	1,472	0,122	0,070
B2P6	0,120	0,022	0,127	1,335	0,104	0,040	0,121	1,330	0,113	0,053
B3P6	0,169	0,034	0,146	1,160	0,099	0,050	0,108	0,983	0,098	0,060

B1P8	0,125	0,030	0,118	1,386	0,137	0,049	0,101	1,068	0,101	0,056
B2P8	0,123	0,037	0,119	1,337	0,126	0,045	0,090	1,132	0,103	0,056
B3P8	0,294	0,060	0,140	1,233	0,143	0,067	0,114	1,285	0,096	0,060
B1P10	0,413	0,042	0,140	1,837	0,239	0,055	0,102	1,520	0,073	0,050
B2P10	0,350	0,048	0,158	1,755	0,239	0,055	0,102	1,520	0,073	0,050
B3P10	0,576	0,080	0,157	1,631	0,273	0,079	0,119	1,749	0,062	0,049
B1P11	0,390	0,033	0,150	4,863	0,312	0,051	0,048	3,224	0,103	0,065
B2P11	0,296	0,030	0,088	2,446	0,301	0,036	0,071	2,205	0,103	0,065
B3P11	0,324	0,023	0,099	2,882	0,178	0,034	0,085	2,241	0,105	0,052

APÊNDICE E – HISTOGRAMAS

Neste apêndice são mostrados os histogramas dos parâmetros característicos obtidos pelo WMS e pela câmera para os sete pontos experimentais (P1, P3, P4, P6, P8, P10, P11) apenas os da primeira bateria de teste, devido à semelhança no resultado com as outras duas baterias.

Desta forma é possível observar a distribuição dos valores processados para todas células unitárias identificadas, sendo que, na maioria dos dados nota-se a tendência de uma distribuição Gaussiana, principalmente para os dados obtidos pela câmera.

Os histogramas não estão na mesma escala. A distribuição foi feita em vinte partes iguais, do menor para o maior valor obtido de cada parâmetro em cada ponto.

Histogramas para velocidade da bolha alongada, sendo a imagem da esquerda relacionada aos dados da câmera e a da direita ao do WMS.

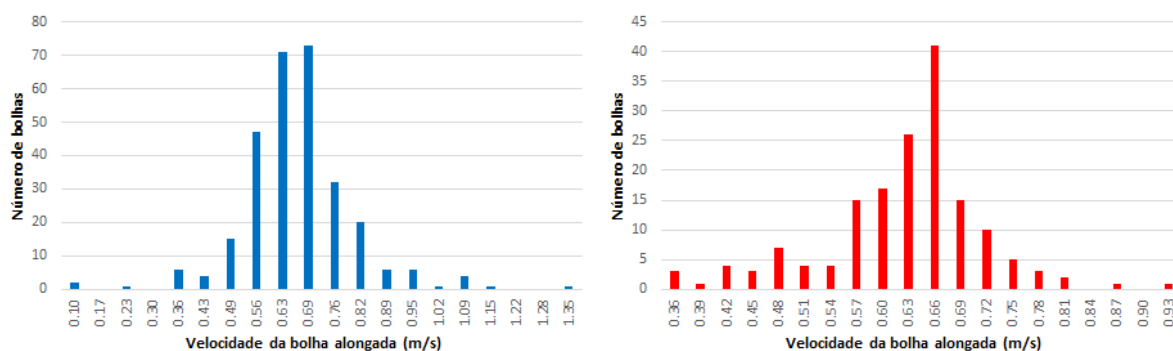


Figura E 1 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 1.

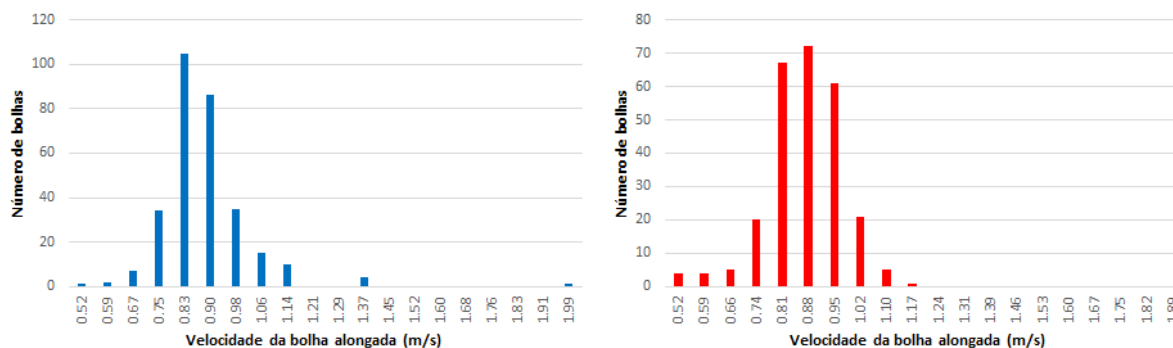


Figura E 2 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 3.

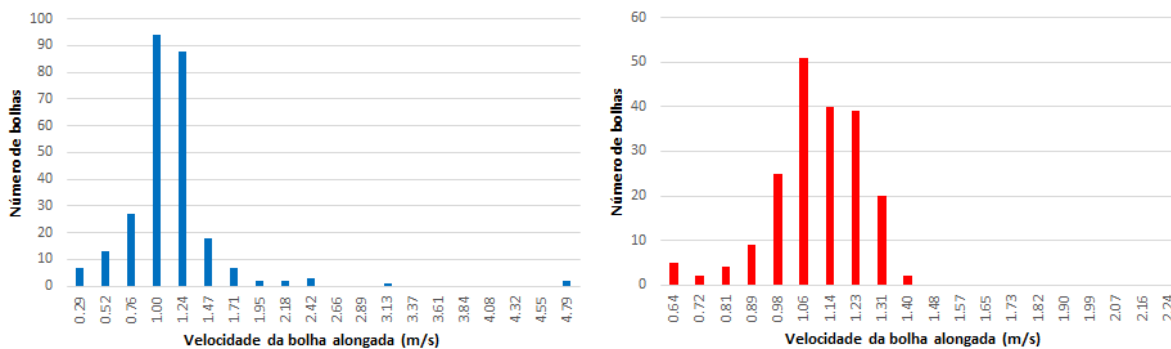


Figura E 3 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 4.

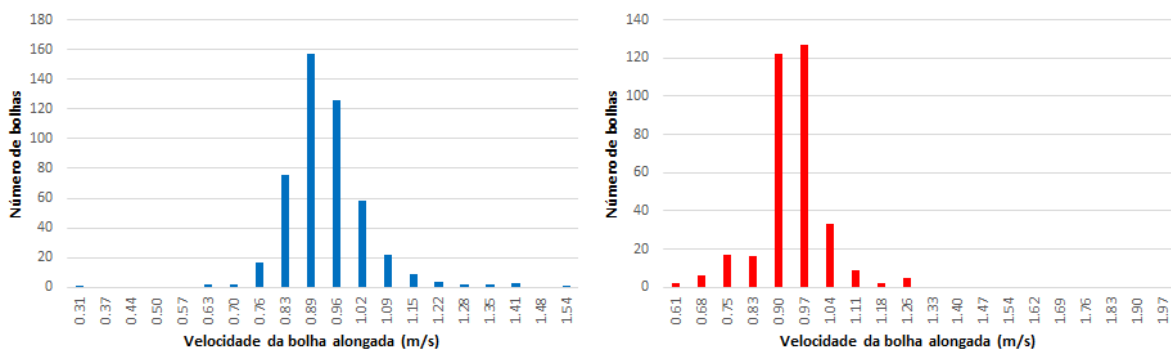


Figura E 4 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 6.

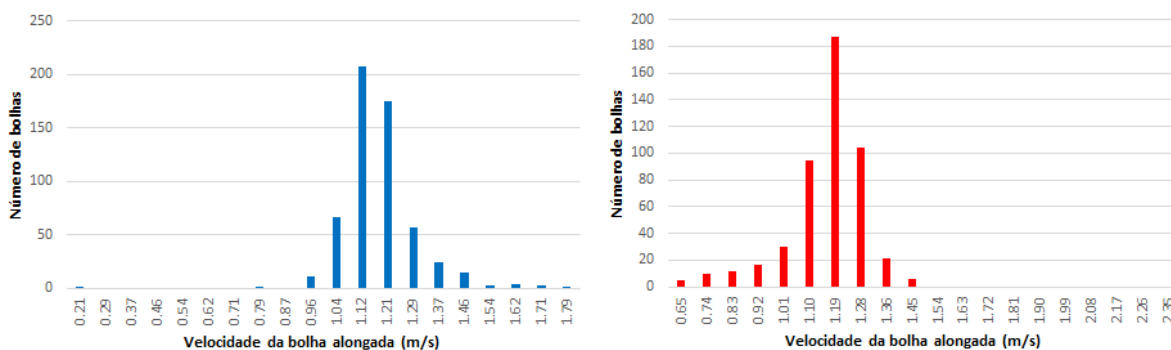


Figura E 5 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 8.

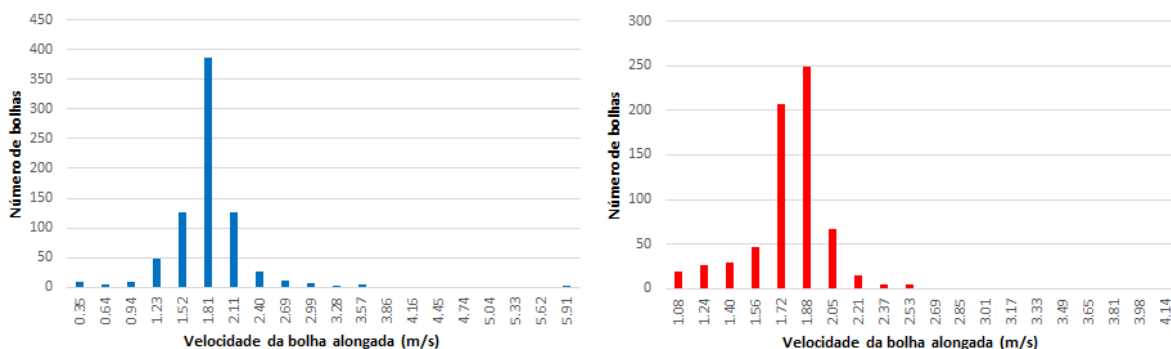


Figura E 6 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 10.

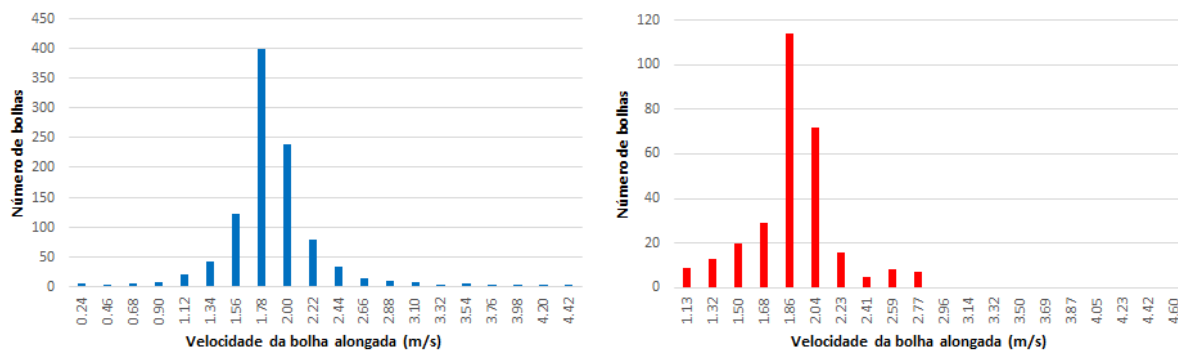


Figura E 7 - Histograma da velocidade da bolha alongada obtida no ponto 11.

Histogramas para comprimento da bolha, sendo a imagem da esquerda relacionada aos dados da câmera e a da direita ao do WMS.

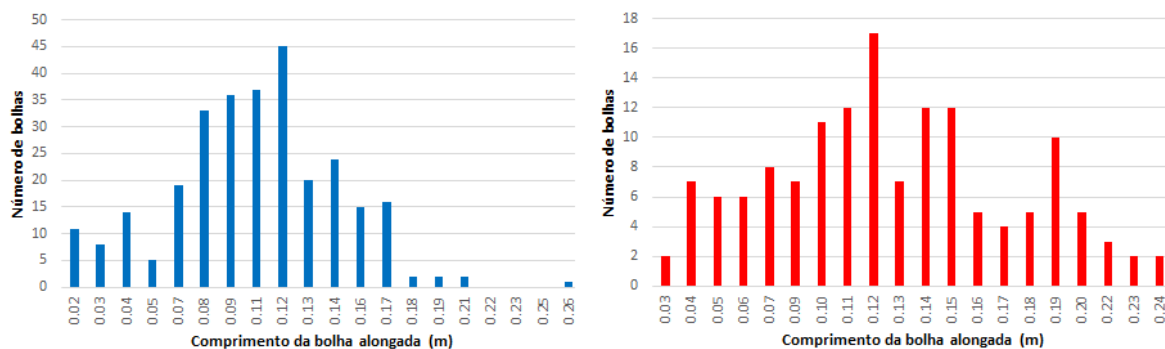


Figura E 8 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 1.

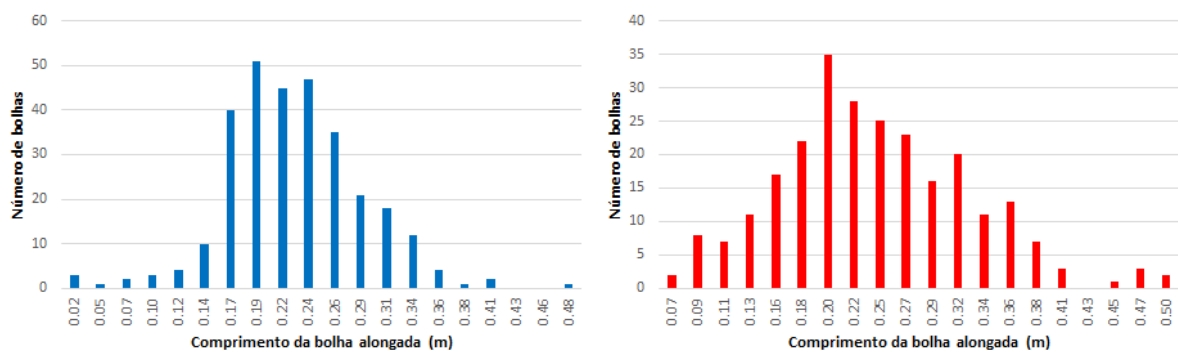


Figura E 9 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 3.

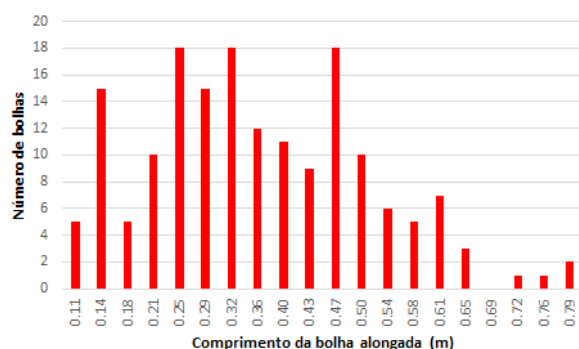
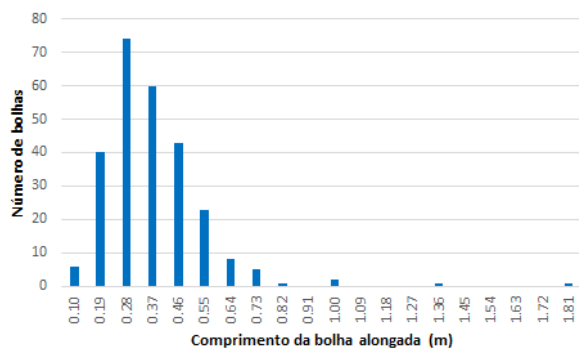


Figura E 10 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 4.

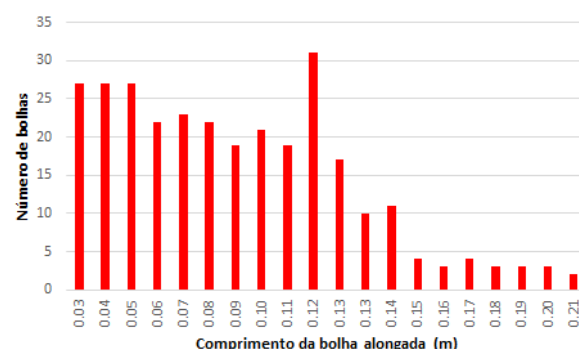
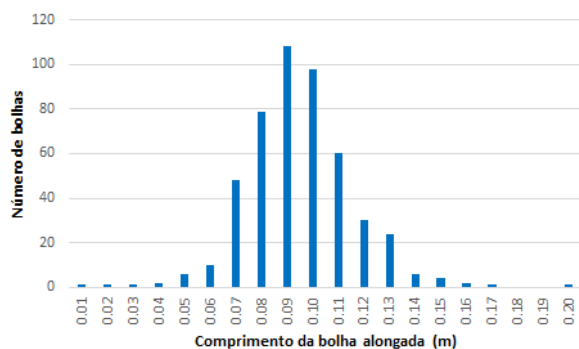


Figura E 11 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 6.

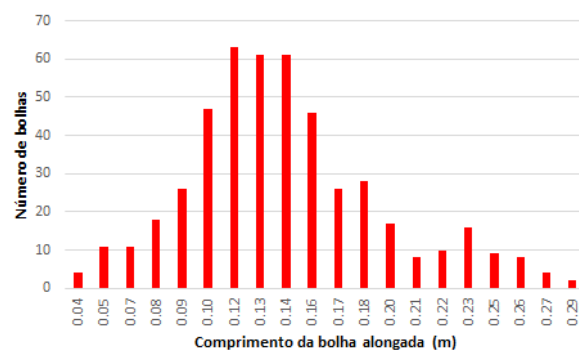
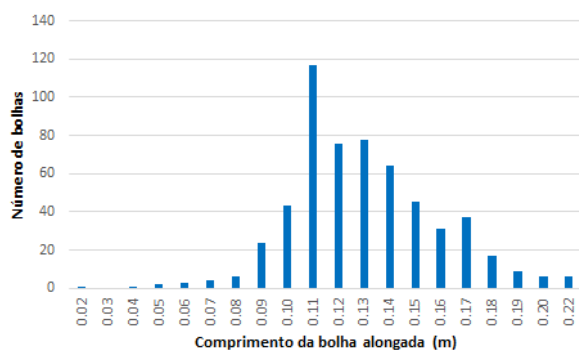


Figura E 12 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 8.

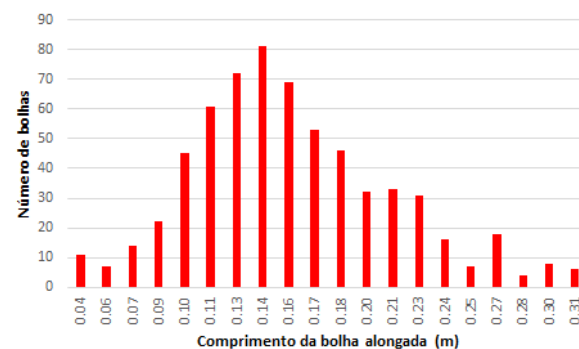
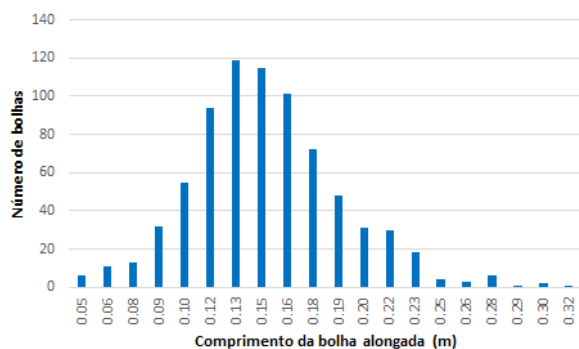


Figura E 13 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 10.

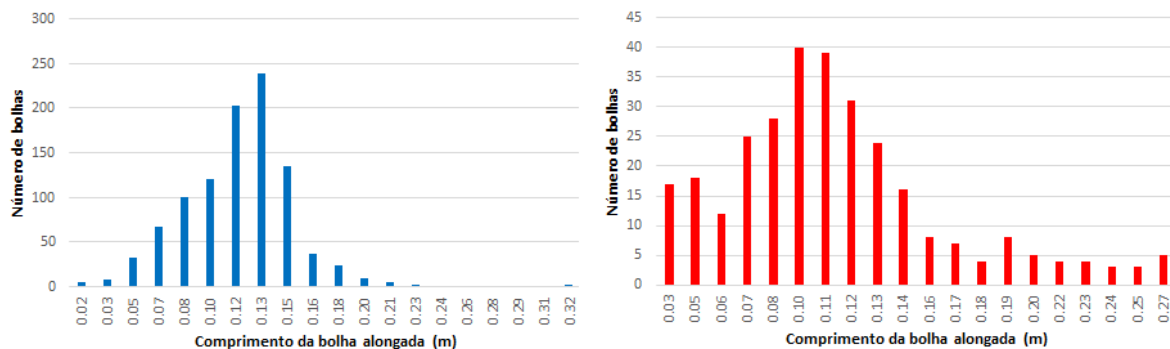


Figura E 14 - Histograma do comprimento da bolha alongada obtido no ponto 11.

Histogramas para comprimento do pistão, sendo a imagem da esquerda relacionada aos dados da câmera e a da direita ao do WMS.

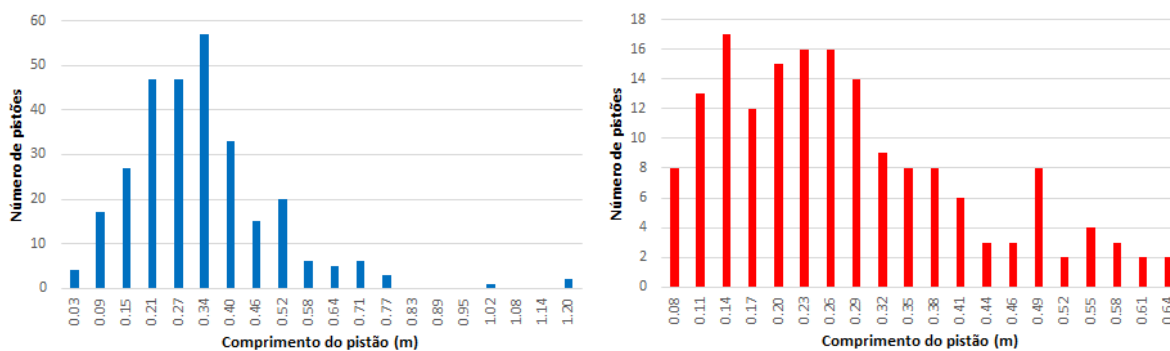


Figura E 15 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 1.

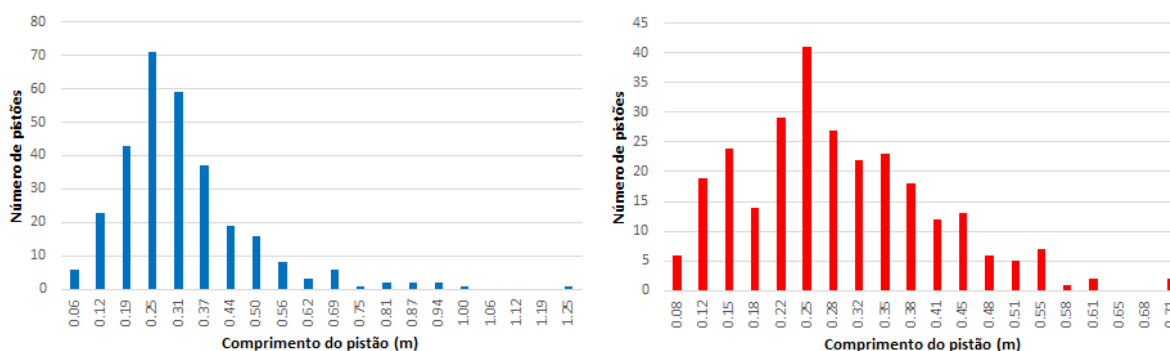


Figura E 16 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 3.

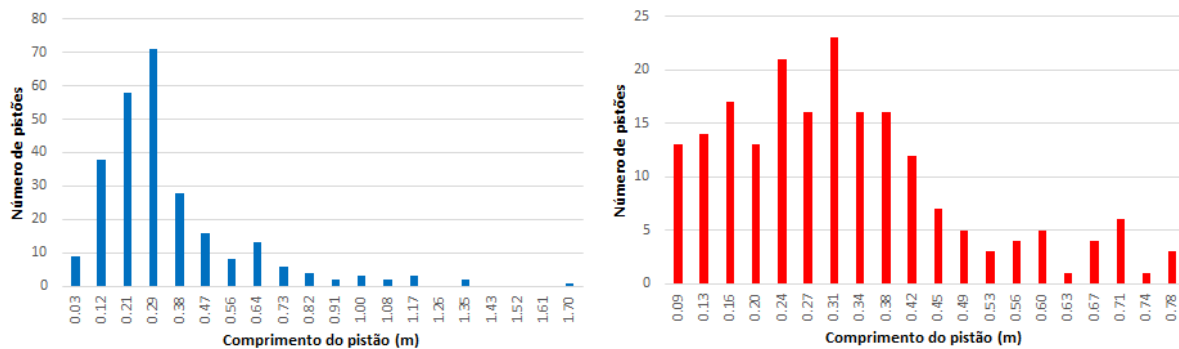


Figura E 17 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 4.

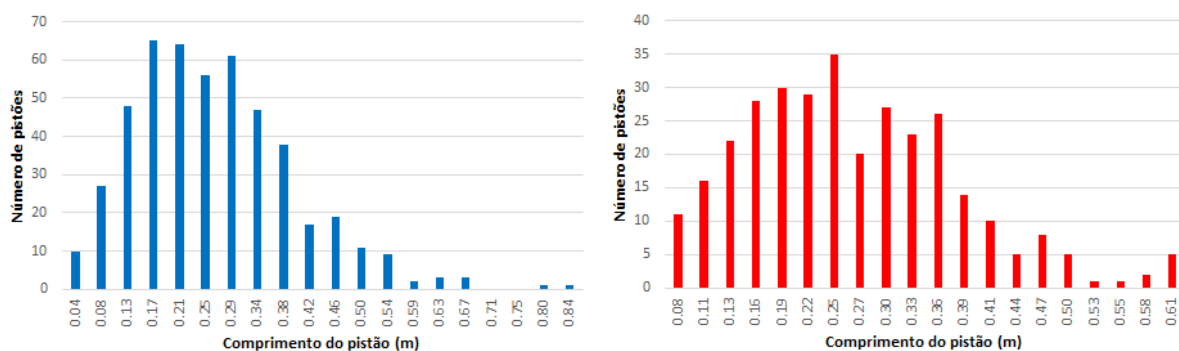


Figura E 18 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 6.

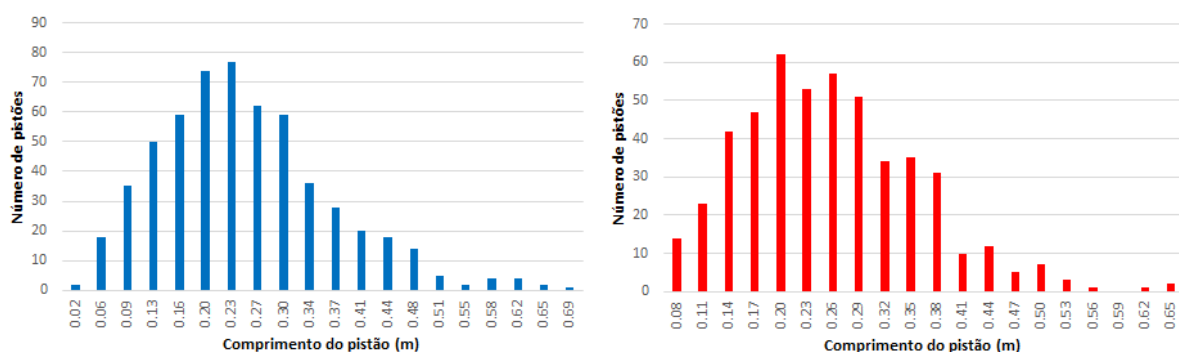


Figura E 19 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 8.

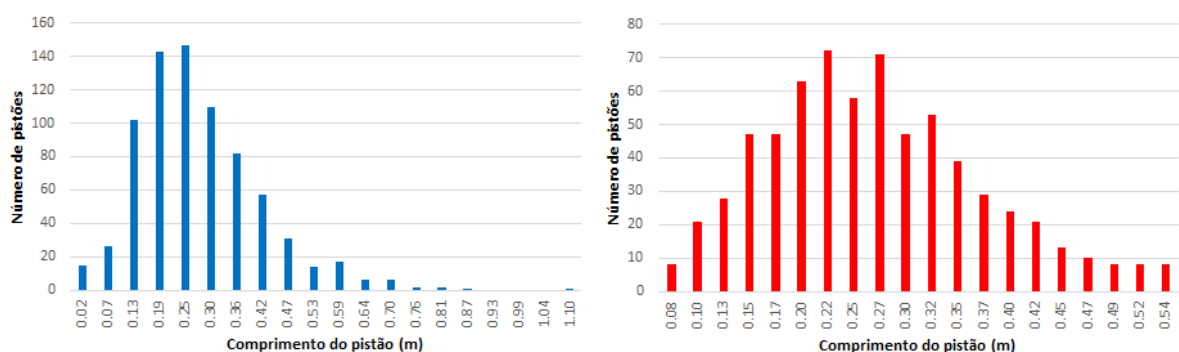


Figura E 20 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 10.

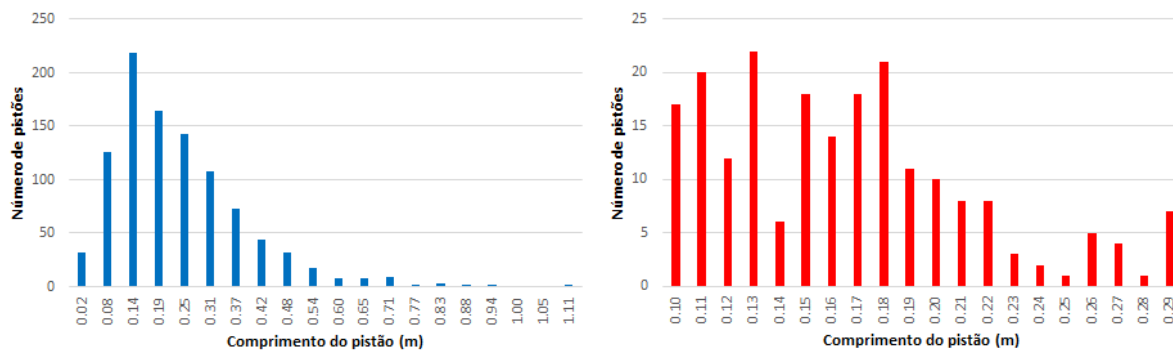


Figura E 21 - Histograma do comprimento do pistão obtido no ponto 11.

Histogramas para frequência de passagem da célula unitária, sendo a imagem da esquerda relacionada aos dados da câmera e a da direita ao do WMS.

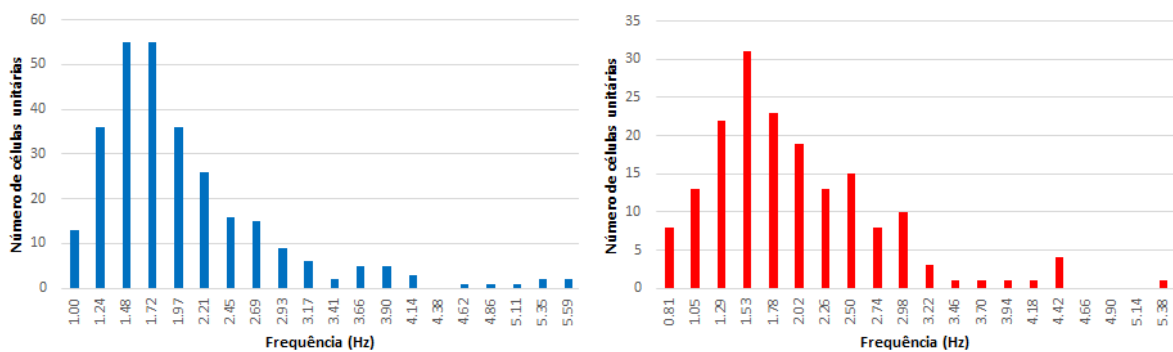


Figura E 22 - Histograma da frequência obtida no ponto 1.

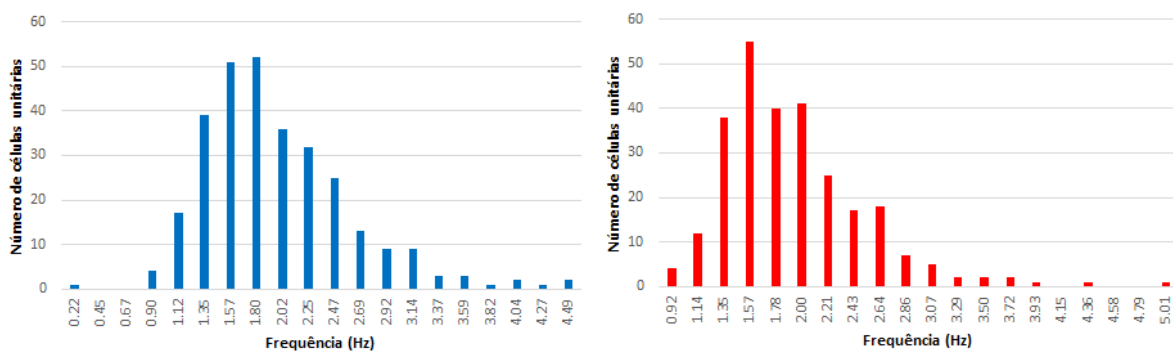


Figura E 23 - Histograma da frequência obtida no ponto 3.

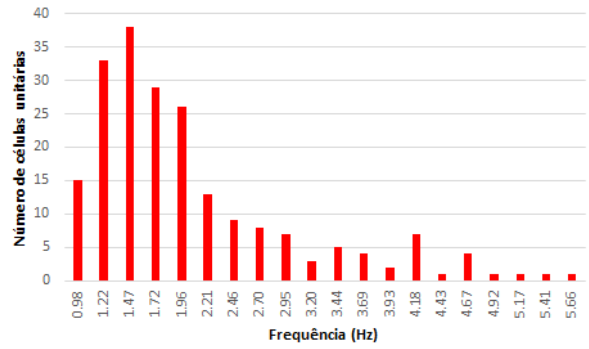
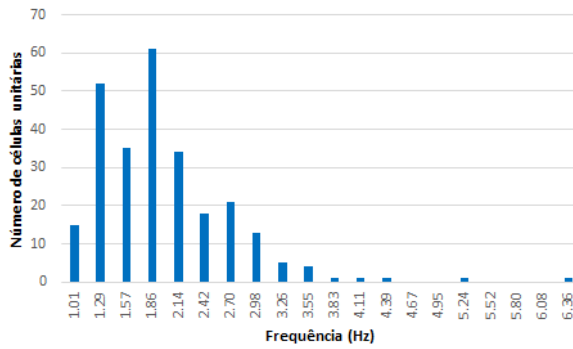


Figura E 24 - Histograma da frequência obtida no ponto 4.

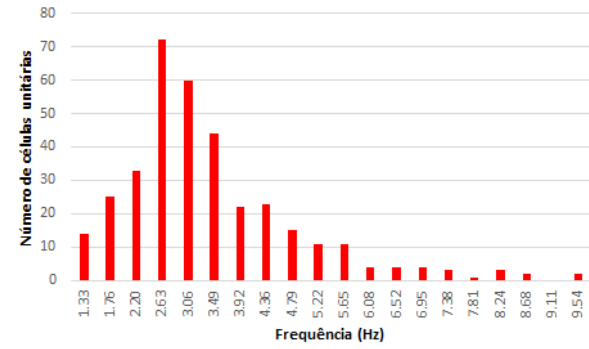
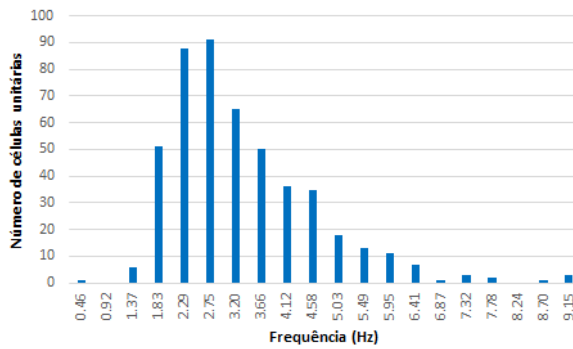


Figura E 25 - Histograma da frequência obtida no ponto 6.

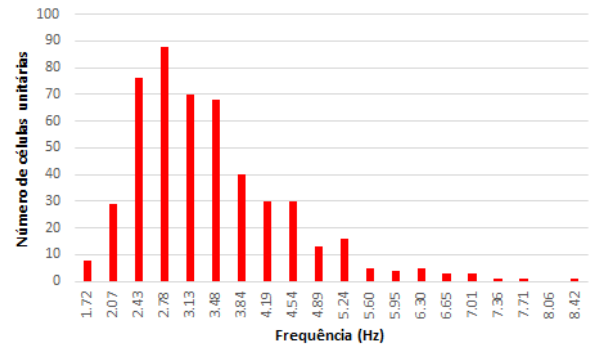
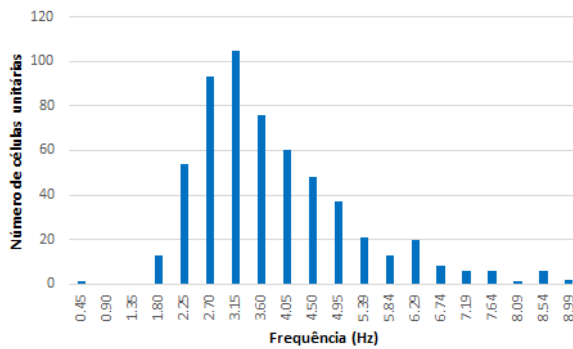


Figura E 26 - Histograma da frequência obtida no ponto 8.

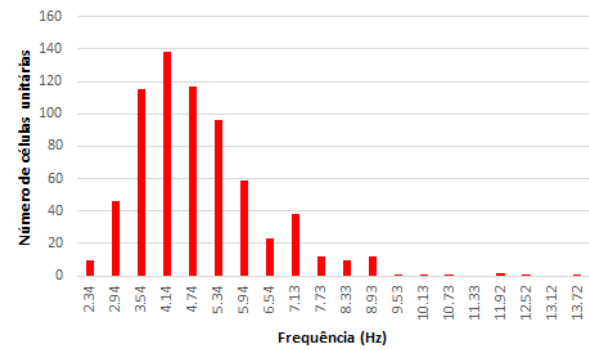
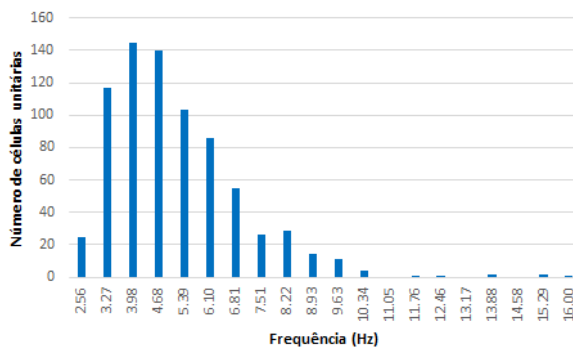


Figura E 27 - Histograma da frequência obtida no ponto 10.

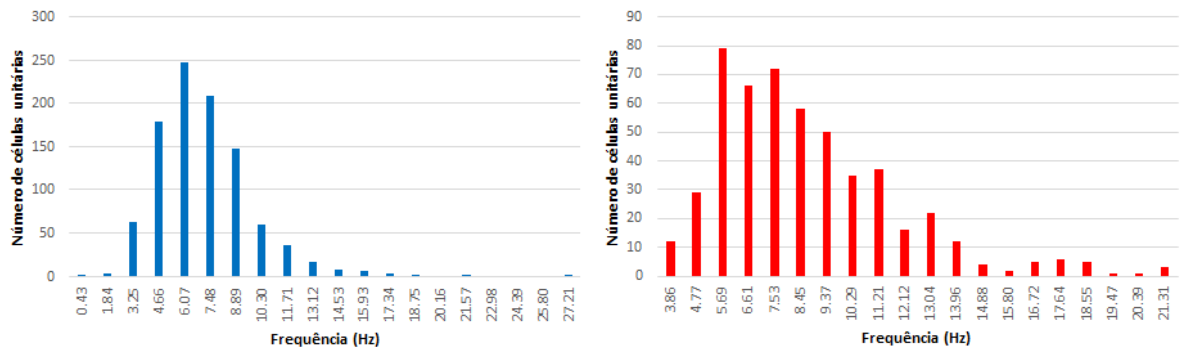


Figura E 28 - Histograma da frequência obtida no ponto 11.