

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DISCIPLINA PROJETO FINAL II

DIEGO PANDOLFO

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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2011

DIEGO PANDOLFO

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

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

Orientador: Prof. Raul Henrique Erthal, Mestre Eng.

Co-orientador: Prof. Rigoberto Eleazar M. Morales, Dr.

CURITIBA

2011

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NO ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO EM GOLFADAS EM DUTOS HORIZONTAL", realizado pelo aluno DIEGO PANDOLFO, 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. Admilson Teixeira Franco, Dr.

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Silvio Luiz de Mello Junqueira, Dr.

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 16 de Dezembro de 2011.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente ao apoio sempre sincero e caloroso de toda minha família, em especial à minha mãe Maria, ao meu pai Vitor Pandolfo e aos meus irmãos Willian e Crislaine. Agradeço a Angelita pelo carinho, paciência e motivação que recebi ao longo de todo o projeto.

Também agradeço ao apoio e a confiança em mim depositada ao longo de todo o trabalho por meus Professores Orientadores Raul e Rigoberto, além da valiosa oportunidade de desenvolver um trabalho no LACIT.

Também devo um enorme agradecimento a toda a equipe do LACIT, principalmente Rafael Fabrício e Reinaldo, pelo apoio ativo e constante em todas as etapas, sem os quais o trabalho seria completamente inviável.

Por fim, agradeço a todos meus amigos e pessoas não citadas aqui, mas que de alguma forma contribuíram para a evolução deste Projeto.

RESUMO

PANDOLFO, Diego. Estudo da Influência da Pressão no escoamento Bifásico Gás-Líquido em Golfadas em Dutos Horizontais. 2011. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica. Curitiba, 2011.

Escoamentos bifásicos estão presentes em diversas aplicações industriais, como na indústria petrolífera, química, nuclear e em termoelétricas, pois são intrínsecos ao processo de transporte em tubulações envolvendo misturas, como gás-líquido, sendo alvo de intenso estudo. Mediante a variação de fatores como velocidade das fases, dimensões e orientação da tubulação, ocorrem determinadas configurações geométricas conhecidas como padrões de escoamento. É frequente que tais escoamentos ocorram em sistemas pressurizados, devido a condições operacionais extremas com grande perda de carga. Dentro deste contexto, o objetivo do presente trabalho é caracterizar experimentalmente o padrão de escoamento em golfadas desenvolvido em dutos horizontais pressurizados. Uma bancada devidamente instrumentada, que se encontra nas dependências do LACIT (Laboratório de Ciências Térmicas), foi adaptada para medir os parâmetros normais de escoamento a alta pressão. Foi realizada a verificação da calibração dos sensores e medidores instalados no circuito experimental. Para a monitoração das vazões, velocidades superficiais e pressões foi utilizado um programa computacional para aquisição e monitoração de dados utilizando a linguagem de Programação *LabView* desenvolvido no LACIT. Com a finalidade de verificar a influência da pressão no padrão de escoamento em golfadas, foram realizados testes experimentais para escoamentos com pressões na saída do escoamento controlado variando de 1 até 5 bar de pressão. A partir das imagens adquiridas, por uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens, foi realizado o processamento através de um programa de reconhecimento de imagem desenvolvido na plataforma *MatLab*. Após processamento e análise dos dados, foram verificados parâmetros característicos do escoamento em golfadas como, por exemplo, comprimento da bolha alongada, comprimento do pistão, fração de vazio, frequência de passagem das células unitárias e fator de intermitência.

Palavras-chave: Padrão de Escoamento, Escoamento Bifásico, Circuito Pressurizado.

ABSTRACT

PANDOLFO, Diego. Estudo da Influência da Pressão no Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Golfadas em Dutos Horizontais. 2011. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica. Curitiba, 2011.

Two-phase flows are present in many industrial applications, such as the oil industry, chemical, and nuclear power plants because they are intrinsic to the transport process involving mixtures in pipes, such as gas-liquid, and thus the target of intense study. By variation of factors such as speed of the phases, dimensions and orientation of the pipe, occur certain geometric configurations known as flow patterns. Often such flows occur in pressurized systems, due to extreme operating conditions with pressure drop. Within this context, the objective of this study is to characterize experimentally the flow pattern in horizontal full developed in pressurized pipelines. A fully instrumented bench, which is on the premises of LACIT (Laboratory for Thermal Science), was adapted to measure the parameters of normal flow at high pressure. Was performed to verify the calibration of the sensors and meters installed in the experimental circuit. For monitoring of flow, surface speeds and pressures, we used the computer program for data acquisition and monitoring in LabView programming language developed in LACIT. In order to verify the influence of pressure on the slug flow pattern, experimental tests were performed with flow pressures at the output of controlled waste ranging from 1 to 5 bar pressure. From the images acquired with the use of a camera's high rate of image acquisition, processing was performed using an image recognition program developed in Matlab platform. After processing and data analysis were checked characteristic parameters of the flow in intermittent flow, for example, elongated bubble length, length of the slug, void fraction, frequency of passage of unit cells and intermittency factor.

Keywords: Flow Patterns, Two-Phase Flow, Pressurized Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Duto sem diversas posições na exploração de petróleo offshore (Fonte: www.fmctechnologies.com).....	18
Figura 2 - Escoamento pistonado intermitente (Extraído de Rodrigues, 2009).	19
Figura 3 – Padrões de Escoamento em dutos verticais (Shoham, 2006).....	23
Figura 4 - Padrões de Escoamento em Dutos Anular Concêntricos. Adaptado de (CAETANO, 1992 <i>et al</i>).....	24
Figura 5 – Padrões de escoamento em tubulações horizontais. (Shoham <i>et al</i> , 2006)	25
Figura 6 – Transição <i>Plug Flow</i> para <i>Slug Flow</i> em função da fração delíquido (H_L) e o número de Froude (Fr). Adaptado de Fagundes <i>et al.</i> (1999).....	26
Figura 7 – Comprimento da Bolha L_B em função do número de Fr . Adaptado de Fagundes <i>at al.</i> (1999)	27
Figura 8 – Mapa de Padrões de Escoamento em Tubulação Horizontal (Mandhane, 1974).....	28
Figura 9 – Influência do diâmetro nos Limite dos Padrões de Escoamento. $D= 1.25$ cm (Linhas Pontilhadas), $D=2.5$ cm (Linha Cheia), $D=5$ cm (Linha Traço-Ponto) e $D=30$ cm (Linha Tracejada). (Mandhane, 1974).....	29
Figura 10 – Padrões de Escoamentos Bifásicos em Tubulações Verticais. (Griffith e Wallis, 1961)	29
Figura 11 - Padrões de escoamento em processo de evaporação para dutos horizontais. (Adaptado de Sardesai 1981).	30
Figura 12 – Área das Fases Líquida e Gasosa em uma Seção Transversal.	31
Figura 13 - Representação do Pistão e Bolha Alongada na Célula Unitária	34
Figura 14 – Leiaute do Circuito de Ensaio. Especificação dos elementos enumerados que compõem o circuito é mostrado no Anexo B.....	35
Figura 15 – A Região hachurada representa o campo de ensaio de possível para realização dos ensaios. O campo é limitado pela vazão máxima do compressor e da bomba. (Adaptado de Mandhane, 1974).....	38

Figura 16 - Câmera de alta taxa de aquisição de imagem ou HSC (<i>High Sensitivity Camera</i>).	40
Figura 17 - Iluminação inadequada (acima) e iluminação adequada (abaixo)	41
Figura 18 – Transformação para imagem binária, gás para líquido, branco para líquido. (Imagem cedida pelos docentes do LACIT)	42
Figura 19 - Transformação binária de esteira de bolha (Imagem cedida pelos docentes do LACIT)	43
Figura 20 - Identificação de frente de bolha (Nariz da bolha)	43
Figura 21 - Planificação de bolha e delimitação da interface gás-líquido (quadro em branco).	44
Figura 22 - Falsa bolha identificada pelo algoritmo	44
Figura 23 - Interface gráfica do Labview (Soares, 2010)	46
Figura 24 - Fluxograma de ensaio.	47
Figura 25 – Comprimento de bolha em função da pressão para combinações de velocidades superficiais.	49
Figura 26 - Variação da fração de vazios em função da pressão e velocidade superficial de líquido e de gás.	50
Figura 27 – Variação das velocidades da bolha em função das velocidades superficiais e da pressão.	51
Figura 28 - Variação do comprimento de pistão em função da pressão	53
Figura 29 - Variação da frequência de bolhas em função da pressão e velocidades superficiais.	54
Figura 30 - Fator de intermitência mediante a variação de velocidade superficial e pressão	55
Figura 31 - Deslocamento das Faixas de Transição de Padrão de Escoamento. (Adaptado de Mandhane, 1974)	56
Figura 32 – Pontos para os valores determinados na Tabela 5. Transição <i>Plug Flow</i> para <i>Slug Flow</i> em função da fração de líquido (H_L) e o número de Froude (Fr). Adaptado de Fagundes <i>et al.</i> (1999).	57

Figura 33 - Elementos do Circuito	63
Figura 34 – Volume de controle na seção do duto	65
Figura 35 - Relação linear entre SKT e vazão de gás	99
Figura 36 – Placa de Orifício	100
Figura 37- Válvula reguladora de pressão e válvula esfera para variação de SKT.	101
Figura 38- Determinação da relação entre Cd e pressão.....	102
Figura 39 - Relação linear entre Cd e pressão absoluta na placa de orifício	102
Figura 40 - Tela de monitoramento	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reynolds para placa de orifício de 1,5 mm e 3,0 mm tabelado para as velocidades superficiais de gás utilizadas.....	39
Tabela 2 - Configuração da câmera	40
Tabela 3 - Combinação de velocidades superficiais de líquido e de gás	45
Tabela 4 - Esteira de bolha para pressões de 1 a 5 Bar para velocidades superficiais de $j_L=0.5$ m/s e $j_G=1.0$ m/s.....	52
Tabela 5 - Parâmetros de escoamento para e $J_L=0,3$ e $J_G=0,7$	57
Tabela 6 – Resumo da variação dos parâmetros.....	58
Tabela 7 – Válvulas de Controle	64
Tabela 8 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 1 Bar.....	68
Tabela 9 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 2 Bar.....	69
Tabela 10 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 3 Bar.....	70
Tabela 11 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 4 Bar.....	71
Tabela 12 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 5 Bar.....	72
Tabela 13 - Histograma de Frequência para pressão de 1 Bar.....	73
Tabela 14 - Histograma de Frequência para pressão de 2 Bar.....	74
Tabela 15 - Histograma de Frequência para pressão de 3 Bar.....	75
Tabela 16 - Histograma de Frequência para pressão de 4 Bar.....	76
Tabela 17 - Histograma de Frequência para pressão de 5 Bar.....	77
Tabela 18 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 1 Bar.....	78
Tabela 19 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 2 Bar.....	79
Tabela 20 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 3 Bar.....	80
Tabela 21 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 4 Bar.....	81
Tabela 22 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 5 Bar.....	82
Tabela 23 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 1 Bar.....	83

Tabela 24 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 2 Bar	84
Tabela 25 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 3 Bar	85
Tabela 26 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 4 Bar	86
Tabela 27 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 5 Bar	87
Tabela 28 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 1 Bar.....	88
Tabela 29 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 2 Bar.....	89
Tabela 30 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 3 Bar.....	90
Tabela 31 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 4 Bar.....	91
Tabela 32 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 5 Bar.....	92
Tabela 33 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 1 Bar.....	93
Tabela 34 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 2 Bar.....	94
Tabela 35 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 3 Bar.....	95
Tabela 36 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 4 Bar.....	96
Tabela 37 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 5 Bar.....	97
Tabela 38 – Vazão de gás em função da variável SKT.....	98
Tabela 39 - Itens e funções de monitoramento	104

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

<i>E & P</i>	Exploração e Produção
<i>P & D</i>	Pesquisa e Desenvolvimento
<i>LACIT</i>	Laboratório de Ciências Térmicas
<i>UTFPR</i>	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas:

A	Área	[m ²]
H	<i>Holdup</i> (Fração de Líquido)	[-]
d	Diâmetro	[m]
\dot{V}	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
j	Velocidade superficial	[m/s]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/s]
<i>Fr</i>	Número de Froude	[-]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
f	Frequência	[-]
L	Comprimento	[m]

Subscritos:

G	Fase gasosa
L	Fase líquida
i	Interno
U	Unitário
P	Pistão
B	Bolha
T	Total

ROT	Rotâmetro
Orif	Orifício
Atm	Atmosférica
PO	Placa de orifício

Letras gregas:

α	Fração de Vazio	[m]
β	Fator de intermitência	[-]
Δ	Variação finita	[m]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
x	Título da mistura	[-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contexto	17
1.2	Objetivos	19
1.3	Justificativa	20
1.4	Estrutura do trabalho	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Escoamentos Bifásicos e Mapas de Padrões de Escoamentos	22
2.1.1	Padrões de Escoamento em Dutos Verticais	23
2.1.2	Padrões de Escoamento em Dutos Horizontais	24
2.1.3	Mapas de Padrões de Escoamento	28
2.2	Escoamentos Pressurizados	30
2.3	Conceitos Fundamentais em Escoamento Bifásico	31
2.3.1	Fração de vazio	31
2.3.2	Vazões mássicas, volumétricas e título	32
2.3.3	Velocidades superficiais e de mistura	32
2.3.4	Velocidade relativa	33
2.3.5	Número de Froude	33
2.3.6	Número de Reynolds	33
2.3.7	Pistão e Bolha Alongada	34
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	35
3.1	Circuito Experimental	35
3.2	Calibração do circuito experimental	38
3.3	Aquisição de Imagens	40
3.4	Processamento das Imagens	41
3.5	Aquisição dos Dados e Sistema Supervisório	44
4	RESULTADOS	48
4.1	Comprimento da Bolha	48
4.2	Fração de Vazios	49
4.3	Velocidade da Bolha	50
4.4	Comprimento do Pistão	53
4.5	Frequência de bolhas	54
4.6	Fator de Intermitência	54
4.7	Alteração de padrão de escoamento	55
4.8	Resumo dos resultados obtidos	58
5	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A – CRONOGRAMA DO PROJETO DE PESQUISA 1 E 2	62
	APÊNDICE B – DETALHAMENTO/ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO	63
	APÊNDICE C – CORREÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL	65
	APÊNDICE D – HISTOGRAMAS DOS ENSAIOS	66
	ANEXO 1 – CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DO ENSAIO	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A descoberta de grandes reservas de petróleo ao largo da costa brasileira, conhecidas como reservas do Pré-sal consolidam o Brasil como uma das grandes matrizes energéticas do mundo, colocando-o como detentor de uma das maiores reserva de petróleo.

Segundo o Plano de Negócios 2010-2014 da Petrobrás (Petrobrás, 2011), a estatal brasileira prevê investimento de US\$ 224 bilhões em cinco anos, representando a média de US\$ 44,8 bilhões por ano, dos quais 95% aplicados no Brasil. Do montante reservado a novos negócios, 62% estão dedicados a Exploração e Produção (E & P). Isso demonstra a dimensão do desafio em explorar reservas localizadas a mais de sete mil metros de profundidade do leito marinho, exigindo investimento na ordem de US\$ 1 bilhão por ano somente em Pesquisa e Desenvolvimento (P & D).

Assim, fica evidente a complexidade e a importância em dimensionar equipamentos para prospecção de óleo e gás, além da imediata necessidade em buscar processos mais eficientes para garantir a vanguarda tecnológica da exploração de petróleo em águas profundas.

Ainda, quanto ao processamento e transporte de petróleo e seus derivados, são comuns a presença de escoamentos multifásicos, onde se tem misturas compostas por óleos, água, gás e até partículas sólidas, como areia. Tudo isso submetido à elevadas pressões e temperaturas que levam a condições operacionais adversas, acarretando em significativas perdas de carga, além da complexidade da distribuição das fases ao longo da evolução do escoamento em tubulações e equipamentos.

Em função disso, há muitos estudos empíricos e analíticos sobre o assunto, tentando avaliar o comportamento de misturas bifásicas mediante a quantidade, velocidade e a constituição das fases presentes definidas, em função das posições das tubulações: horizontal, vertical ou inclinada, como mostrado na Figura 1.

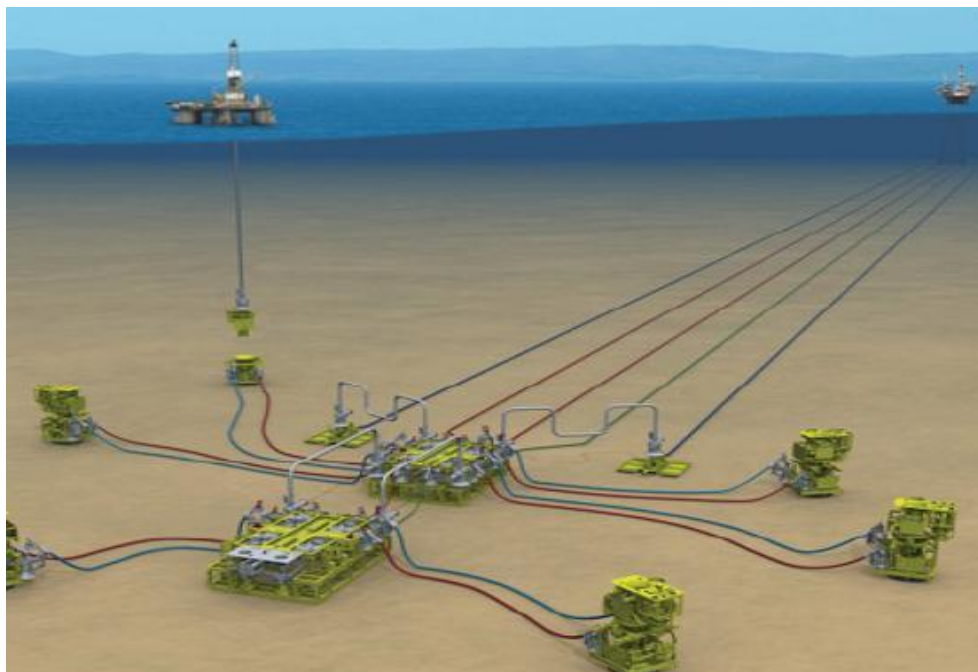


Figura 1 – Dutos em diversas posições na exploração de petróleo offshore (Fonte: www.fmctechnologies.com)

Dos diversos padrões existentes no escoamento bifásico líquido-gás, o padrão de escoamento comumente encontrado nas linhas de extração é o escoamento pistonado em golfadas, ou *slug flow*. Esse tipo de escoamento é caracterizado pela sucessão intermitente (no espaço e no tempo) de duas estruturas diferentes. Um esquema do escoamento em golfadas é mostrado na Figura 2, onde se observa uma região com presença de uma bolha alongada que ocupa grande parte da seção transversal do duto separada da parede por um filme de líquido, seguido pelo pistão de líquido (que separa duas bolhas subseqüentes) que pode conter ou não bolhas dispersas.

Devido à presença do escoamento em golfadas ser comum em operações de produção em águas profundas, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos para verificar a influência da pressão na evolução do escoamento. A compreensão dos fenômenos envolvidos no escoamento em cenários de alta pressão pode fornecer subsídios para o dimensionamento das linhas de produção e separadores de líquido-gás.

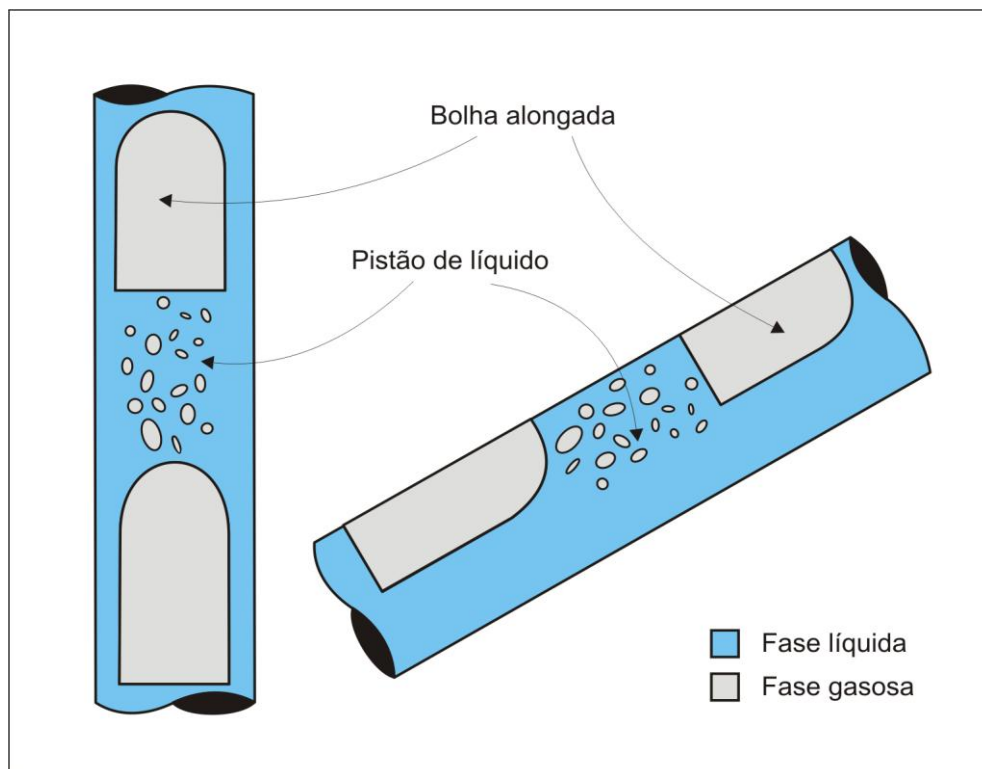


Figura 2 - Escoamento pistonado intermitente (Extraído de Rodrigues, 2009).

1.2 Objetivos

Neste trabalho é investigada experimentalmente o comportamento do escoamento bifásico de água e ar em golfadas em dutos horizontais pressurizados, para diferentes combinações de vazão de água e ar, para pressões variando de 1 a 5 Bar.

Para atingir o objetivo proposto será utilizada a técnica de visualização utilizando uma câmera de alta velocidade, aliado a um programa computacional para o tratamento de imagens desenvolvido no LACIT/UTFPR.

A partir dos resultados obtidos foi avaliada a influência da pressão nos parâmetros que caracterizam o escoamento em golfadas como fração de vazio, fração de líquido, fator de intermitência, frequência de bolhas e velocidades na seção de teste, além do comprimento de bolha e do pistão.

1.3 Justificativa

No Brasil, a descoberta de grandes reservas de petróleo *offshore*, gera uma enorme necessidade de avanços tecnológicos na exploração e produção de petróleo. Aplicações industriais como evaporadores, condensadores, torres de destilação, reatores químicos e vasos separadores estão disseminados ao longo da cadeia produtiva, aumentando ainda mais a relevância do tema. Nesses processos, ocorre a transição de padrões de escoamento, fenômeno de grande impacto no transporte de quantidades de massa e movimento (BERTOLA, 2003).

Brennen (2005) também destaca que as taxas de transferência de massa, quantidade de movimento e energia, são influenciadas pela distribuição geométrica das fases presentes no escoamento. Assim, prever o comportamento padrão de escoamento em golfadas é de fundamental importância para o dimensionamento, operação e manutenção de equipamentos envolvidos no transporte de misturas bifásicas.

Diversos estudos visam esclarecer o comportamento dos escoamentos em dutos verticais com escoamento ascendente e descendente, em dutos inclinados e em dutos horizontais a pressão atmosférica, ou em processo de evaporação e condensação, porém, especificamente para misturas a pressões elevadas há carência de dados.

Assim, o estudo se mostra relevante para melhor compreender a influência da pressão no transporte do escoamento bifásico líquido-gás no padrão em golfadas. Os dados coletados nos ensaios e os resultados obtidos fornecem informações para futuros estudos.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho é composto por cinco capítulos, quatro apêndices e dois anexos.

O primeiro capítulo contextualiza e mostra a relevância do tema, além dos objetivos do trabalho.

O segundo trata da fundamentação teórica necessária para desenvolver o trabalho, onde é revisada a literatura sobre escoamentos bifásicos e apresentadas as fórmulas utilizadas.

O capítulo seguinte relata como foi conduzido o experimento, detalhando os equipamentos usados, a disposição do circuito, os dispositivos de monitoramento, aquisição e processamento de dados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir do processamento das imagens e analisado os fenômenos e explicações relacionados.

No quinto capítulo há a conclusão do trabalho.

Além disso, no apêndice A está exposto o cronograma do Projeto de Pesquisa 1 e 2. No apêndice B são detalhados todos os elementos do circuito e suas funções. A correção da velocidade superficial do gás é realizada com a fórmula desenvolvida no apêndice C. No apêndice D encontram-se os histogramas dos ensaios para as cinco faixas de pressão.

Por fim, no Anexo 1 são apresentadas a metodologia e sequência de cálculos para calibração da placa de orifício, e no Anexo 2 é mostrada todas as funções da tela de monitoramento do *LabView* utilizadas no ensaio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos utilizados no decorrer do trabalho, além de fórmulas e relações necessárias para seu entendimento. Na primeira parte é realizada uma revisão sobre os padrões de escoamento bifásico e os mapas de padrão de escoamento. Na última seção é feita uma revisão de conceitos e variáveis comumente utilizadas no estudo de escoamentos bifásicos de líquido-gás.

2.1 Escoamentos Bifásicos e Mapas de Padrões de Escoamentos

Segundo Bertola (2003), a interação líquido-gás na mistura acarreta diversas configurações possíveis de distribuição das fases de líquido e gás no canal de escoamento, o que impacta diretamente na transferência de massa e calor. Essas configurações são conhecidas como padrão de escoamento e divididas de acordo com a distribuição das fases.

Os fatores de maior impacto na distribuição das interfaces são: vazões das fases presentes, orientação e diâmetro da tubulação, rugosidade da parede do duto e as propriedades dos fluidos em processo.

Utilizando mapas de padrão de escoamento pode-se identificar o padrão existente e prever o comportamento do escoamento ao longo da tubulação. As implicações provenientes de cada padrão de escoamento são feitas utilizando equações e demais correlações empíricas disponíveis na literatura. Por exemplo, o tipo bolhas dispersas tem grande área interfacial, sendo apropriado em processos de elevada transferência de massa ou reações químicas. Já os tipos intermitentes, escoamento em golfadas, são importantes em separadores, porém deve-se atentar para danos associados à vibração inerente ao processo (BERTOLA, 2003).

Existem diversos estudos em dutos verticais ascendentes e descendentes, inclinados e horizontais. A seguir, será feita uma breve revisão sobre estes estudos, focando principalmente nos escoamentos em dutos horizontais em golfadas.

2.1.1 Padrões de Escoamento em Dutos Verticais

Os padrões de escoamento em dutos verticais são semelhantes aos encontrados em dutos horizontais, pois as distribuições das fases de líquido e gás no duto são análogas. Isso remete a necessidade de conhecer a classificação dos tipos de padrões de escoamento em dutos verticais para melhor entender a caracterização dos escoamentos nos dutos horizontais.

Shoham (2006) classifica os escoamentos verticais como bolhas, golfadas (*slug flow*), escoamento agitado (*churn flow*), anular e escoamento disperso, como mostrado na Figura 3.

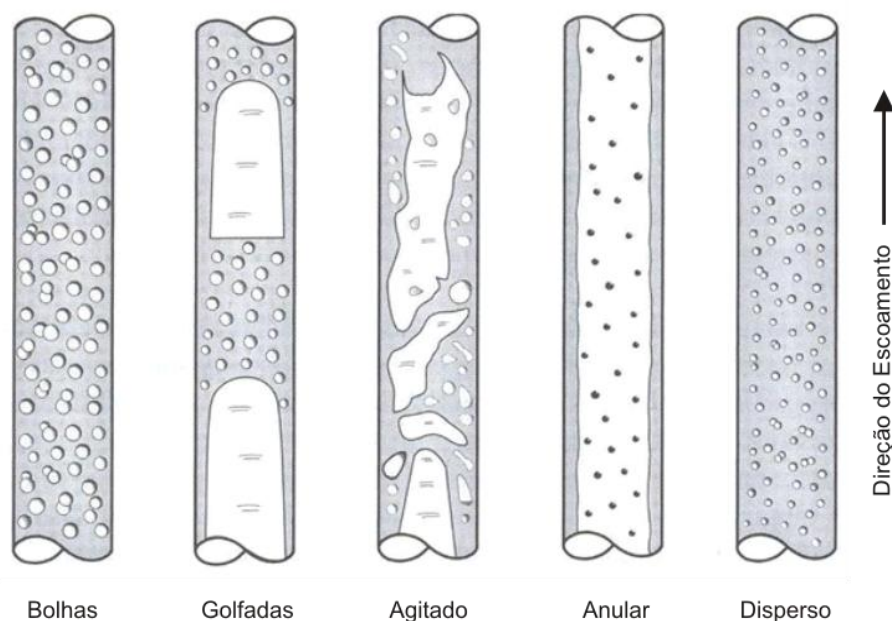


Figura 3 – Padrões de Escoamento em Dutos Verticais (Shoham, 2006)

O tipo bolha ocorre para baixas vazões das fases de líquido e gás, sendo as bolhas dispersas no líquido deslocando-se sem qualquer periodicidade em seu movimento. A fração de vazios é baixa.

Por golfadas ou *slug flow* há formação de grandes bolhas, conhecidas como bolhas de Taylor, que se deslocam no sentido ascendente. A ação da gravidade sob o pistão de líquido e o filme de líquido da bolha propicia resistência ao movimento, acarretando em dispersão de bolhas menores nos pistões.

Semelhante às golfadas, o tipo agitado ou *churn flow* é característico para vazões mais elevadas de gás, fazendo com que ocorra turbulência no movimento e que nenhum padrão na distribuição das interfaces seja claramente identificado.

Para altas vazões de gás, os tipos anular e disperso são característicos, sendo que no primeiro há formação de um filme de líquido em toda a extensão da parede do duto e o gás se acumula na região central, enquanto no segundo as bolhas se desprendem no líquido.

Padrões de escoamento muito semelhantes também ocorrem em dutos de seção anular, mostrados na Figura 4. Esses dutos são bastante comuns na indústria, principalmente em trocadores de calor.

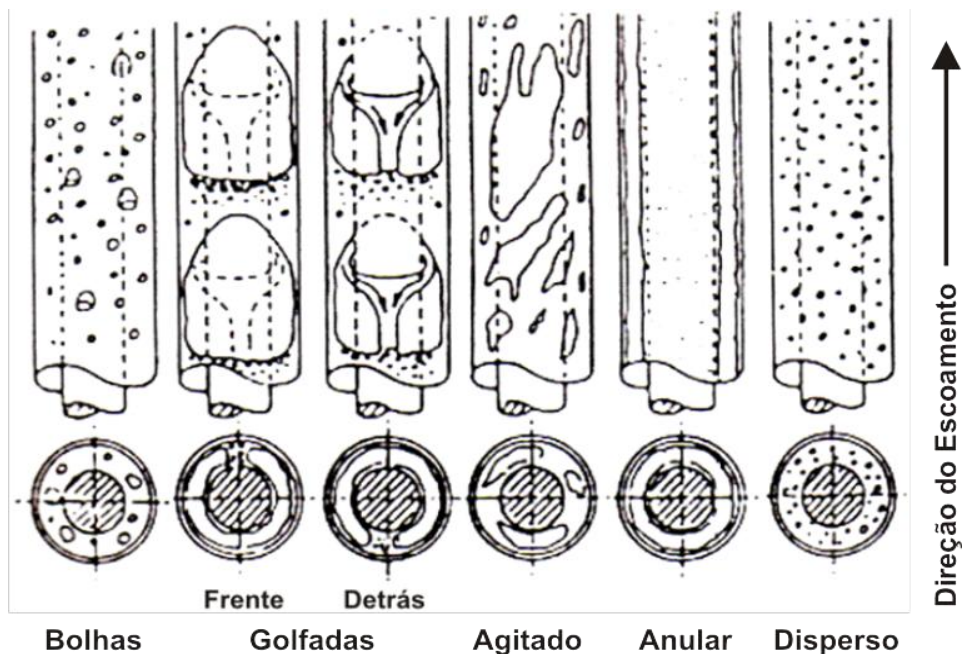


Figura 4 - Padrões de Escoamento em Dutos Anular Concêntricos. Adaptado de (CAETANO, 1992 *et al*).

2.1.2 Padrões de Escoamento em Dutos Horizontais

Quanto aos escoamentos bifásicos horizontais, Shoham (2006) classifica em quatro configurações básicas, quais sejam: estratificado, intermitente, anular e disperso. Assim como no escoamento vertical, os padrões são sensíveis a fatores

como: constituição e vazão das fases, diâmetro, orientação e rugosidade da tubulação (Figura 5).

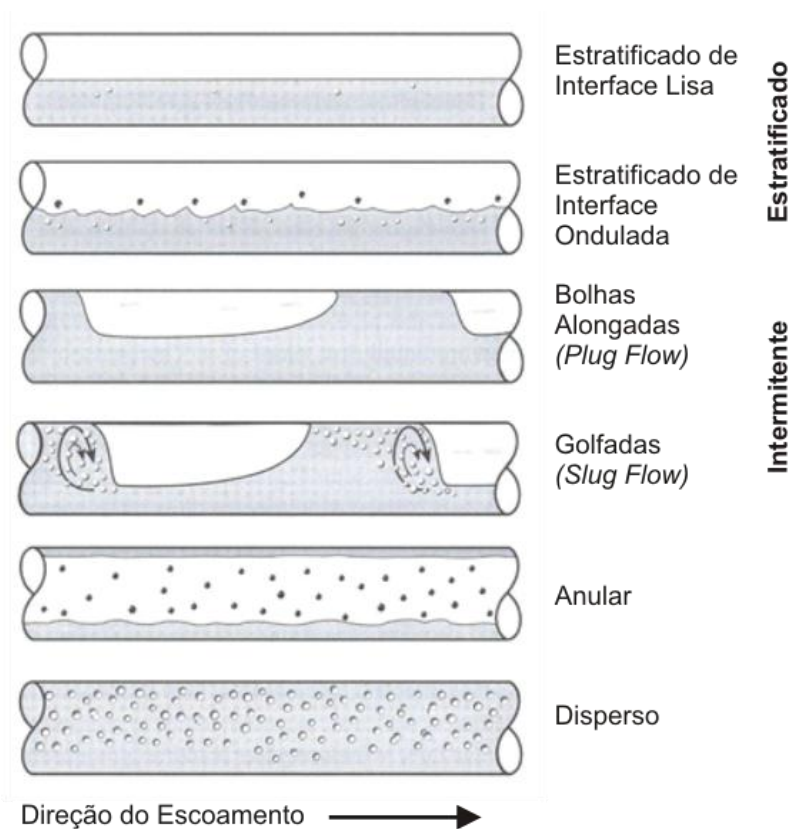


Figura 5 – Padrões de escoamento em tubulações horizontais. (Shoham *et al*, 2006)

No escoamento estratificado, as vazões relativas entre fases são baixas. Evidenciando fortemente a separação das fases devido à aceleração gravitacional, o que leva o líquido a ocupar a região inferior da tubulação, enquanto o gás ocupa a região superior. Para vazões relativas mais altas, o escoamento tende a ser ondulado, caso contrário, liso.

Já no escoamento intermitente, há alternância de bolhas e de pistão de líquido. A princípio, as bolhas se apresentam alongadas e bem definidas com os pistões não aerados, sendo do tipo *plug flow*. Com o aumento da vazão de gás, ocorrerá desprendimento de bolhas no pistão, caracterizando o escoamento em golfadas, ou também conhecido com *slug flow*.

Alguns autores tratam de forma separada essa variedade do escoamento intermitente denominado *plug flow* ou *elongated bubble flow*. Na Figura 6 é mostrada a linha de transição *plug flow* para *slug-flow* em função da fração de líquido e o número de Froude.

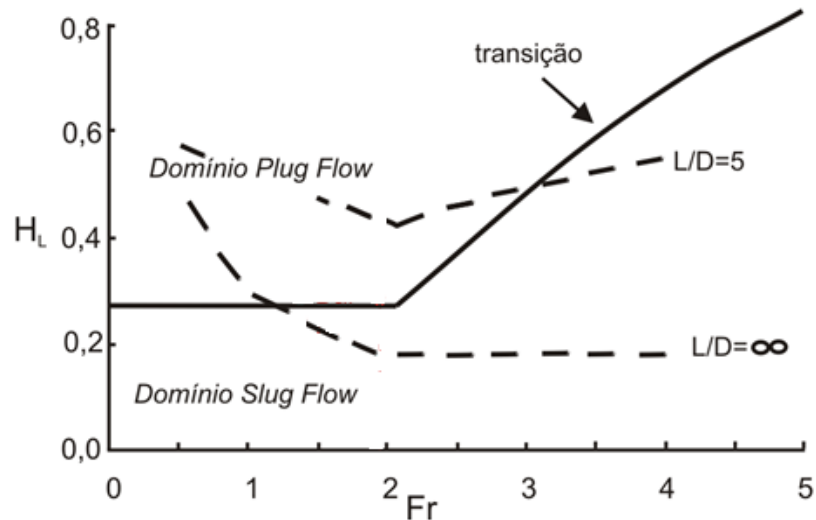


Figura 6 – Transição *Plug Flow* para *Slug Flow* em função da fração de líquido (H_L) e o número de Froude (Fr). Adaptado de Fagundes *et al.* (1999).

É possível caracterizar os tipos de escoamentos *plug flow* e *slug-flow* observando suas respectivas regiões de domínio. *Plug flow* ocorre para Fr menores, sendo que a fração de líquido presente tem um limite inferior. Com o aumento de Fr há uma predominância das forças inerciais levando a formação de *slug*.

Com base na relação entre o comprimento da bolha e o diâmetro da tubulação mostrado na linha tracejada (Figura 6) e a curva da Figura 7 observa-se que a transição para *slug* se dá para comprimentos maiores à Fr baixos.

Assim, número de Fr menores leva ao aumento do comprimento das bolhas, caracterizando a formação do tipo *plug flow* ou *elongated bubble flow*.

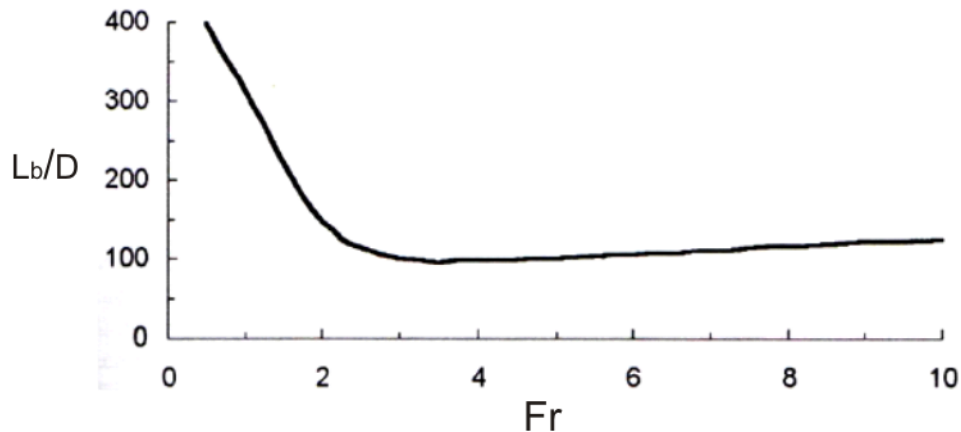


Figura 7 – Comprimento da Bolha L_B em função do número de Fr. Adaptado de Fagundes *at al.* (1999)

Outras diferenças são o grau de agitação no escoamento e na espessura no pistão que separa as bolhas. No *plug flow* o diâmetro da bolha tende a ser menor evidenciado pelo limite inferior da fração de líquido (Figura 6), porém, associado a Fr mais baixos, o comprimento da bolha é maior, conforme Figura 7.

Para o padrão de escoamento anular, caracterizado por elevadas vazões de gás, o líquido tende a se posicionar junto à parede da tubulação e o gás forma um núcleo vazado. O efeito da gravidade por levar a formação de um filme mais espesso na parte inferior do duto. Para velocidades maiores de gás, esse efeito não é observado.

No escoamento disperso, a vazão de líquido é alta e as bolhas ficam dispersas no mesmo, tendendo a ocupar a região superior do escoamento devido ao efeito do empuxo. Além disto, elas se movimentam de forma aleatória devido à tensão cisalhante imposta.

Em dutos anulares horizontais há formação de padrões de escoamento semelhantes aos não anulares (Osamasali & Chang, 1988).

2.1.3 Mapas de Padrões de Escoamento

Os mapas de padrão de escoamento são diagramas de coordenadas dimensionais ou adimensionais, gerados a partir de experimentos, e que representam as diversas configurações dos escoamentos bifásicos. Vale ressaltar que para coordenadas dimensionais, cada diagrama é gerado para condições específicas, conforme exemplificado na Figura 8, a destacar: composição e vazão das fases, comprimento, diâmetro, rugosidade e orientação da tubulação (CROWE, 2005).

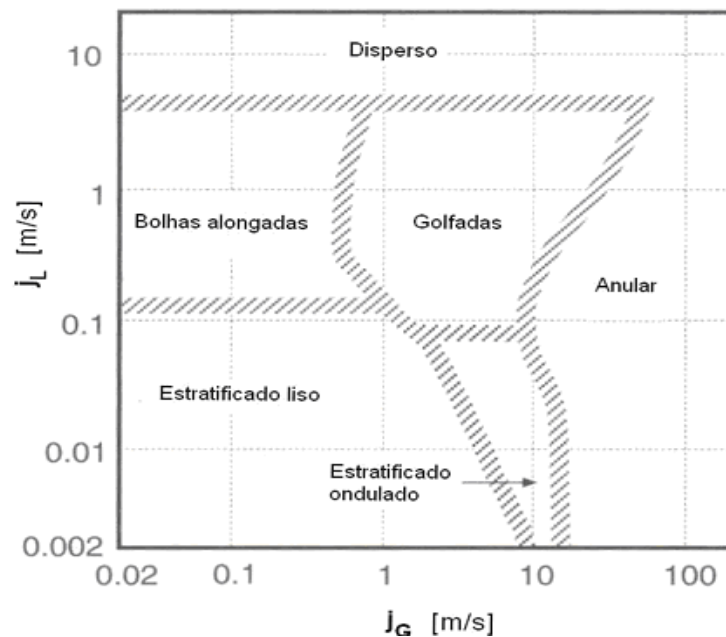


Figura 8 – Mapa de Padrões de Escoamento em Tubulação Horizontal (Mandhane, 1974)

Assim, é possível definir o tipo de escoamento a partir das velocidades superficiais de líquido e gás e estimar as faixas de transição. A faixa de transição entre disperso e anular é caracterizada por intenso turbilhonamento, pois esses padrões estão associados a altas vazões, de forma que uma linha de transição entre os tipos não é claramente definida.

O mapa da Figura 9 mostra diversas faixas de transição de ensaios em dutos de diferentes diâmetros. O efeito do diâmetro na configuração do escoamento é aumentar as velocidades superficiais das fases necessárias para formação dos padrões intermitente, anular e disperso. Isso ocorre porque em dutos de maior diâmetro exigem vazões mais elevadas para que ocorra a perturbação necessária

para originar às respectivas distribuições entre as fases características de cada padrão.

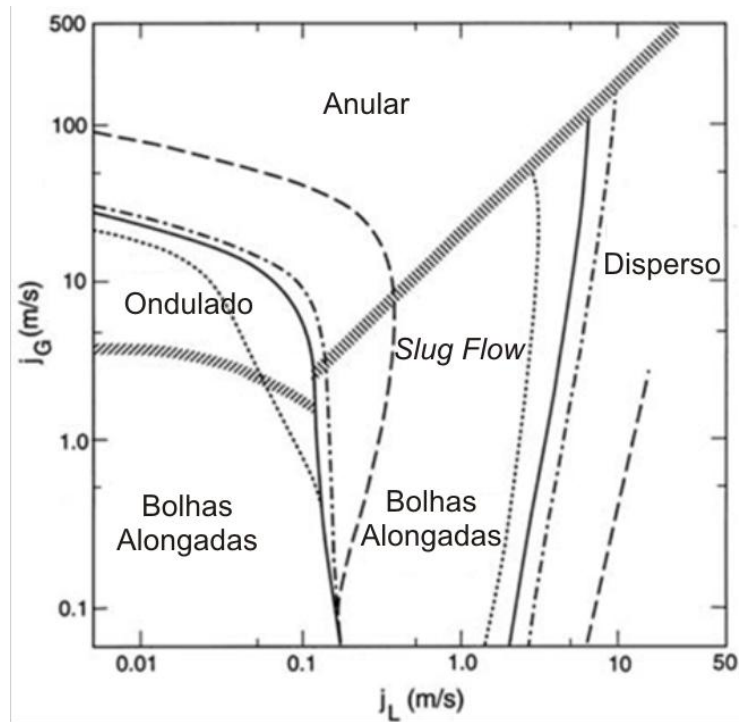


Figura 9 – Influência do diâmetro nos Limites dos Padrões de Escoamento. D= 1.25 cm (Linhas Pontilhadas), D=2.5 cm (Linha Cheia), D=5 cm (Linha Traço-Ponto) e D=30 cm (Linha Tracejada). (Mandhane, 1974).

Para aplicar esses dados para outros estudos, em diferentes condições de escoamento, faz-se uso de grupos adimensionais, conforme Figura 10, aumentando assim, a abrangência de aplicação do mapa de padrões de escoamento.

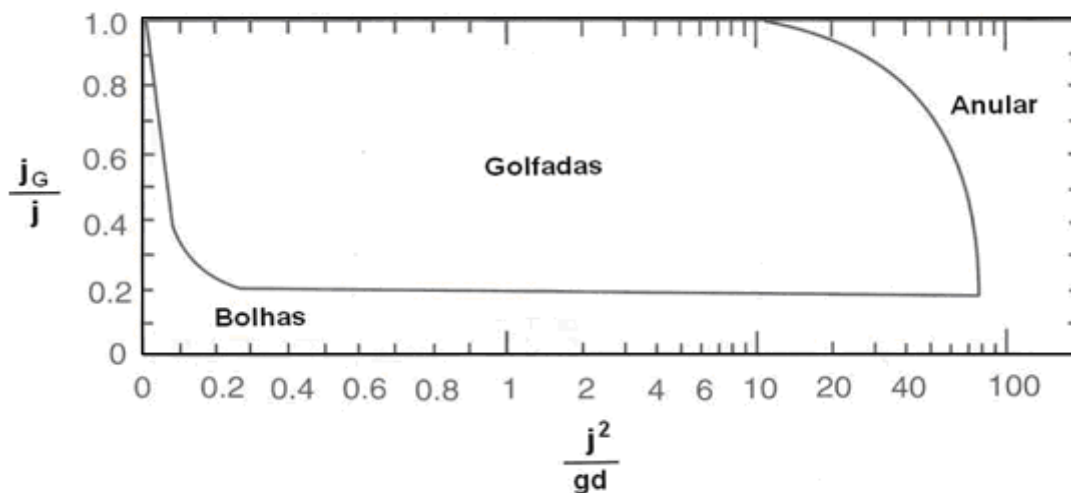


Figura 10 – Padrões de Escoamentos Bifásicos em Tubulações Verticais. (Griffith e Wallis, 1961)

Na Figura 10 o eixo horizontal j^2/gd pode ser interpretado também como Fr^2 . Assim, o gráfico mapeia os padrões de escoamento em função da proporção da velocidade de gás na mistura e do número de Froude.

2.2 Escoamentos Pressurizados

Segundo a revisão bibliográfica realizada não foram encontrados, na literatura aberta, estudos sobre a influência da pressão nos padrões de escoamento sem mudança de fase. A maioria dos estudos existentes sobre escoamentos pressurizados foram desenvolvidos para avaliar os processos de evaporação e condensação aplicados a sistemas de refrigeração e de geração de vapor na indústria nuclear.

Em escoamentos pressurizados com mudança de fase, os estudos são desenvolvidos com a finalidade de avaliar o impacto dos padrões de escoamento no coeficiente de transferência de calor. Diferente dos ensaios convencionais de escoamentos bifásicos onde são injetadas vazões pré-determinadas de gás e líquido, nos processos de mudança de fase ocorre a evolução da fase líquido ou gás.

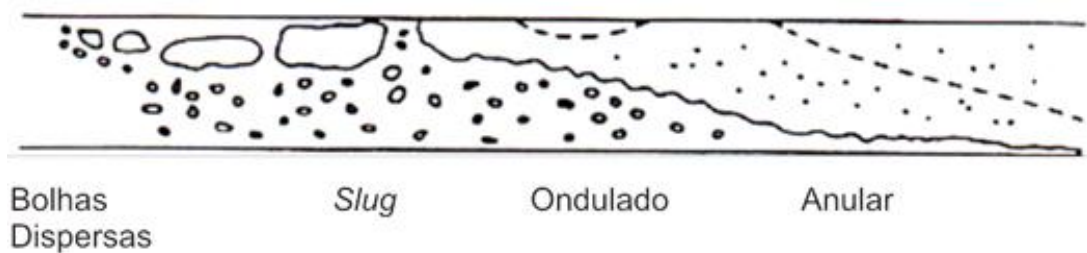


Figura 11 - Padrões de escoamento em processo de evaporação para dutos horizontais. (Adaptado de Sardesai, 1981).

Na Figura 11 é mostrado um esquema da transição dos padrões de escoamento durante o processo de evaporação. O aumento da fase de gás leva a mistura a ter diferentes configurações desde bolhas dispersas, passando pelos padrões intermitentes, estratificados e finalmente o anular.

Para o escoamento isotérmico, onde se investiga somente o efeito da pressão nos padrões de escoamento, não foram encontrados estudos reportados na

literatura. O que mais uma vez verifica a relevância do estudo desenvolvido. Assim, o presente trabalho visa avaliar o comportamento do escoamento bifásico a pressões elevadas sem troca de calor, verificado apenas a influência isolada da pressurização do circuito e da variação das velocidades superficiais de gás e de líquido.

2.3 Conceitos Fundamentais em Escoamento Bifásico

2.3.1 Fração de vazio

A fração de vazios (α) corresponde à razão entre a área da seção transversal ocupada pelo gás (A_G) e a área total da tubulação (A), mostradas na Figura 12, dada por:

$$\alpha = \frac{A_G}{A} \quad \text{Eq. 2.1}$$

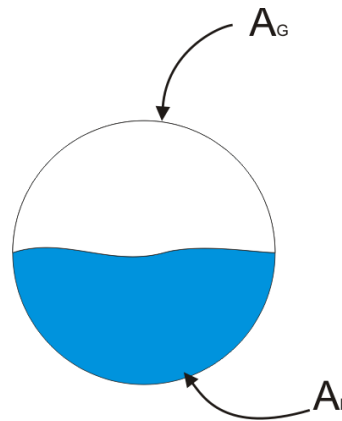


Figura 12 – Área das Fases Líquida e Gasosa em uma Seção Transversal¹.

Já a fração de líquido é denominada *holdup* (H_L):

$$H_L = \frac{A_L}{A} = 1 - \alpha \quad \text{Eq.2.2}$$

Onde A_L é a área da seção transversal ocupada pelo líquido.

¹ Todas das figuras, quadros e tabelas sem indicação de fonte foram compiladas pelo próprio autor.

2.3.2 Vazões mássicas, volumétricas e título

A vazão volumétrica total (\dot{V}) é a soma das vazões das fases líquida (\dot{V}_L) e gasosa (\dot{V}_G):

$$\dot{V} = \dot{V}_L + \dot{V}_G \quad \text{Eq.2.3}$$

Como a relação entre a vazão mássica e volumétrica é a massa específica (ρ_L), logo:

$$\dot{V}_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L} \quad \text{Eq.2.4}$$

e

$$\dot{V}_G = \frac{\dot{m}_G}{\rho_G} \quad \text{Eq.2.5}$$

A vazão mássica total \dot{m} é a soma das vazões mássicas da fase líquida e gasosa:

$$\dot{m} = \dot{m}_L + \dot{m}_G \quad \text{Eq.2.6}$$

O título, representado por x , é definido como a relação entre a vazão mássica da fase gasosa e a total da mistura, dado por:

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}} \quad \text{Eq.2.7}$$

2.3.3 Velocidades superficiais e de mistura

A velocidade superficial de cada fase é definida considerando como se o escoamento correspondente se desenvolvesse em toda a área da tubulação. Desta forma, para a fase gasosa e líquida, (J_G) e (J_L), respectivamente:

$$j_G = \frac{\dot{V}_G}{A} \quad \text{Eq. 2.8}$$

E

$$j_L = \frac{\dot{V}_L}{A} \quad \text{Eq. 2.9}$$

A velocidade da mistura é definida como a razão da vazão volumétrica total pela área da seção transversal do duto, sendo equivalente a velocidade superficial resultante j :

$$j = j_G + j_L = \frac{\dot{V}}{A} \quad \text{Eq. 2.10}$$

2.3.4 Velocidade relativa

O deslocamento relativo (deslizamento) entre as fases de líquido e gás é definido como a diferença entre as velocidades das fases, dada por:

$$j_{GL} = j_G - j_L \quad \text{Eq. 2.11}$$

2.3.5 Número de Froude

O número de Froude é um número adimensional que representa a relação entre o efeito das forças de inércia e de gravidade, segundo Fox (2006) expresso por:

$$Fr = \frac{J}{\sqrt{gD_i}} = \frac{J_G + J_L}{\sqrt{gD_i}} \quad \text{Eq. 2.12}$$

2.3.6 Número de Reynolds

O número de Reynolds é um número adimensional que representa a relação entre o efeito das forças de inércia e as forças viscosas, segundo Fox (2006) expresso por:

$$Re = \frac{\rho JD}{\mu} \quad \text{Eq. 2.13}$$

2.3.7 Pistão e Bolha Alongada

Para Rodrigues (2009) o escoamento bifásico no padrão em golfadas é o mais freqüente nos sistemas submarinos de produção de óleo. Alguns parâmetros necessários para sua caracterização devem ser observados.

O escoamento em golfadas é dividido em duas estruturas básicas: o pistão constituído por líquido e a bolha alongada conforme mostrado na Figura 13. Essas estruturas compõem a chamada célula unitária. Um importante parâmetro do escoamento intermitente é a frequência da célula unitária, sendo t_u o tempo que a célula unitária leva para percorrer determinado trecho do duto.

$$f = \frac{1}{t_u}$$

Eq.2.14

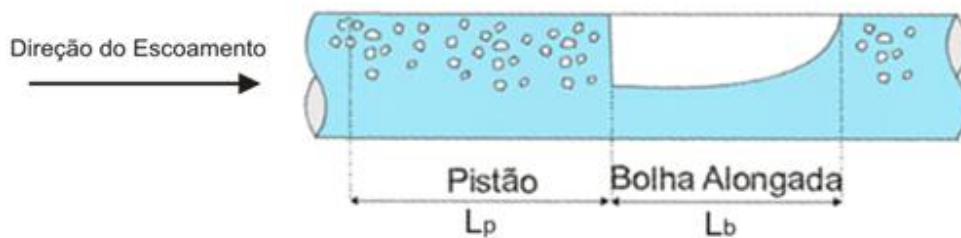


Figura 13 - Representação do Pistão e Bolha Alongada na Célula Unitária

A parte dianteira da bolha é comumente denominada de nariz, enquanto a parte traseira é chamada de calda.

A alternância de pistão de líquido, seguido pela bolha de gás, é caracterizada pelo fator de intermitência β , definido como a razão entre o comprimento da bolha e o comprimento total da célula unitária, bolha e pistão de líquido, equação 2.15. Ressalta-se que essa aproximação é válida se a velocidade do pistão é igual a velocidade do nariz da bolha.

$$\beta = \frac{L_B}{L_B + L_P}$$

Eq.2.15

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o circuito de ensaio e equipamentos utilizados nos experimentos, os quais compõem a bancada de escoamento bifásico pressurizado presente nas dependências do LACIT – UTFPR. São apresentados também os sistemas de aquisição de imagem, registro dos parâmetros de ensaio e calibração do sistema de medição de vazão de gás. Por fim, é descrito o método de processamento dos dados e rotina de aquisição de imagens.

3.1 Circuito Experimental

O circuito experimental utilizado para ensaio do escoamento bifásico é mostrado na Figura 14, o qual foi projetado e construído pelo corpo técnico do LACIT.

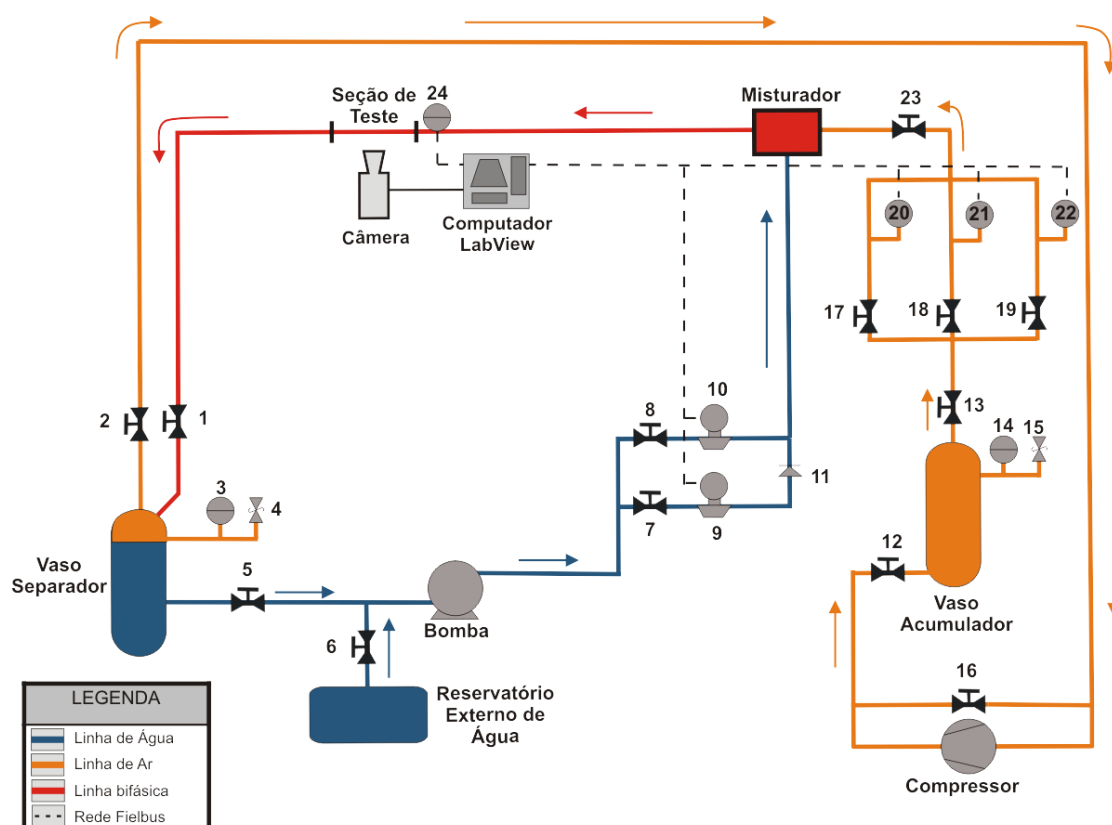


Figura 14 – Leiaute do Circuito de Ensaio. Especificação dos elementos enumerados que compõem o circuito é mostrado no Anexo B.

Na Figura 14 observa-se que o circuito é dividido em três partes: linha de circulação de líquido (Linha em azul), linha de circulação de gás (Linha em laranja), e linha de desenvolvimento da mistura bifásica (Linha em vermelho). Um computador é utilizado para monitorar as vazões e armazenar as imagens.

A mistura bifásica se desenvolve a partir do misturador por um duto de acrílico transparente de 26 mm de diâmetro interno com nove metros de comprimento (Linha vermelha). A câmera é posicionada na seção de teste e ortogonal ao escoamento a sete metros a partir do misturador.

A abertura da válvula 6 e fechamento da válvula 5 permite que uma bomba controlada por inversor de frequência desloque o fluido do reservatório externo de água, passando pelo misturador, até o vaso separador. Havendo uma quantidade suficiente para recirculação de líquido, a válvula 6 é fechada e a 5 é aberta. A leitura vazão de líquido é feita com os medidores Coriolis 9 e 10.

O compressor, através de uma entrada exclusiva de gás, fornece gás ao circuito até a pressurização desejada. O controle da vazão de ar comprimido é feito utilizando um by-pass, válvula 16, que fornece gás ao misturador, passando pelo vaso acumulador e placas de orifício (12 a 22).

Para efetiva realização dos ensaios, a válvula 6 e a alimentação externa de gás ao compressor é fechada, e o sistema atinge o regime permanente de acordo com os parâmetros desejados. Esses parâmetros são as velocidades superficiais de gás e de líquido, e pressão na seção de teste.

O transdutor de pressão 24 posicionado ao longo da tubulação tem dois objetivos: verificar a pressão na seção de teste e corrigir a velocidade superficial do gás, conforme equação 3.1 desenvolvida no apêndice C.

Devido a compressibilidade do gás, a sua velocidade superficial deve ser corrigida para duas seções distintas, apenas relacionando as pressões de saída da placa de orifício (P_2) com a pressão na seção de teste (P_1). Isso é válido já que a vazão mássica é constante, ou seja, não há perda de gás ao longo da tubulação.

$$J_2 = \frac{P_1}{P_2} J_1$$

Eq.3.1

O acumulador é o *buffer* do circuito, sendo de extrema relevância em sistemas pressurizados. Tem a função de resfriar o gás comprimido e estabilizar a vazão de gás fornecida ao misturador. Esse vaso acumulador deve ser purgado periodicamente, evitando que haja condensação na placa de orifício.

O vaso separador viabiliza o uso subsequente das fases gás e líquido no circuito através da ação da gravidade e mantêm a pressão elevada na linha de sucção da bomba e do compressor.

O misturador promove a interação entre as fases, necessária para ocorrer a mistura bifásica. Podem ser simples conexões ou labirintos, sendo que dois tipos de misturadores são mais recorrentes para injetar gás na corrente de líquido: com a corrente de gás descarregada concentricamente à corrente de líquido ou com correntes de gás e de líquido em paralelo estando a de gás acima da de líquido. Isso é utilizado para verificar se as estruturas gás-líquido no decorrer do escoamento possuem memória ou não (Rosa, 2006). Porém, este trabalho usou um misturador em que as correntes são injetadas de forma paralela na seção de teste já esse método é plenamente suficiente para se obter a mistura.

As válvulas têm a função de controlar as vazões das fases de líquido e de gás ao longo dos dutos de ensaio e limitam a pressão do vaso acumulador e separador por questão de segurança. As válvulas são detalhadas no apêndice B.

A faixa de ensaios é limitada pelas vazões máximas de gás e líquido que a bomba e o compressor podem fornecer. A princípio, as velocidades superficiais de gás e de líquido máximas possíveis são de 2 m/s e 4 m/s, respectivamente. O campo de ensaio disponível é mostrado na Figura 15.

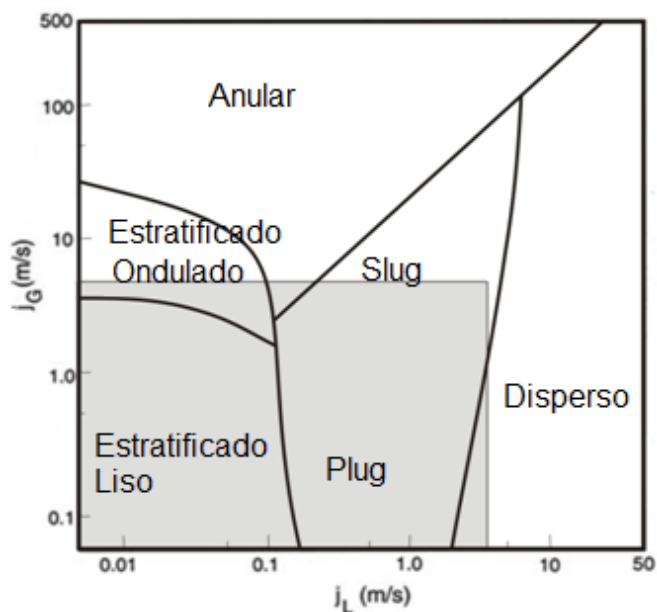


Figura 15 – A Região hachurada representa o campo de ensaio possível para realização dos ensaios. O campo é limitado pela vazão máxima do compressor e da bomba. (Adaptado de Mandhane, 1974).

3.2 Calibração do circuito experimental

Os transdutores de pressão e medidor Coriolis são calibrados de fábrica e validados por certificados, com erro menor que 1%.

Para medição da vazão de ar foi desenvolvido, internamente pelo LACIT, uma placa de orifício. Os transdutores captam a pressão diferencial devido à estreicção do ar durante a passagem na placa orifício.

Como os experimentos se dão a pressões acima da pressão atmosférica, a compressão do gás se torna relevante na leitura da vazão, sendo necessário corrigir a vazão de gás em função da pressão e temperatura durante passagem na placa de orifício.

O desenvolvimento da equação 3.2 , realizado pelo corpo técnico do LACIT, encontra-se no anexo A.

$$\dot{Q}_{PO} = [0,3184(P_G + P_{atm}) + 0,0767] Y \frac{A_{Orif}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P_{PO}}{\rho_G}} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Assim, a vazão de gás na placa de orifício utilizada para determinar a velocidade superficial de gás depende da pressão atmosférica P_{atm} , do diferencial

de pressão ΔP_{PO} da pressão de saída na placa de orifício P_G , e dos fatores geométricos e constantes de calibração detalhados no anexo A.

Para garantir a validade da equação, na tela de monitoramento do *LabView*, a qual será mostrada e discutida na próxima seção, mostra valor de Reynolds com um alerta vermelho caso o valor fique abaixo de 10^4 .

O laboratório dispõe de duas placas de orifícios, uma com orifício de 1,5mm para baixas vazões, e outra com orifício de 3 mm para alta vazões de gás. O número de Reynolds para a placa de orifício é determinado pela equação 3.3, a partir da 2.13:

$$Re = \frac{\rho_G J_G d_{Orif}}{\mu_G} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Para a combinação de velocidades de gás utilizada neste trabalho, disponíveis no apêndice D, o valor do número de Reynolds é maior que 10^4 para todos os casos, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Reynolds para placa de orifício de 1,5 mm e 3,0 mm tabelado para as velocidades superficiais de gás utilizadas.

Jg (m/s)	Re	
	D _{orif} =1,5 mm	D _{orif} =3 mm
0,3	31.681	63.362
0,5	52.802	105.603
0,7	73.922	147.845
1,0	105.603	211.207
1,3	137.284	274.569

3.3 Aquisição de Imagens

O monitoramento do escoamento é feito com uma câmera de alta resolução de imagens ou HSC (*High Sensitivity Camera*), mostrada na Figura 16.



Figura 16 - Câmera de alta taxa de aquisição de imagem ou HSC (*High Sensitivity Camera*).

O número de imagens capturas por segundo e a resolução da imagem coletada depende do grau de precisão exigido para análise do escoamento em processo. Quanto maior às velocidades superficiais do escoamento, maior a resolução exigida. Porém, imagens de alta resolução a alta taxas de captura são inviáveis, pois devido ao esgotamento na memória da câmera os filmes coletados são de curta duração impossibilitando uma análise mais assertiva do padrão de escoamento.

Outro fator que dita os parâmetros de filmagem é o número de imagens capturadas durante a passagem da transição pista-bolha. Quanto maior o número de imagens, melhor a amostragem. A Tabela 2 apresenta as configurações utilizadas.

Tabela 2 - Configuração da câmera

Resolução	Taxa de aquisição	Tempo de aquisição
500x320	100fps	40 segundos

Quando realizado uma série de testes, devem ser constante: distância entre lente de duto de escoamento, taxa de aquisição de imagem e iluminação.

Quanto à iluminação, o contraste entre a fase de gás e de líquido deve ser suficiente para gerar uma interface facilmente reconhecida pelo algoritmo. Caso a iluminação não seja adequada, o software pode não reconhecer a bolha

corretamente e fornecer parâmetros incorretos de velocidade de bolha, comprimento, fração de vazio, além da frequência e fator de intermitência.

Na Figura 17 há um exemplo do padrão de imagem que pode ser usada ou não pelo *software*. A imagem do topo apresenta uma interface clareada com excesso de luz nas bordas e no topo do duto, o que gera erro na leitura da delimitação da interface gás-líquido. Na imagem de baixo, o nariz da bolha está claramente definido pelo entorno escuro que representa a interface que distingue toda a bolha da fase de líquido até a esteira.

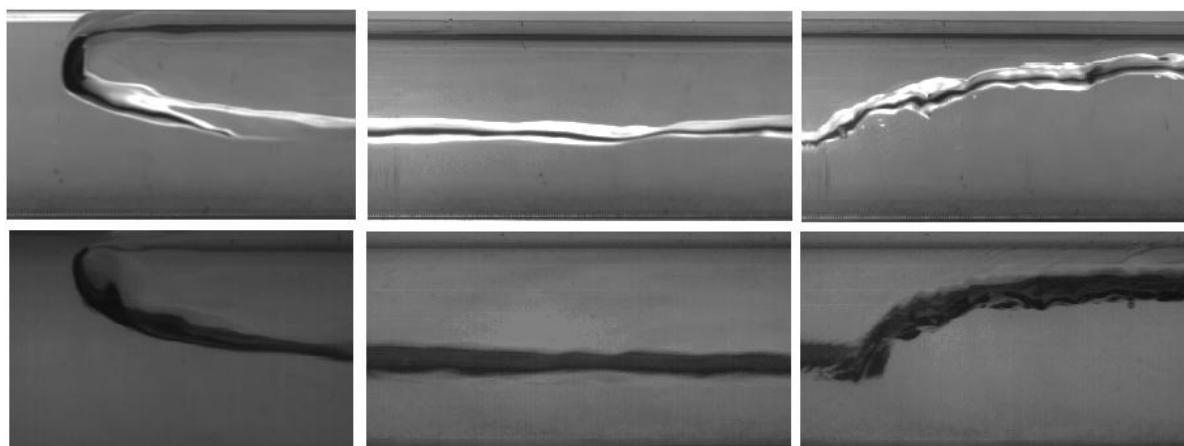


Figura 17 - Iluminação inadequada (acima) e iluminação adequada (abaixo)

A configuração correta da iluminação depende do ajuste da lâmpada atrás do duto, a introdução de um tecido de poliéster entre a lâmpada e o duto com o objetivo de não gerar pontos de concentração de luz, além do ajuste de tempo de exposição da lente a luz durante captura da imagem, o qual é configurado no *software* da câmera.

3.4 Processamento das Imagens

A partir do filme coletado pela câmera de alta velocidade em formato *raw*, faz-se a conversão para uma sequência de imagens em formato *png*, as quais são possíveis submeter a um algoritmo computacional.

Utilizado um *software* desenvolvido pelo LACIT, na plataforma *MathLab*, as imagens coletas são seqüenciadas para que o algoritmo realize uma varredura em

toda a série. O processamento das imagens fornece a velocidade da bolha, comprimento da bolha e do pistão líquido, frequência e fator de intermitência da bolha, além da fração de vazio.

O primeiro passo é distinguir a região da bolha e a região do pistão, gerando uma imagem binária a partir da imagem original, composta por preto na região de gás e branco na de líquido. Essa sequência é mostrada na Figura 18 e Figura 19 para o nariz e a esteira da bolha.

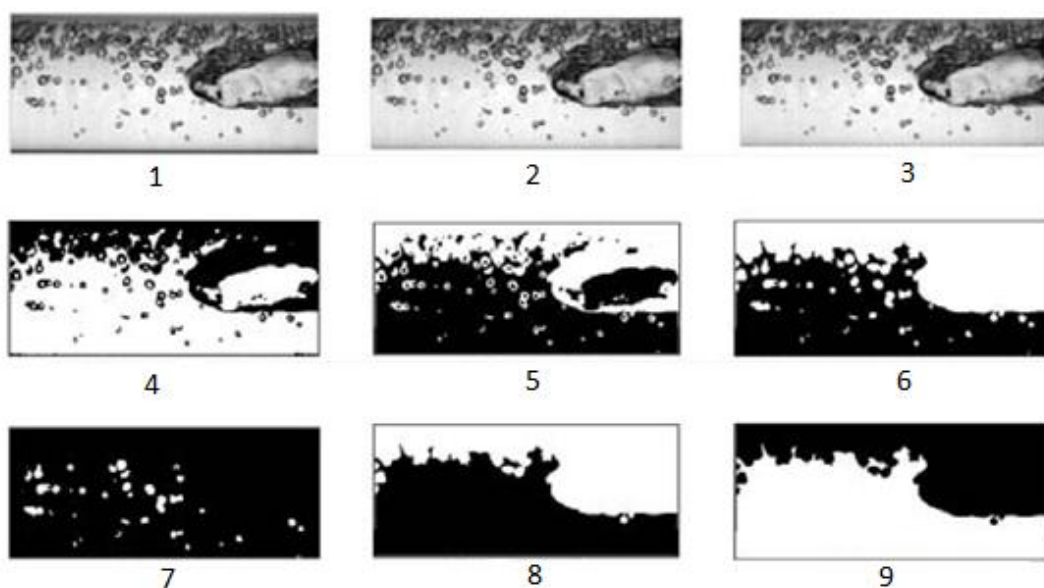


Figura 18 – Transformação para imagem binária, gás para líquido, branco pra líquido. (Imagem cedida pelos docentes do LACIT)

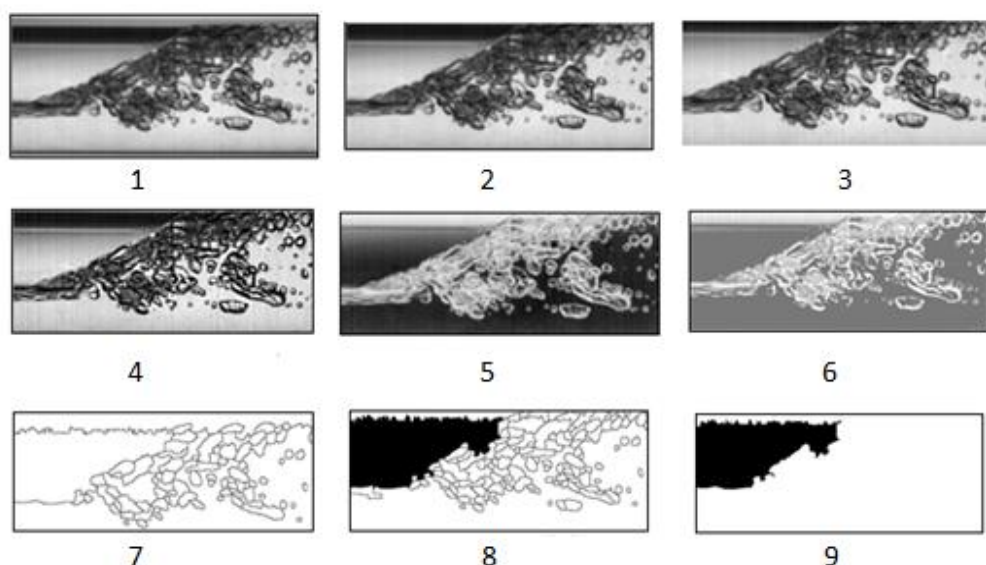


Figura 19 - Transformação binária de esteira de bolha (Imagem cedida pelos docentes do LACIT)

Assim, sensores virtuais varrem a imagem da direita para esquerda, buscando a altura de líquido para cada coluna. Caso a variação das colunas de gás, em preto, se assemelhem com um nariz de bolha, um algoritmo considera como uma frente de bolha, como mostrado na Figura 20.

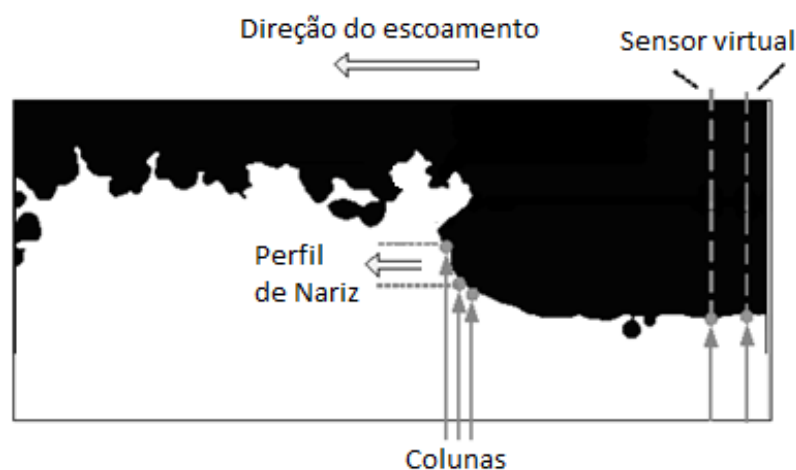


Figura 20 - Identificação de frente de bolha (Nariz da bolha)

Para a traseira da bolha, a varredura é semelhante, porém como a esteira da bolha é mais aerada do que o nariz, faz com que bolhas dispersas gerem um erro da coordenada final da bolha. Em função disso, é feita uma análise individual das bolhas identificadas, eliminando possíveis bolhas falsas da população de bolhas

estudadas. Isso é possível, pois, o programa planifica a sequência de imagens que compõem a bolha e mostra a área considerada, conforme a Figura 21. Na Figura 22 há em exemplo de uma falsa bolha identificada. Os perfis das extremidades mostram padrões semelhantes de bolha, porém são apenas pequenas bolhas dispersas que compõem a esteira de outra bolha principal. Caso como esses foram excluídos da amostragem.

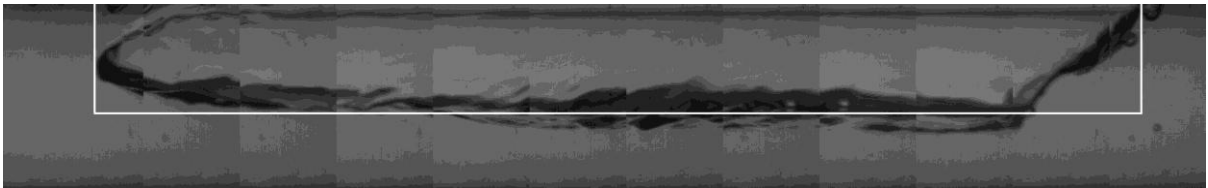


Figura 21 - Planificação de bolha e delimitação da interface gás-líquido (quadro em branco).

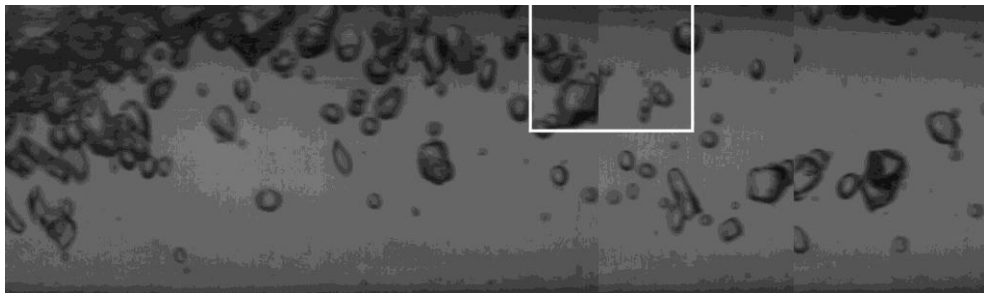


Figura 22 - Falsa bolha identificada pelo algoritmo

Por fim, é gerado um arquivo em formato *xls* com todos os parâmetros do escoamento para cada bolha. Com base nesses arquivos são construídos os gráficos para análise da influência da pressão, discutidos na seção Resultados.

3.5 Aquisição dos Dados e Sistema Supervisório

A coleta e pré-processamento dos dados é feita usando um programa de aquisição de dados desenvolvido na plataforma de programação *LabView*. Neste programa são monitorados os medidores de vazão de líquido e gás, os sensores de pressão e os transmissores de temperatura. Após a coleta, o ensaio somente é validado caso o erro da pressão e velocidades superficiais de líquido e gás sejam

menores que 3%. Na Tabela 3 estão expostas as velocidades superficiais ensaiadas.

Tabela 3 - Combinação de velocidades superficiais de líquido e de gás

Pressão	1 Bar		2 Bar		3 Bar		4 Bar		5 Bar	
	J _L	J _G	J _L	J _G	J _L	J _G	J _L	J _G	J _L	J _G
J=1 m/s	0,30	0,70	0,30	0,70	0,30	0,70	0,30	0,70	0,30	0,70
	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	0,70	0,30	0,70	0,30	0,70	0,30	0,70	0,30	0,70	0,30
J=1,5 m/s	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00
	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50
J=2 m/s	0,70	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30	0,70	1,30	0,70

O campo de interesse é a região do escoamento intermitente, visto sua relevância em processos industriais mostrados nas seções 1 e 2. As velocidades superficiais são combinadas para valores de velocidade resultante de 1, 1,5 e 2 m/s, ou seja, no campo do padrão de escoamento intermitente. As pressões foram divididas em cinco faixas de 1 a 5 Bar.

Os sensores ao longo da tubulação fornecem os sinais através da rede *FieldBus* a um computador equipado com uma placa PCI e o software *LabVIEW* ambos da *National Instruments*. Os sinais de vazão, pressão e temperatura são processados por um algoritmo desenvolvido pelo LACIT juntamente com os dados de *input*: diâmetro, constantes de calibração, aceleração da gravidade. Os dados são registrados e exibidos na tela para monitoramento do ensaio conforme Figura 23. No Anexo 2 encontra-se os detalhes da tela de monitoramento.

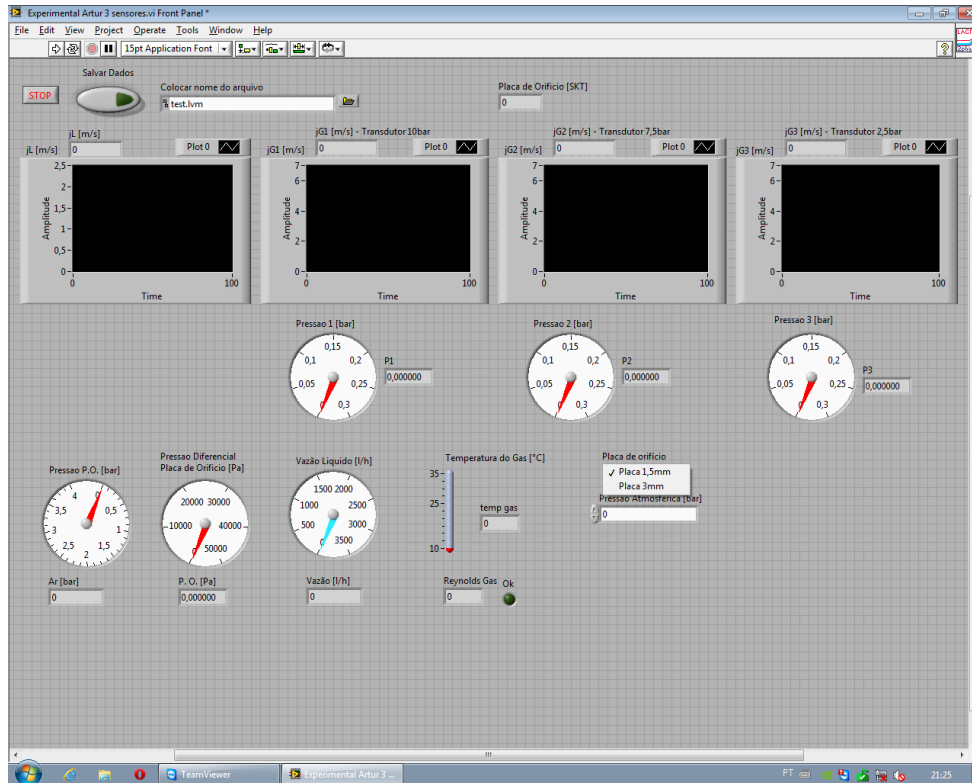


Figura 23 - Interface gráfica do Labview (Soares, 2010)

O procedimento para realização do ensaio é exposto no fluxograma da Figura 24.

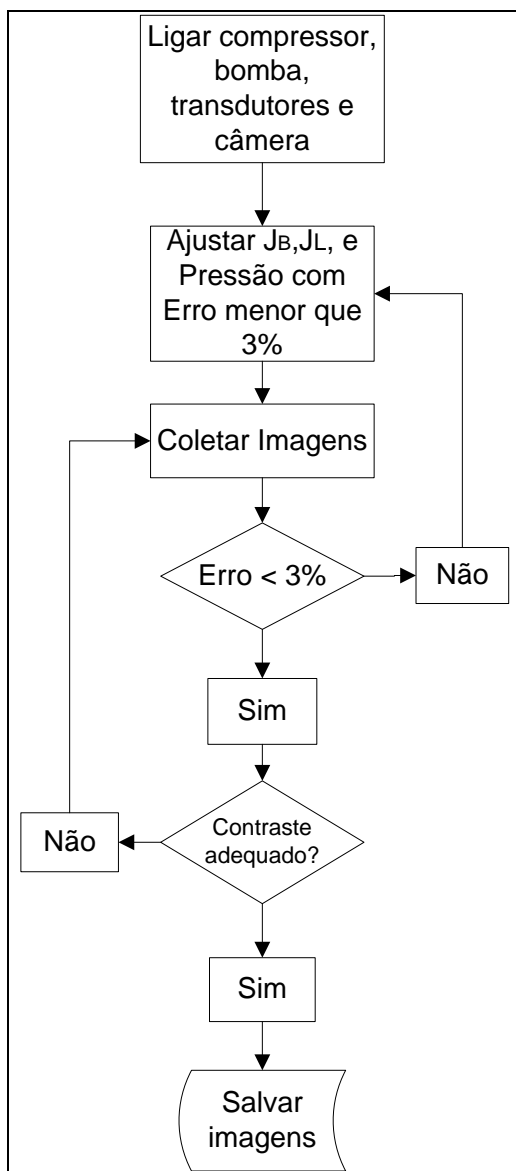


Figura 24 - Fluxograma de ensaio.

Ajustado do ponto de interesse para os valores de J_G , J_L e da pressão, é realizado a coleta de imagens. Se o erro em algum parâmetro do ponto de interesse for superior a 3% ou o contraste for inadequado, o ensaio é descartado. Caso contrário, o ensaio é validado e são ajustados os novos valores de J_G , J_L e da pressão para o próximo ponto de interesse.

4 RESULTADOS

Os resultados foram gerados a partir das combinações de velocidades da Tabela 3, de forma a desenvolver o padrão de interesse, tipo em golfadas. Em decorrência do processamento das informações os comportamentos dos parâmetros do escoamento (comprimento, velocidade e frequência da bolha, fator de intermitência, fração de vazios, e velocidade do pistão) são apresentados em gráficos para cada relação de velocidades superficiais em função da pressão. Na sequência, são feitas algumas considerações qualitativas a cerca dos resultados obtidos, além de discussões sobre os fenômenos observados.

4.1 Comprimento da Bolha

A formação da bolha ocorre durante a translação ao longo do duto, quando há a coalescência de bolhas menores a partir do misturador. O que se observa na

Figura 25 – Comprimento de bolha em função da pressão para combinações de velocidades superficiais.

é que o aumento da pressão e da velocidade superficial de líquido provoca uma diminuição de comprimento médio das bolhas.

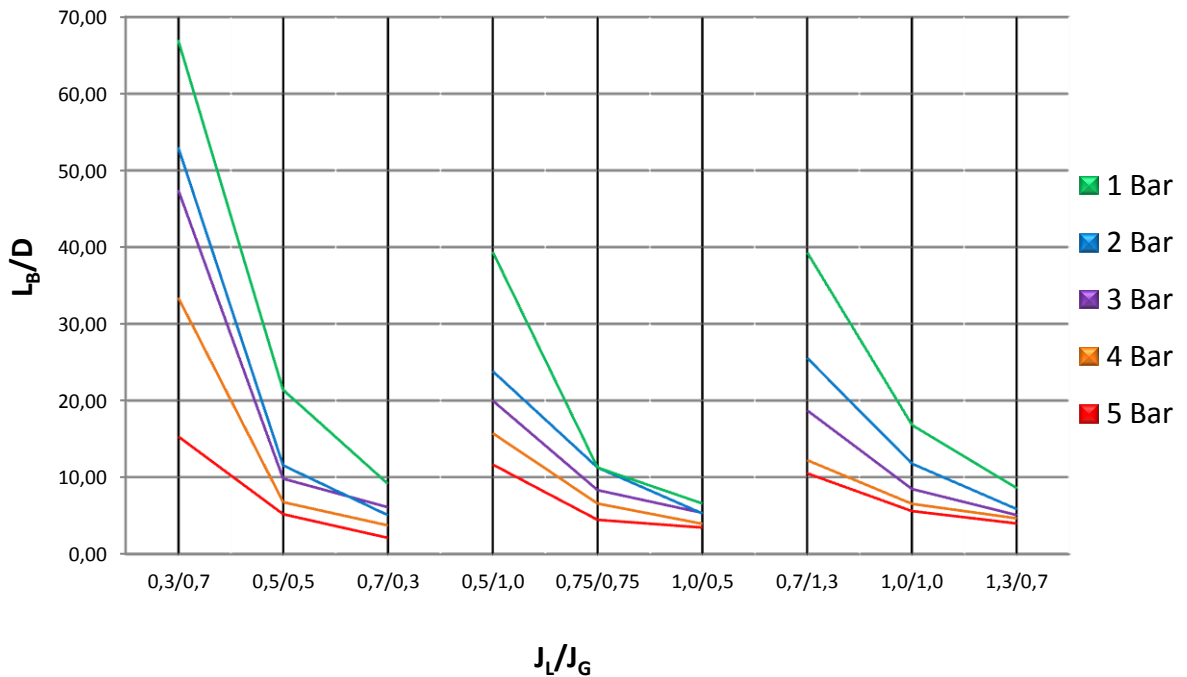


Figura 25 – Comprimento de bolha em função da pressão para combinações de velocidades superficiais.

A pressão provoca uma compressão de volume da fase de gás. Como a diminuição de volume é diretamente proporcional a pressão, há uma alteração em proporção aproximada de comprimento de bolha devido à variação da pressão.

Já o aumento da relação J_L/J_G provoca um redução tamanho de bolhas já que a vazão de gás é maior.

4.2 Fração de Vazios

Na Figura 26 é mostrada a diminuição da fração de vazio com o aumento da pressão, e na maioria dos pontos há a diminuição também com o aumento da relação J_L/J_G .

Assim como a variação do comprimento da bolha, a variação da fração de vazios se deve ao fato do gás comprimir com o aumento da pressão. Porém, agora em menor relação, ou seja, se para o comprimento da bolha de 2 Bar para 4 Bar o

comprimento foi reduzido aproximadamente pela metade, agora para fração de vazios essa proporção é bem menor.

Esse fator demonstra que a variação no sentido longitudinal é maior do que no transversal.

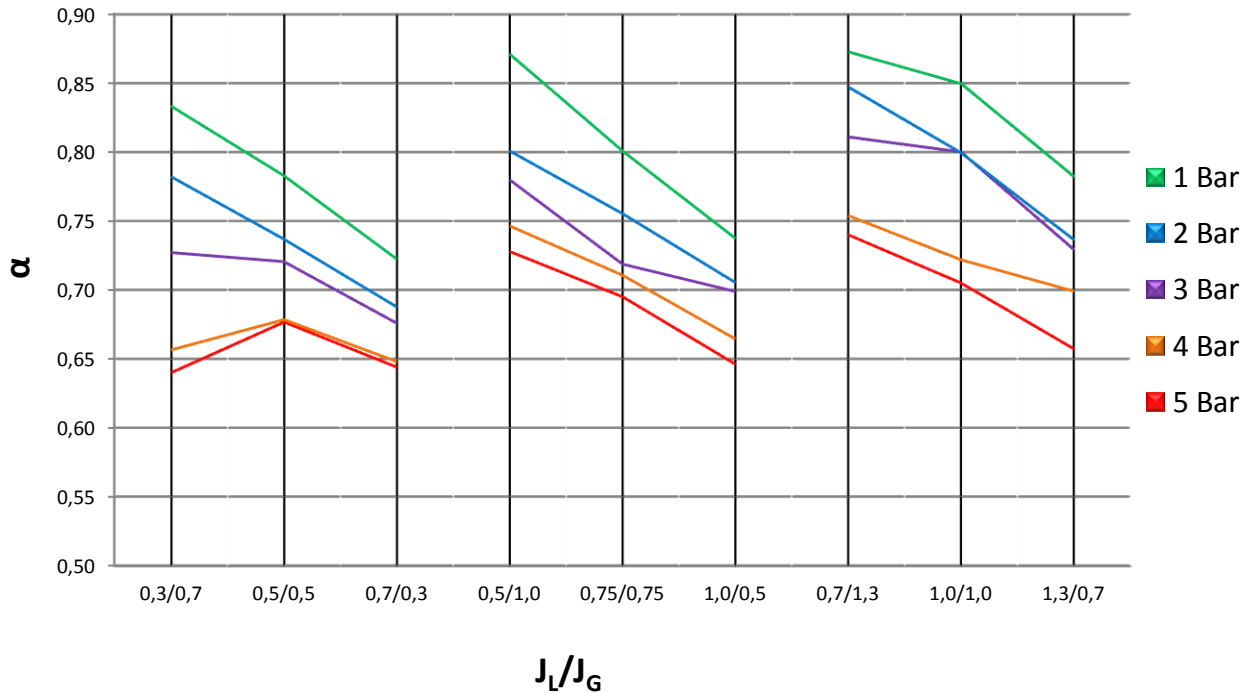


Figura 26 - Variação da fração de vazios em função da pressão e velocidade superficial de líquido e de gás

4.3 Velocidade da Bolha

A velocidade de translação da bolha depende do gradiente de pressão no duto. Para escoamentos intermitentes, a esteira formada pela bolha altera o perfil de velocidades de líquido do pistão que se forma logo atrás da bolha. Quanto maior essa distorção, maior é o impacto na aceleração da bolha seguinte, ou seja, quando menor a quantidade de líquido a frente do nariz da bolha, menor é a resistência de translação. Isso fica evidenciado na Figura 27, onde se observa que o aumento da velocidade superficial de líquido provoca um aumento na velocidade média da bolha.

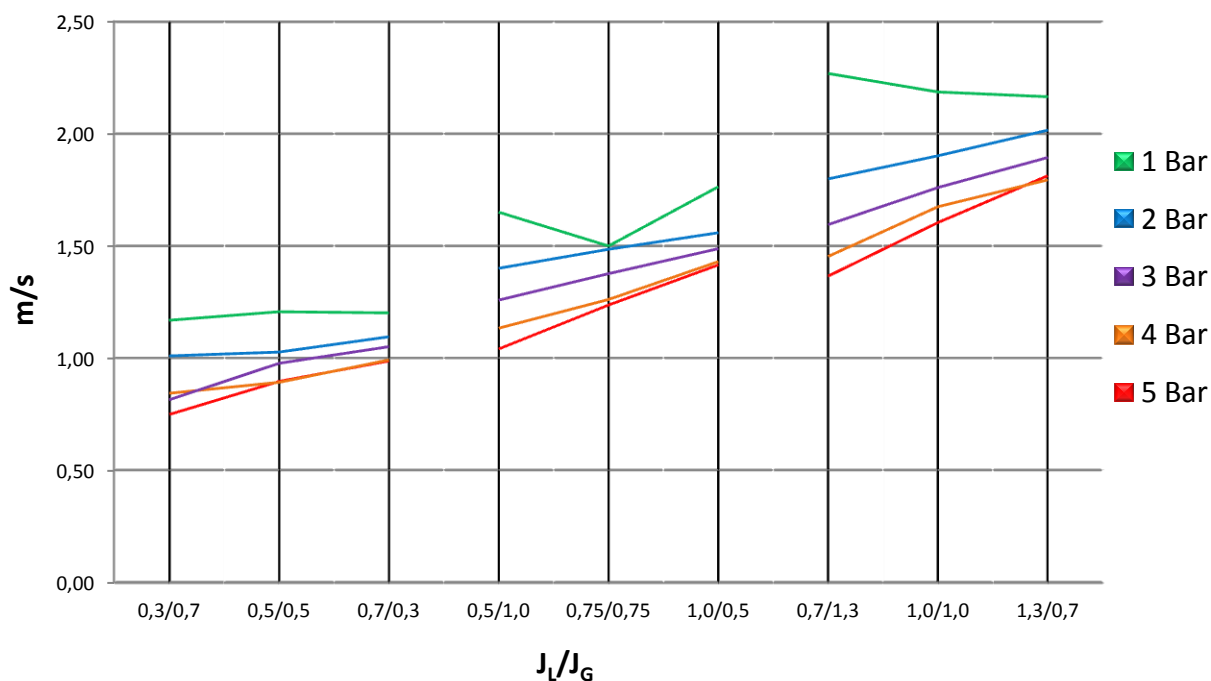
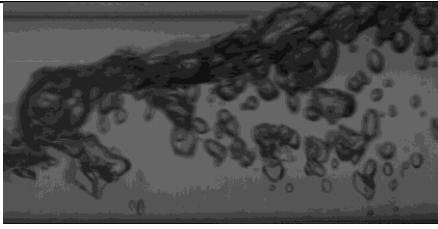
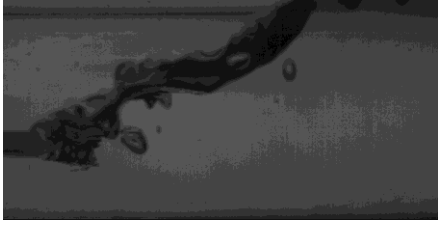
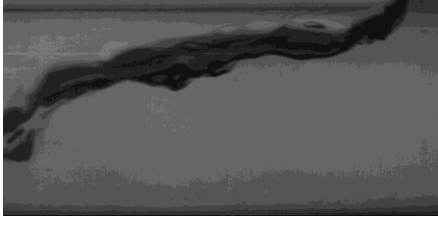

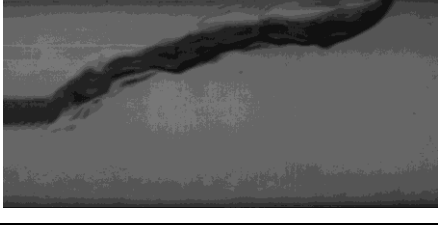


Figura 27 – Variação das velocidades da bolha em função das velocidades superficiais e da pressão

O que se observa também é que o aumento da pressão diminui a velocidade média da bolha para a maioria dos casos. Novamente, isso se deve a esteira formada pela bolha que influencia a bolha subsequente. Com o aumento da pressão, o perfil da esteira gera menos perturbação no perfil de velocidades que influencia a próxima bolha. Na Tabela 4 são mostrados diferentes perfis de esteira com o aumento da pressão. Quase não há bolhas dispersas para pressões maiores.

Tabela 4 - Esteira de bolha para pressões de 1 a 5 Bar para velocidades superficiais de $j_L=0.5$ m/s e $j_G=1.0$ m/s.

Pressão	Perfil da Esteira
1 Bar	
2 Bar	
3 Bar	
4 Bar	
5 Bar	

Outra explicação para diminuição da velocidade da bolha devido ao aumento da pressão pode ser feita utilizando a equação 4.1.

$$J_G = \frac{\dot{V}_G}{A} = \frac{v_G \dot{m}_G}{A} \quad \text{Eq. 4.1}$$

A pressurização do circuito leva à diminuição do volume específico do gás (v). Como a vazão mássica e a área são constantes, a velocidade superficial do gás

teoricamente deve diminuir na mesma proporção. Porém, a velocidade não diminui na mesma proporção do aumento da pressão gás.

4.4 Comprimento do Pistão

O comprimento do pistão é sensível a variação de pressão para baixa velocidade superficial resultante $J = 1 \text{ m/s}$. Para $J = 1,5$ e 2 m/s a influência da pressão não é significativa conforme evidenciado na Figura 28.

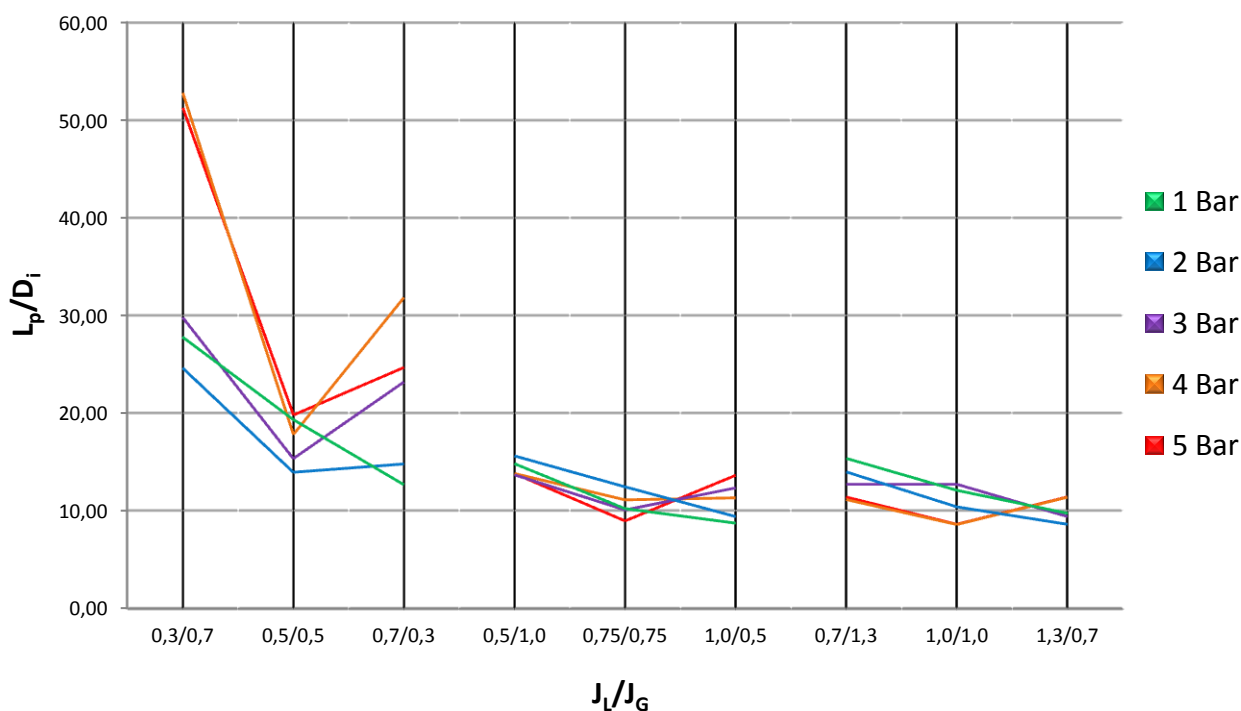


Figura 28 - Variação do comprimento de pistão em função da pressão

Esse fenômeno não apresenta padrão de simples identificação, sendo sua natureza complexa. Acredita-se que com o aumento da amostragem, ou seja, o tempo de filmagem, as linhas se tornem mais separadas, proporcionando uma melhor avaliação da tendência dos valores.

4.5 Frequência de bolhas

Como a frequência é o número de bolhas que transladam na seção de visualização para um segundo, de fato, o aumento da velocidade superficial resultante (j) provoca um aumento na frequência da bolha conforme Figura 29. A pressão não mostra influência na frequência de forma sistêmica.

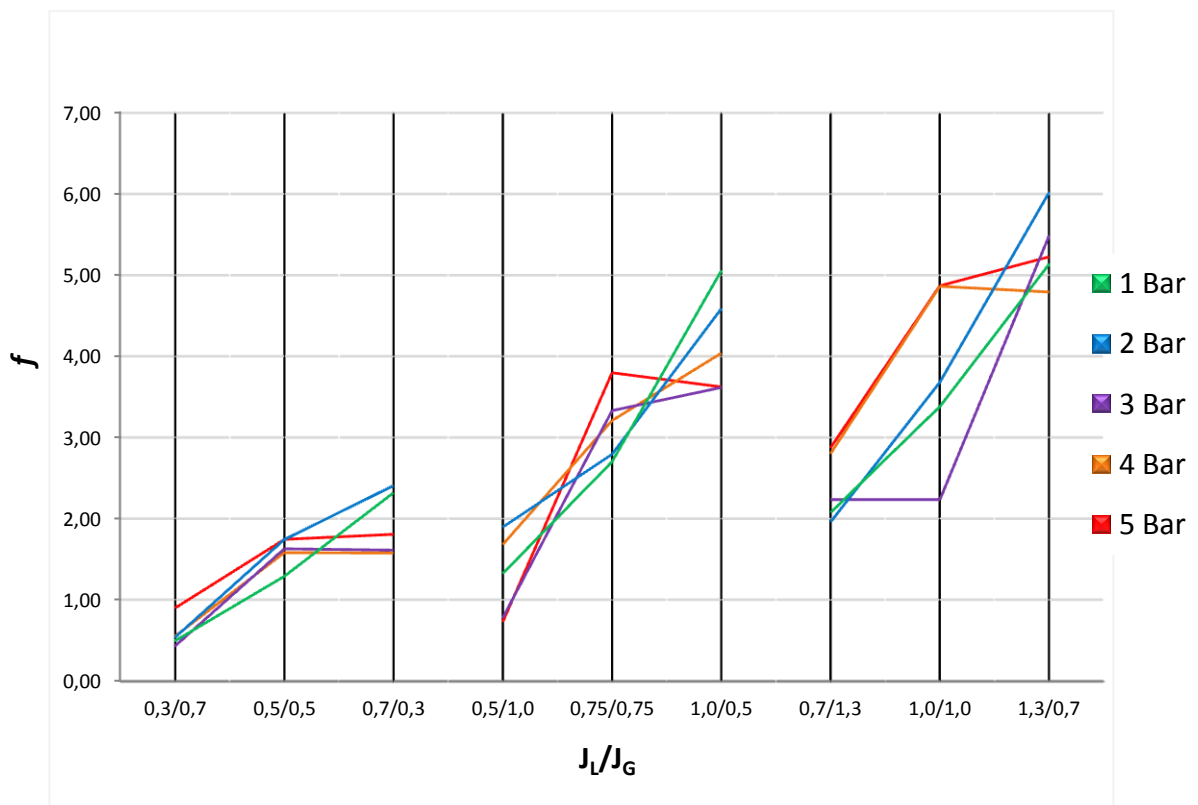


Figura 29 - Variação da frequência de bolhas em função da pressão e velocidades superficiais.

4.6 Fator de Intermitência

O fator de intermitência pode ser interpretado pela equação 2.15.

$$\beta = \frac{L_B}{L_B + L_P} \quad \text{Eq.2.15}$$

Depende somente de L_B e L_P . Esses parâmetros estão expostos na Figura 25 e na Figura 28. Logo, a Figura 30 representa a associação dos comprimentos da bolha e do comprimento do pistão a partir da equação 2.15.

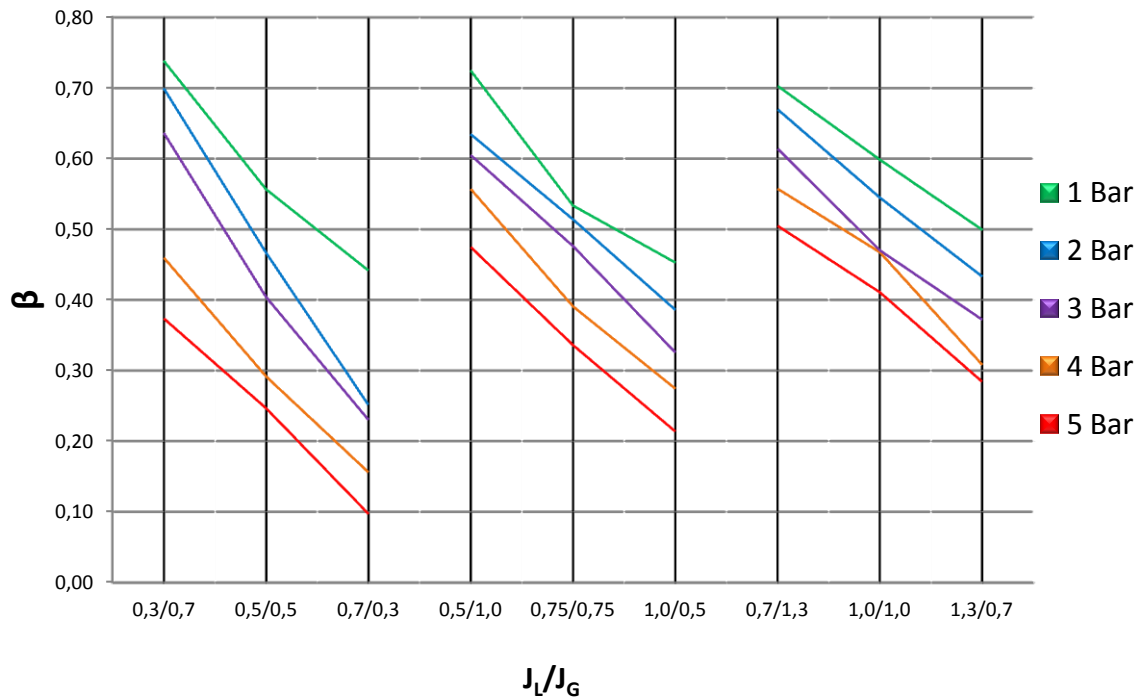


Figura 30 - Fator de intermitência mediante a variação de velocidade superficial e da pressão

O que se observa é um comportamento semelhante ao de comprimento de bolhas da Figura 25, ou seja, o fator de intermitência diminuiu com o aumento da pressão e da relação J_L/J_G .

Embora o comprimento do pistão não varie de forma sistêmica conforme item 4.4, isso não impactou de forma significativa o fator de intermitência, sendo esse influenciado predominantemente pela variação do comprimento da bolha.

4.7 Alteração de padrão de escoamento

Antes da realização dos ensaios e consolidação dos resultados, havia a hipótese de que a pressões superiores a 1 Bar os padrões de escoamentos originalmente estabelecidos pudessem ser alterados. Ou seja, para uma mesma combinação de velocidades superficiais de líquido de gás, haveria alterações do padrão de escoamento do tipo: golfadas para bolhas alongadas, estratificado

ondulado para estratificado liso. Essas alterações significariam que as linhas que delimitam da região do padrão fossem deslocadas conforme Figura 31, a qual representa o deslocamento das linhas de forma qualitativa.

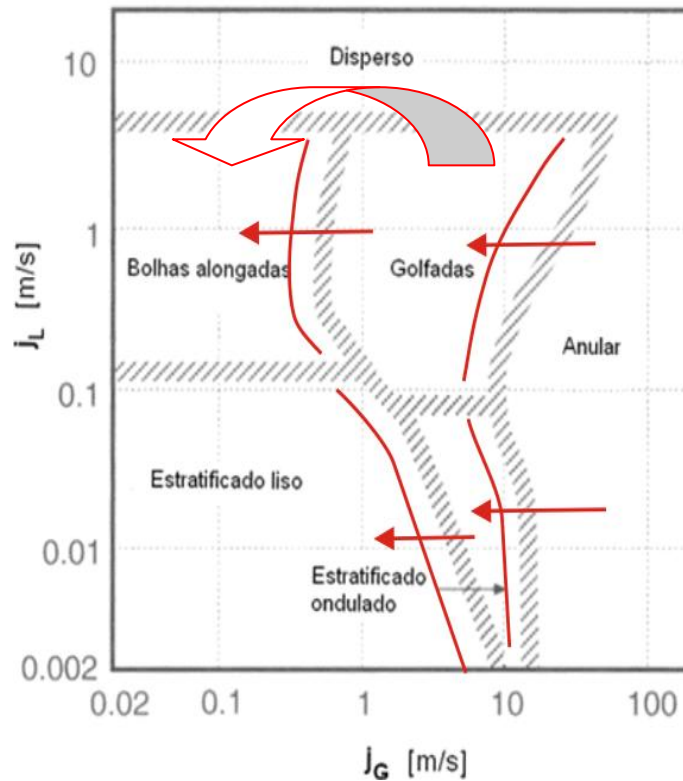


Figura 31 - Deslocamento das Faixas de Transição de Padrão de Escoamento. (Adaptado de Mandhane, 1974)

A partir da análise dos dados coletados e da discussão realizada no item 2.2.2 sobre a distinção entre o escoamento *slug flow* (golfadas) e *plug flow* (bolhas alongadas) é possível aferir que a pressão modifica o padrão de escoamento.

Escolhendo uma combinação de velocidades superficiais dentro do campo *slug flow*, $J_L=0,3$ e $J_G=1,0$, os parâmetros que caracterizam o escoamento são expostos na Tabela 5 para as cinco faixas pressões.

Tabela 5 - Parâmetros de escoamento para $J_L=0,3$ e $J_G=0,7$

Parâmetro	Pressão				
	1 Bar	2 Bar	3 Bar	4 Bar	5 Bar
Vel. Superf. Resultante	J=1 m/s				
Fr	1,98				
L_B médio	0,34	0,35	0,27	0,40	0,25
L/D_i médio	12,95	13,41	10,33	15,43	9,57
H_L médio	0,17	0,22	0,27	0,34	0,39

Adaptando o gráfico exposto na Figura 6 discutido no item 2.2.2, temos os pontos para os valores da Tabela 5 para as faixas de pressão até 5 Bar.

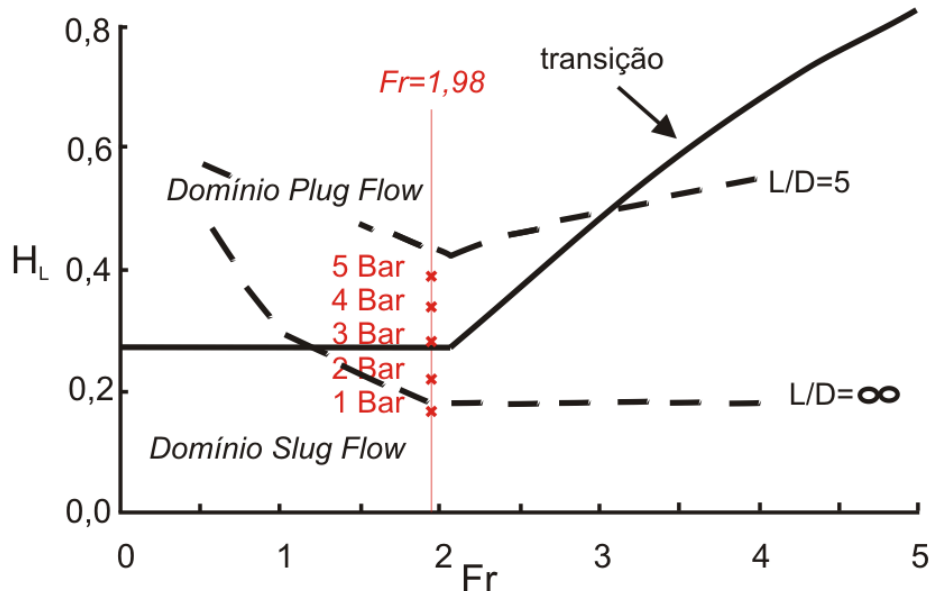


Figura 32 – Pontos para os valores determinados na Tabela 5. Transição *Plug Flow* para *Slug Flow* em função da fração de líquido (H_L) e o número de Froude (Fr). Adaptado de Fagundes et al. (1999).

Observa-se que com o aumento da pressão, para o número de Froude calculado ($Fr=1,98$), a fração de líquido aumenta, fazendo com que o escoamento passe de *slug flow* (golfadas) à 1 Bar para *plug flow* (bolhas alongadas) à 5 Bar.

Outro comprovante dessa mudança de padrão é que o escoamento em golfadas é aerado, enquanto o por bolhas alongadas não (Item 2.2.2). De fato, com o aumento da pressão, o pistão não é mais aerado, conforme sequência de figuras da Tabela 4.

4.8 Resumo dos resultados obtidos

Na Tabela 6 há uma compilação das variações dos seis parâmetros processados em função do aumento da pressão, velocidade resultante e velocidades superficiais de líquido.

Tabela 6 – Resumo da variação dos parâmetros

Símbolos	Aumento		↓			
	Redução		↓			
	Aleatório		*			
Parâmetro	V_B	L_B	L_P	f	β	α
Pressão ↑	↓	↓	*	*	↓	↓
J ↑	↑	*	*	↑	*	*
J_L/J_G ↑	↑	↓	*	↑	↓	↓

De acordo com os dados coletados, há uma clara tendência de variação para a maioria dos parâmetros analisados. Acredita-se que com o aumento da amostragem haveria uma melhor separação das linhas para todas as faixas de valores e parâmetros coletados.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para determinação da influência da pressão no padrão de escoamento bifásico em dutos horizontais em golfadas, utilizando uma câmera de alta velocidade disposta numa bancada de escoamento pressurizado. Foi testada a consistência da bancada de ensaio a altas pressões e validada a calibração dos equipamentos. As imagens coletadas foram processadas por um algoritmo capaz de fornecer parâmetros de velocidade, comprimento e frequência da bolha, além da fração de vazios, fator de intermitência, e velocidade do pistão de líquido.

Com base nos dados após processamento, verificou-se que a pressão influencia fortemente em todos os parâmetros de escoamento. O aumento da pressão diminui a velocidade, o comprimento da bolha, o fator de intermitência e a fração de vazio. Não foi identificada uma tendência sobre o comportamento do comprimento do pistão e da frequência de passagem das células em função da pressão.

A comparação entre as estruturas desenvolvidas em escoamento pressurizado e à pressão atmosférica fornece noções sobre o impacto da pressão no escoamento. Este trabalho comprovou que há alterações significativas nos parâmetros do escoamento em golfadas que devem ser levadas em conta nos processos que envolvem misturas bifásicas. Por exemplo, negligenciar a diminuição da velocidade superficial do gás com o aumento da pressão pode acarretar em danos nos equipamentos que envolvem descolamento de misturas, pois as previsões dos parâmetros de transferência de massa e calor correlatos ao escoamento em golfadas não correspondem aos valores encontrados para pressão atmosférica.

Como não foram encontrados na literatura aberta trabalhos sobre a influência da pressão no escoamento em golfadas, não foi possível realizar a comparação dos resultados aqui obtidos. Logo este trabalho é inédito. Porém, precisam ser realizados testes adicionais para comprovar as tendências identificadas no presente estudo, pois uma amostragem maior há uma melhor representação dos parâmetros analisados, além de uma melhor separação das linhas dos valores de comprimento de pistão e frequência de bolhas.

REFERÊNCIAS

- BERTOLA, Volfango. **Modeling and Experimentation in Two-Phase Flow**. New York: Springer Wien, 2003, (CISM courses and lectures; no 450) 430 p.
- BLOEMER, Kevin Humberto Huscher. **Projeto de circuito experimental para simulação de escoamento bifásico líquido-gás a altas pressões em tubulações**. 2009. 144 p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica, Curitiba, 2009.
- BRENNEN, C.E. **Fundamentals of Multiphase Flow**, Ed. *Cambridge University Press*, Inglaterra, 2005.
- CAETANO, E.F., SHOHAM, O. and BRILL, J.P., **Upwards vertical two-phase flow through an annulus**. *Journal of Energy Resources Technology*, vol.114. 1992.
- CHELSKI, A. **Estudo Experimental dos Escoamentos em Golfadas com Mudança de Direção**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia industrial Mecânica, Curitiba, 2006. 2010. 98 p.
- CROWE, C. *Multiphase Flow Handbook*. CRC Press. 2005.
- FOX, R. W. MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2006. 798 p.
- J.M. Mandhane, G.A. Gregory and K. Aziz, **A flow pattern map for gas—liquid flow in horizontal pipes**, *Int. J. Multiphase Flow* 1, 537- 53. 1974.
- INCROPERA, Frank P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. Ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. xix, 643 p.
- National Instrument. **Foundation Fieldbus Overview**. Disponível em: < <http://www.ni.com/> >.
- OSMASALI, S.I., and CHANG, J.S. **Two-phase flow regime transition in a horizontal pipe an annular flow under gas-liquid two-phase flow**. *ASME FED* 72:63-69.1988.

Petrobras. **Plano de Negócios 2010-2014.** Disponível em:<<http://www.petrobras.com.br/ri>> Acesso em: 29 junho de 2011.

Rosa E. S., Gonçalves M. A. L., Netto J. R. F. **Influência da viscosidade no escoamento horizontal em golfadas.** Boletim Técnico da Produção de Petróleo, Rio de Janeiro - volume 1, nº 2, p. 255-272 .2006.

RODRIGUES, Hendy Tisserant. **Simulação numérica do escoamento bifásico gás-líquido no padrão de golfadas utilizando um modelo lagrangeano de seguimento de pistões.** 2009. 180 p: Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Área de concentração: Engenharia Térmica, Curitiba, 2009.

Sardesai R. G, OwenR. G. and D. J. **Pulling Flow regimes for condensation of a vapor inside a horizontal tube** *Heat Transfer and Fluid Flow Chemical Engineering Science* Volume 36, Issue 7, Pages 1173-1180. 1981.

SHOHAM, O. ***Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow***, 1^aed. *Society of Petroleum Engineers, Texas-USA*, 2006.

SOARES, Murilo Augusto. **Caracterização do escoamento bifásico gás-líquido utilizando o sensor de malha de eletrodos – WIRE MESH SENSOR.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica, Curitiba, 94 p. 2010

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Tubulações industriais.** 10^a Ed. 2 v. ISBN 85-216-1289-3 (v. 1). 252 p. 2001.

APÊNDICE B – DETALHAMENTO/ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO

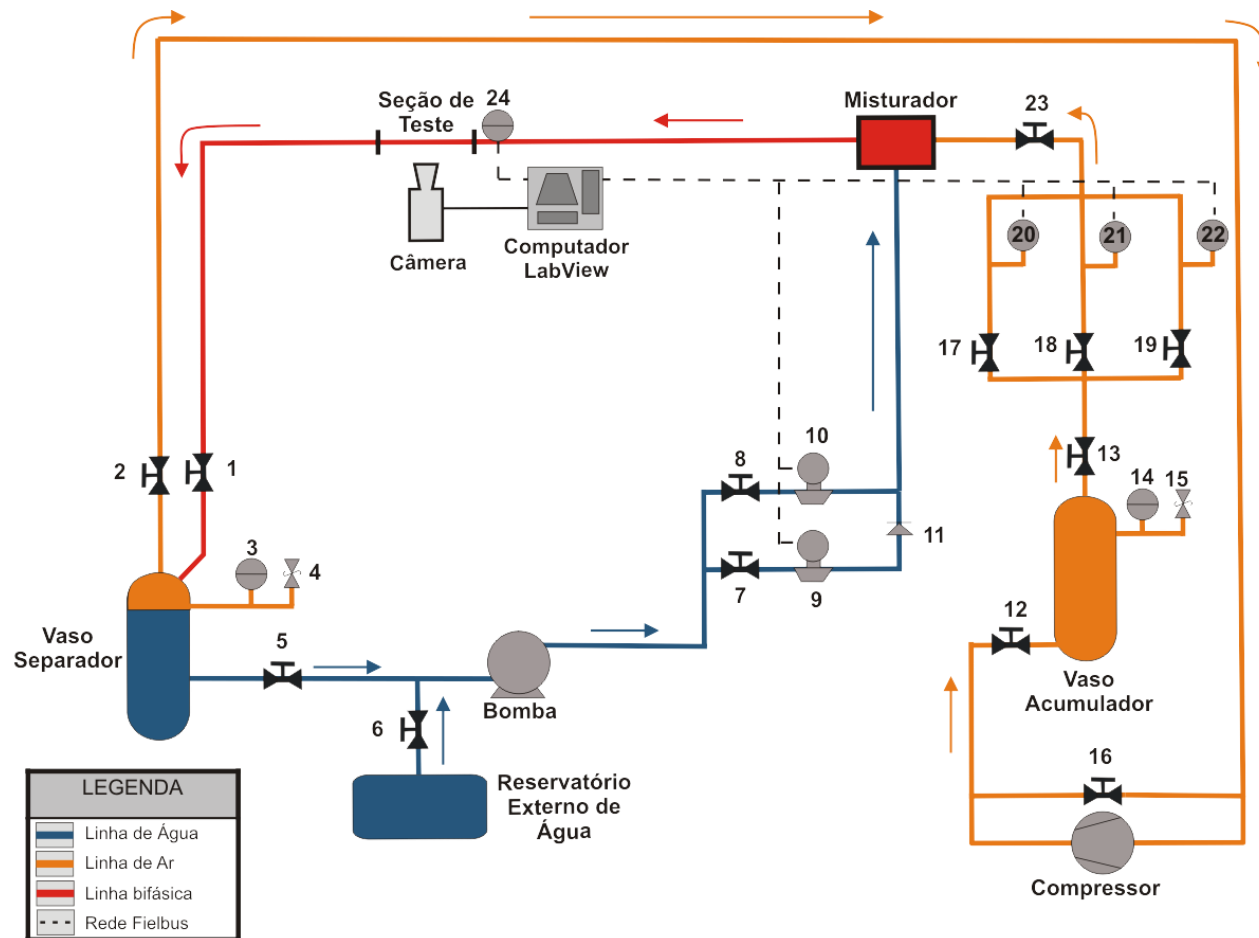


Figura 33 - Elementos do Circuito

Os elementos que compõem o circuito são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Válvulas de Controle

Item (número)	Componente	Função
1	Válvula Esfera	Bloqueio da Linha de descarga da mistura
2	Válvula Gaveta	Bloqueio da linha de retorno do gás pressurizado
3	Manômetro	Medidor de Pressão do Vaso Separador
4	Válvula de alívio	Controle da Pressão do Vaso (Segurança); Descarte do Gás.
5	Válvula Globo	Bloqueio da Linha de Retorno do Líquido
6	Válvula Globo	Controle da Vazão do reservatório externo; Impedir refluxo de Água após Pressurização do Circuito
7	Válvula Gaveta	Controle da Vazão do Medidor Coriolis de Baixa Vazão
8	Válvula Gaveta	Controle da Vazão do Medidor Coriolis de Alta Vazão
9	Medidor de Coriolis de baixa vazão	Medir vazão do líquido quando em baixa vazão
10	Medidor de Coriolis de alta vazão	Medir vazão do líquido quando em alta vazão
11	Válvula de Retenção	Impedir o refluxo de líquido; evitar danos ao Medidor Coriolis de baixa
12	Válvula Gaveta	Bloqueio do fornecimento do gás do compressor ao Vaso Acumulador
13	Válvula Globo	Controle da Vazão de Descarga do Acumulador
14	Manômetro	Medidor de Pressão do Vaso Separador
15	Válvula de alívio	Controle da Pressão do Vaso (Segurança); Descarte do Gás
16	Válvula Gaveta	Controle da Vazão de Gás (By-Pass)
17	Válvula Agulha	Controle da Vazão de Gás
18	Válvula Agulha	Controle da Vazão de Gás
19	Válvula Agulha	Controle da Vazão de Gás
20	Medidor de vazão Placa de Orifício	Coletar vazão de gás da mistura
21	Medidor de vazão Placa de Orifício	Coletar vazão de gás da mistura
22	Medidor de vazão de gás Vortex	Coletar vazão de gás da mistura
23	Válvula Globo	Bloqueio da Vazão de Gás
24	Transdutor de Pressão	Medir pressão na seção de teste

APÊNDICE C – CORREÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL

Para um volume de controle delimitado pelas seções 1 e 2 conforme Figura 34, em regime permanente tem-se a relação de conservação de massa em termos de vazões volumétricas:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \quad (\text{C.1})$$

Segundo a Lei de Boyle-Mariotte, assumindo que o processo seja isotérmico e o ar um gás ideal:

$$P_1 J_1 = P_2 J_2 \quad (\text{C.2})$$

Assim, é válido corrigir a velocidade superficial do gás na seção de teste em função das pressões como:

$$J_2 = \frac{P_1}{P_2} J_1 \quad (\text{C.2})$$

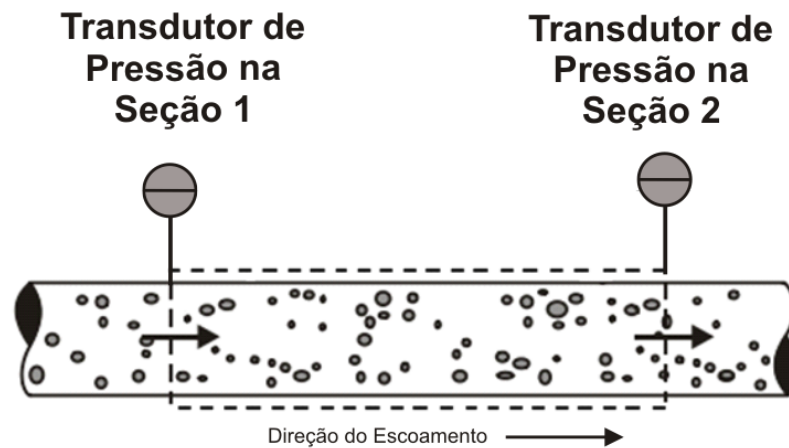


Figura 34 – Volume de controle na seção do duto

APÊNDICE D – HISTOGRAMAS DOS ENSAIOS

Os histogramas mostrados na Tabela 8 à Tabela 37, foram elaborados a partir do processamento dos dados pelo *software*. Nestes histogramas são representados a totalidade dos dados encontrados antes da eliminação de bolhas discutida na seção 3.4.

A lista abaixo mostra a sequência da disposição dos histogramas.

Tabela 8 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 1 Bar	68
Tabela 9 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 2 Bar	69
Tabela 10 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 3 Bar	70
Tabela 11 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 4 Bar	71
Tabela 12 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 5 Bar	72
Tabela 13 - Histograma de Frequência para pressão de 1 Bar	73
Tabela 14 - Histograma de Frequência para pressão de 2 Bar	74
Tabela 15 - Histograma de Frequência para pressão de 3 Bar	75
Tabela 16 - Histograma de Frequência para pressão de 4 Bar	76
Tabela 17 - Histograma de Frequência para pressão de 5 Bar	77
Tabela 18 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 1 Bar	78
Tabela 19 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 2 Bar	79
Tabela 20 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 3 Bar	80
Tabela 21 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 4 Bar	81
Tabela 22 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 5 Bar	82
Tabela 23 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 1 Bar	83
Tabela 24 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 2 Bar	84
Tabela 25 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 3 Bar	85
Tabela 26 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 4 Bar	86

Tabela 27 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 5 Bar	87
Tabela 28 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 1 Bar.....	88
Tabela 29 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 2 Bar.....	89
Tabela 30 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 3 Bar.....	90
Tabela 31 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 4 Bar.....	91
Tabela 32 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 5 Bar.....	92
Tabela 33 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 1 Bar.....	93
Tabela 34 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 2 Bar.....	94
Tabela 35 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 3 Bar.....	95
Tabela 36 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 4 Bar.....	96
Tabela 37 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 5 Bar.....	97

Tabela 8 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 1 Bar

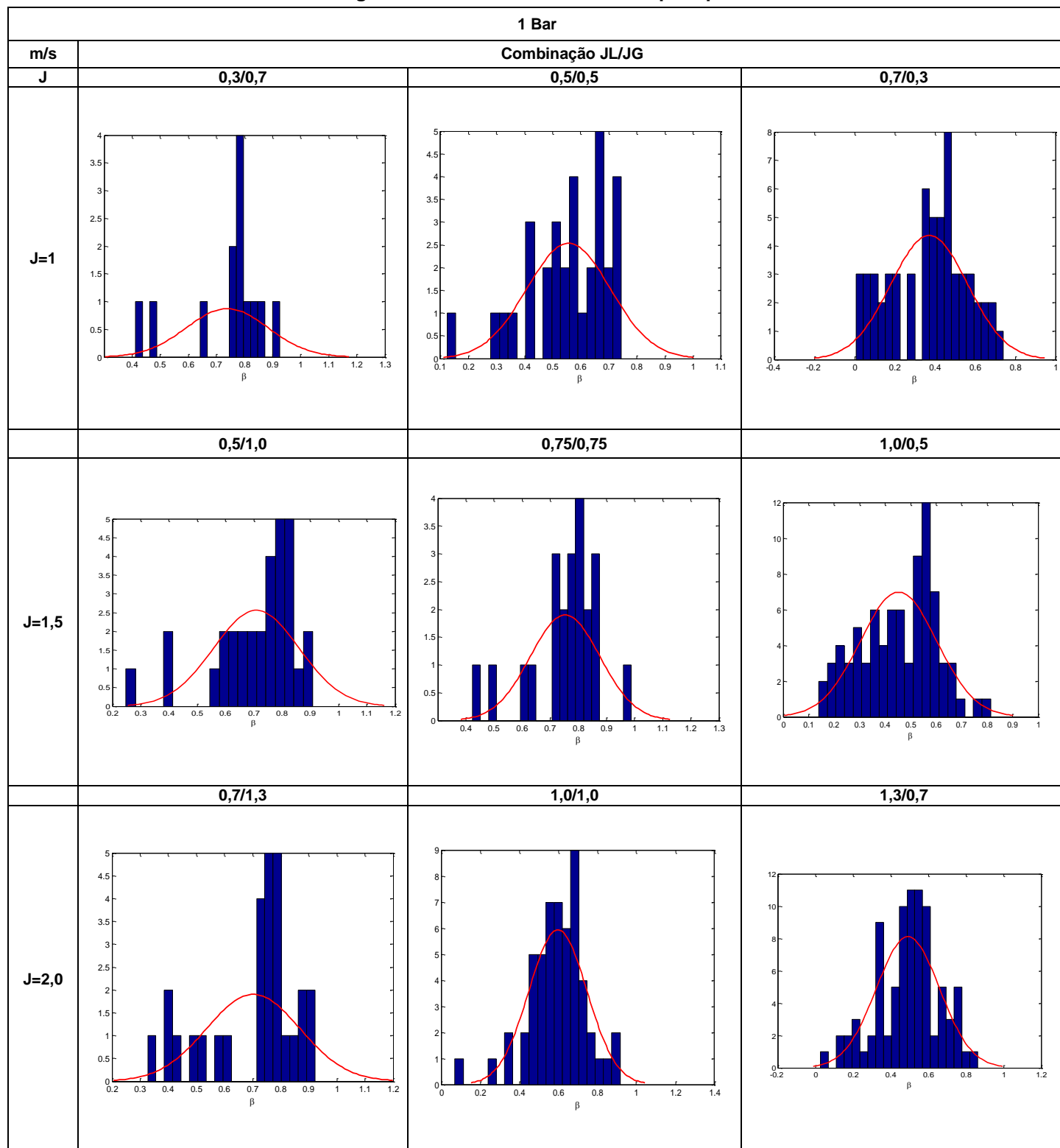


Tabela 9 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 2 Bar

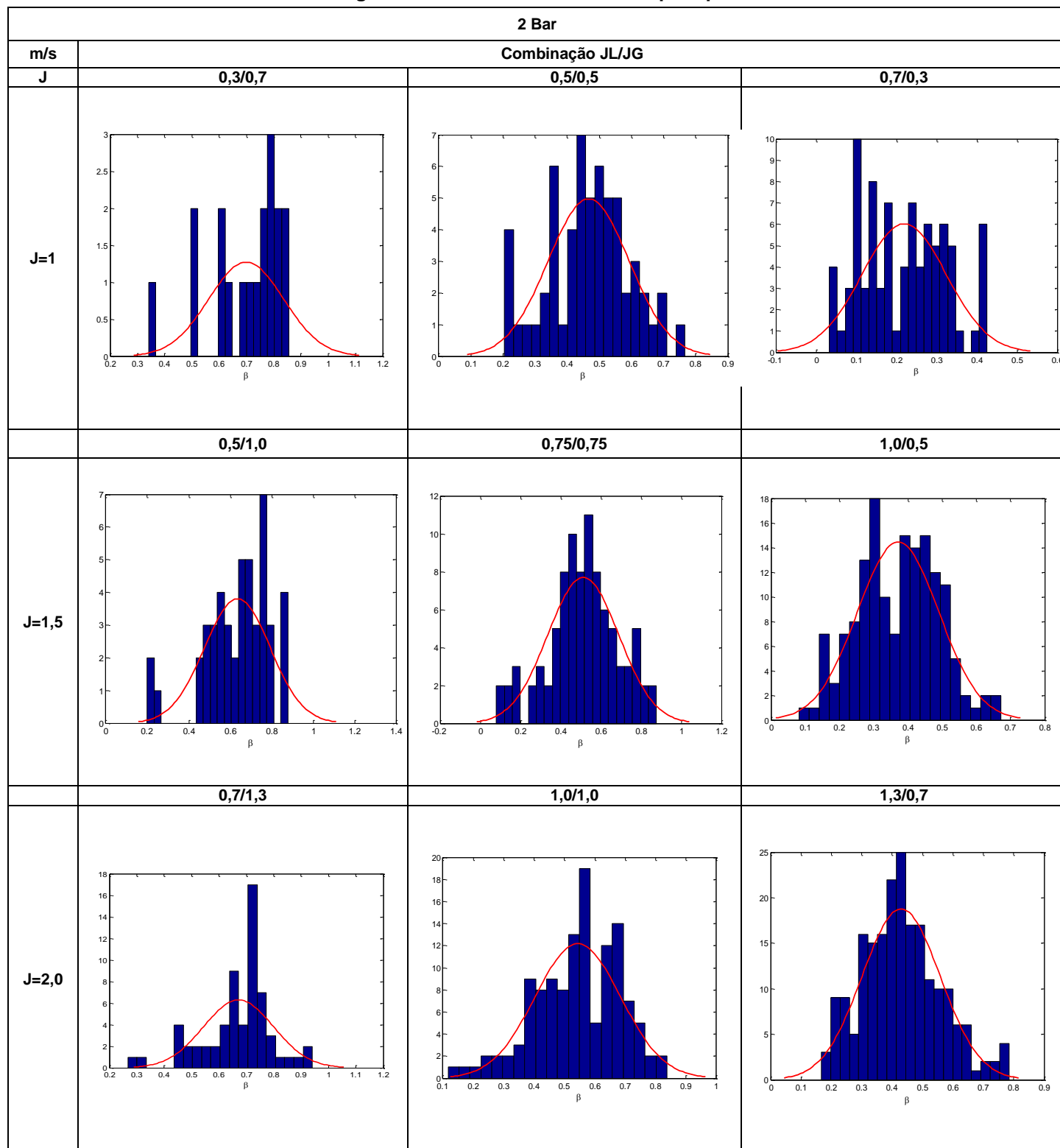


Tabela 10 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 3 Bar

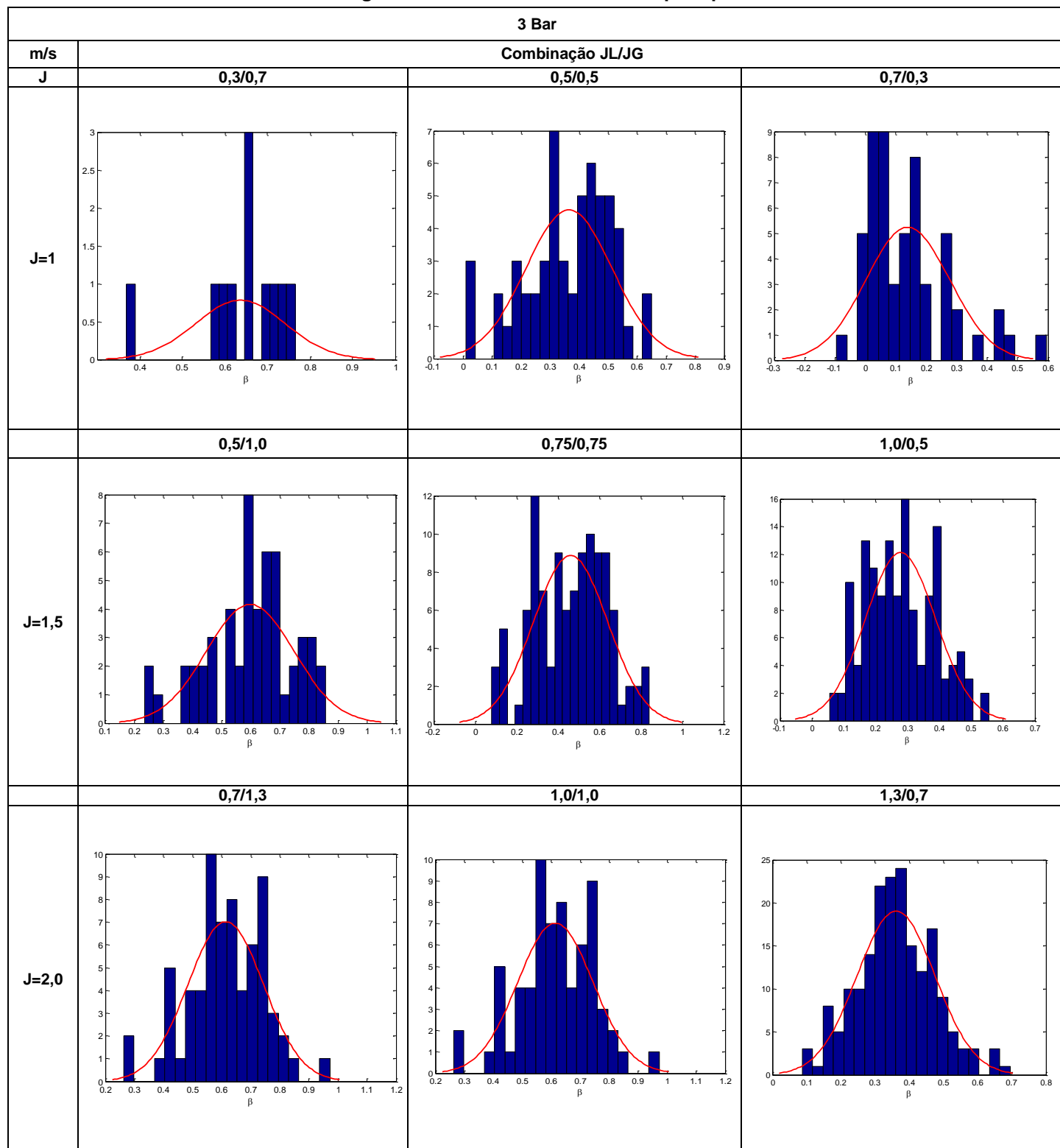


Tabela 11 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 4 Bar

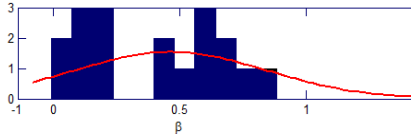
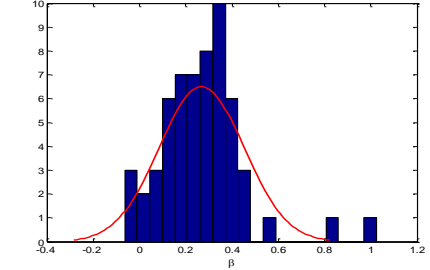
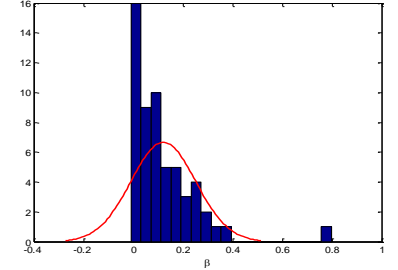
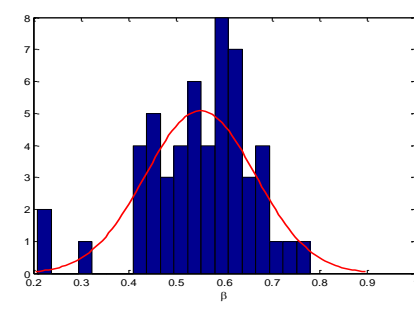
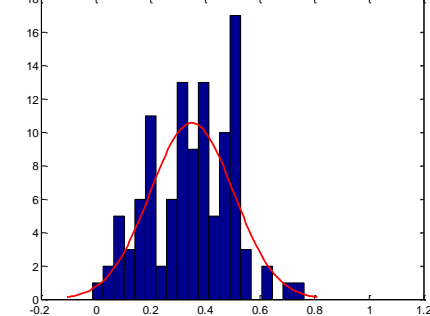
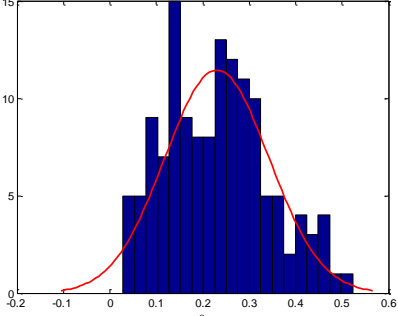
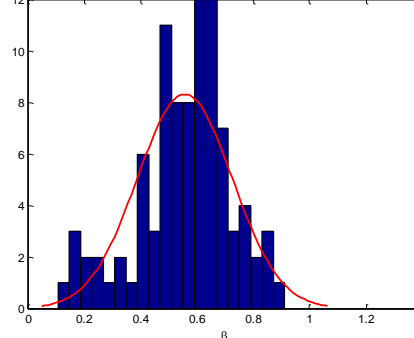
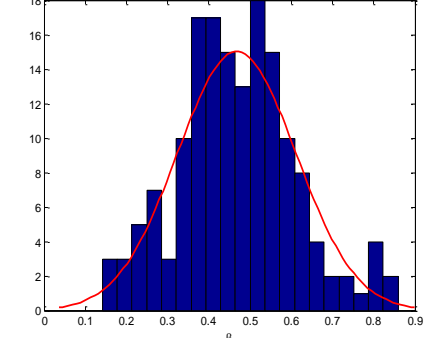
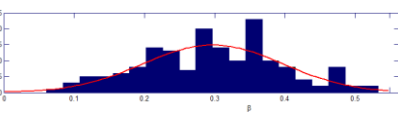
		4 Bar		
m/s	Combinação JL/JG			
J	0,3/0,7	0,5/0,5	0,7/0,3	
J=1				
	0,5/1,0	0,75/0,75	1,0/0,5	
J=1,5				
	0,7/1,3	1,0/1,0	1,3/0,7	
J=2,0				

Tabela 12 - Histograma de Fator de Intermitência para pressão de 5 Bar

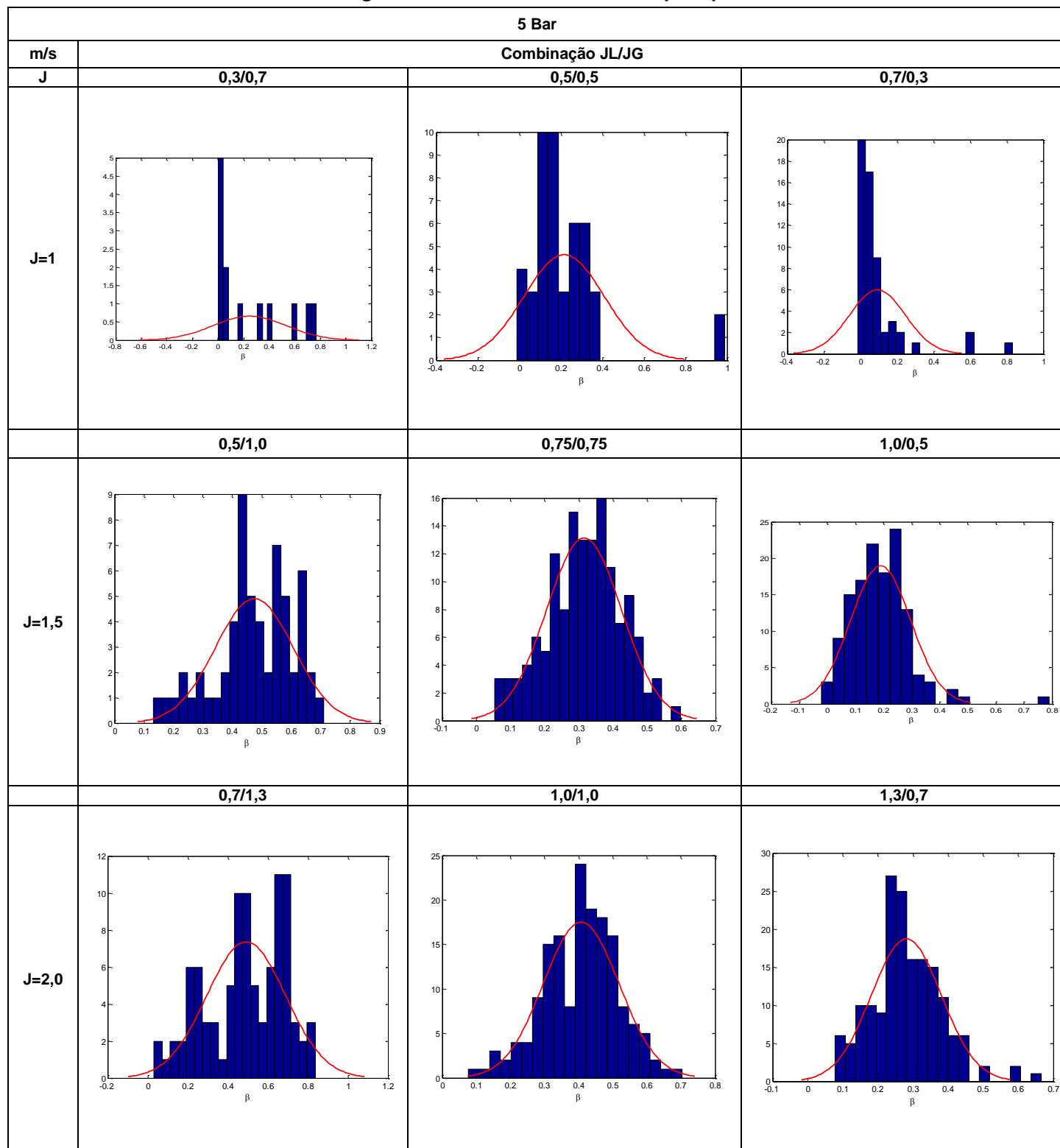


Tabela 13 - Histograma de Frequência para pressão de 1 Bar

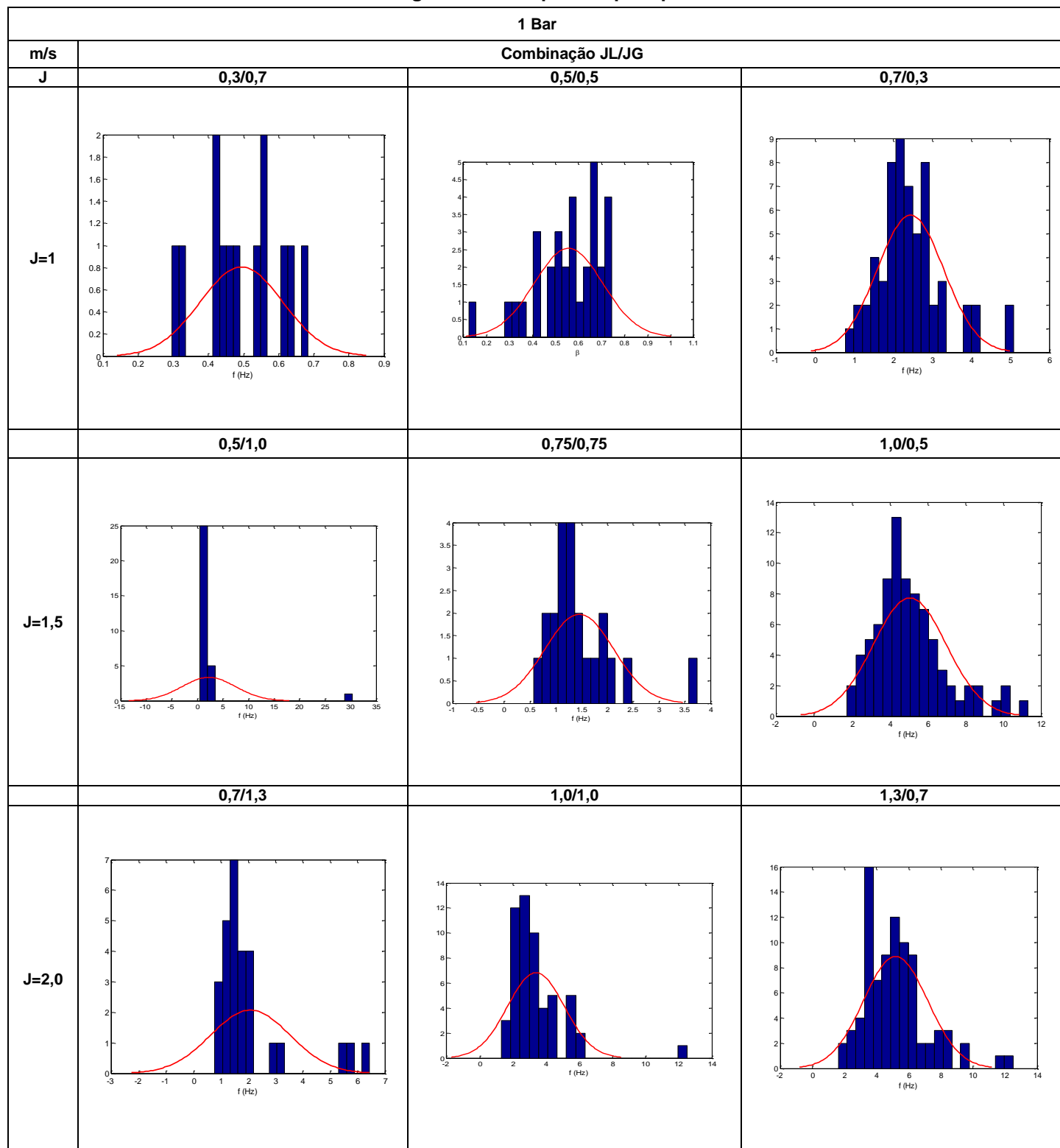


Tabela 14 - Histograma de Frequência para pressão de 2 Bar

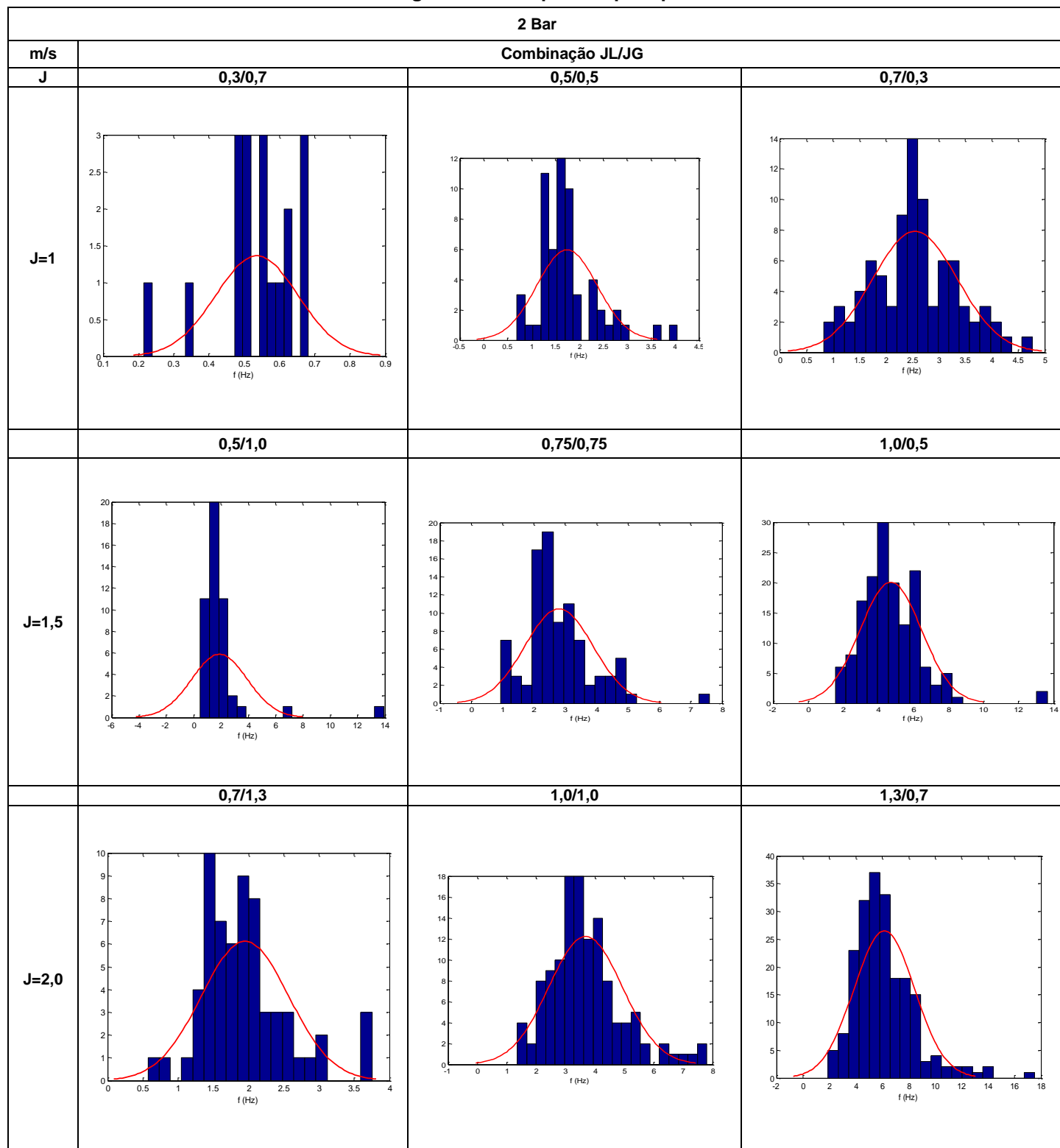


Tabela 15 - Histograma de Frequência para pressão de 3 Bar

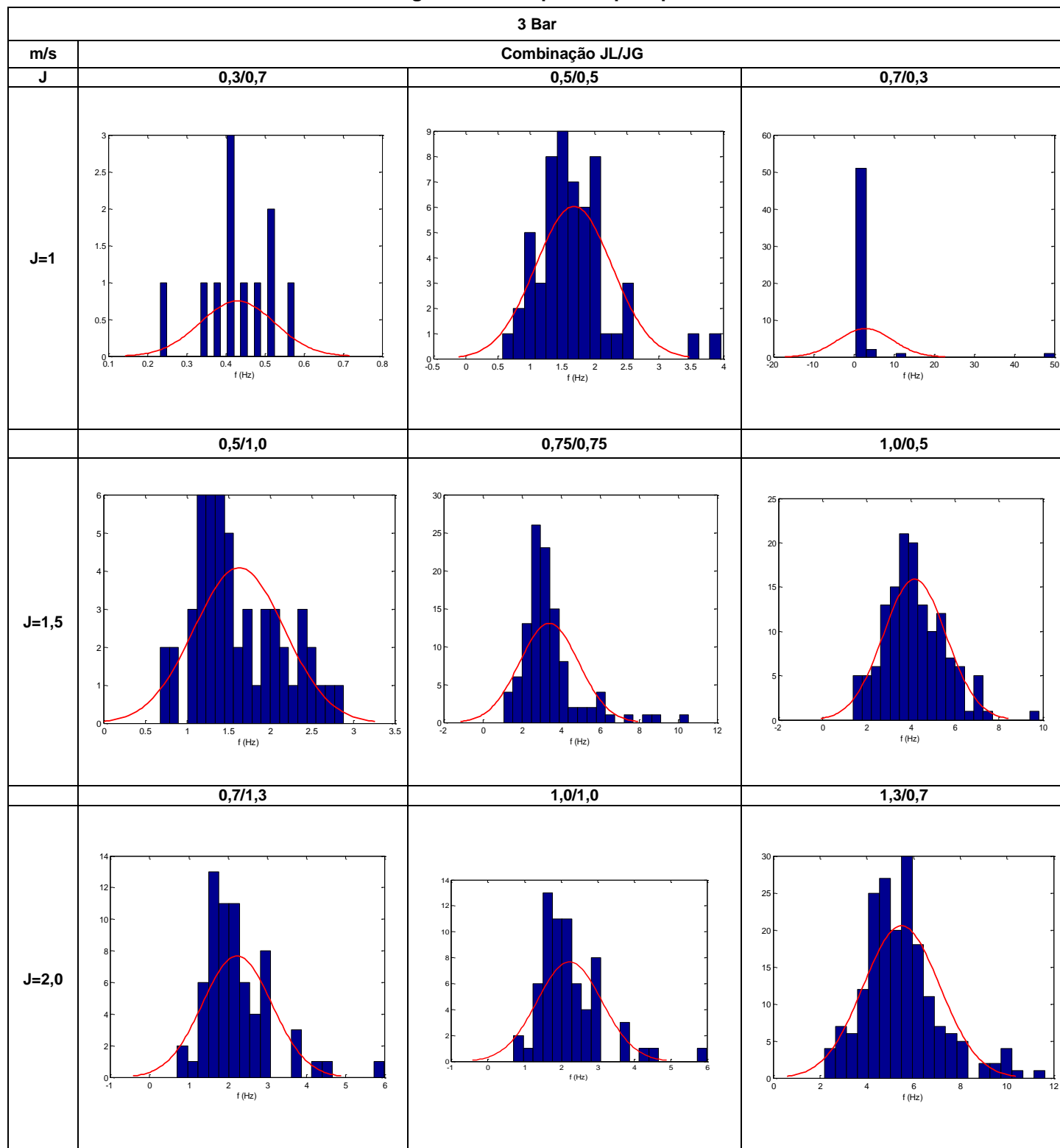


Tabela 16 - Histograma de Frequência para pressão de 4 Bar

		4 Bar		
m/s	Combinação JL/JG			
J	0,3/0,7	0,5/0,5	0,7/0,3	
J=1				
J=1,5				
J=2,0				

Tabela 17 - Histograma de Frequência para pressão de 5 Bar

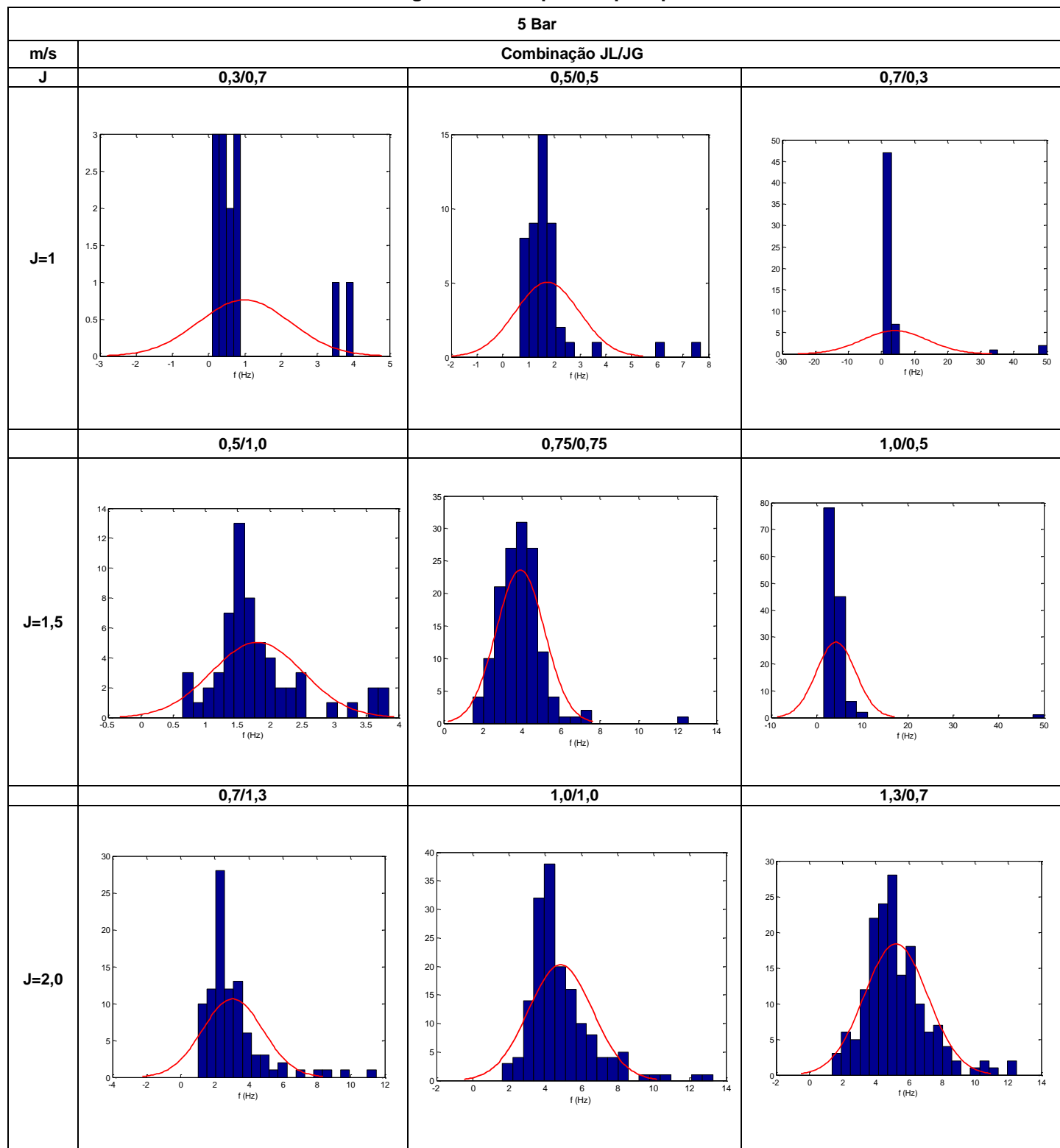


Tabela 18 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 1 Bar

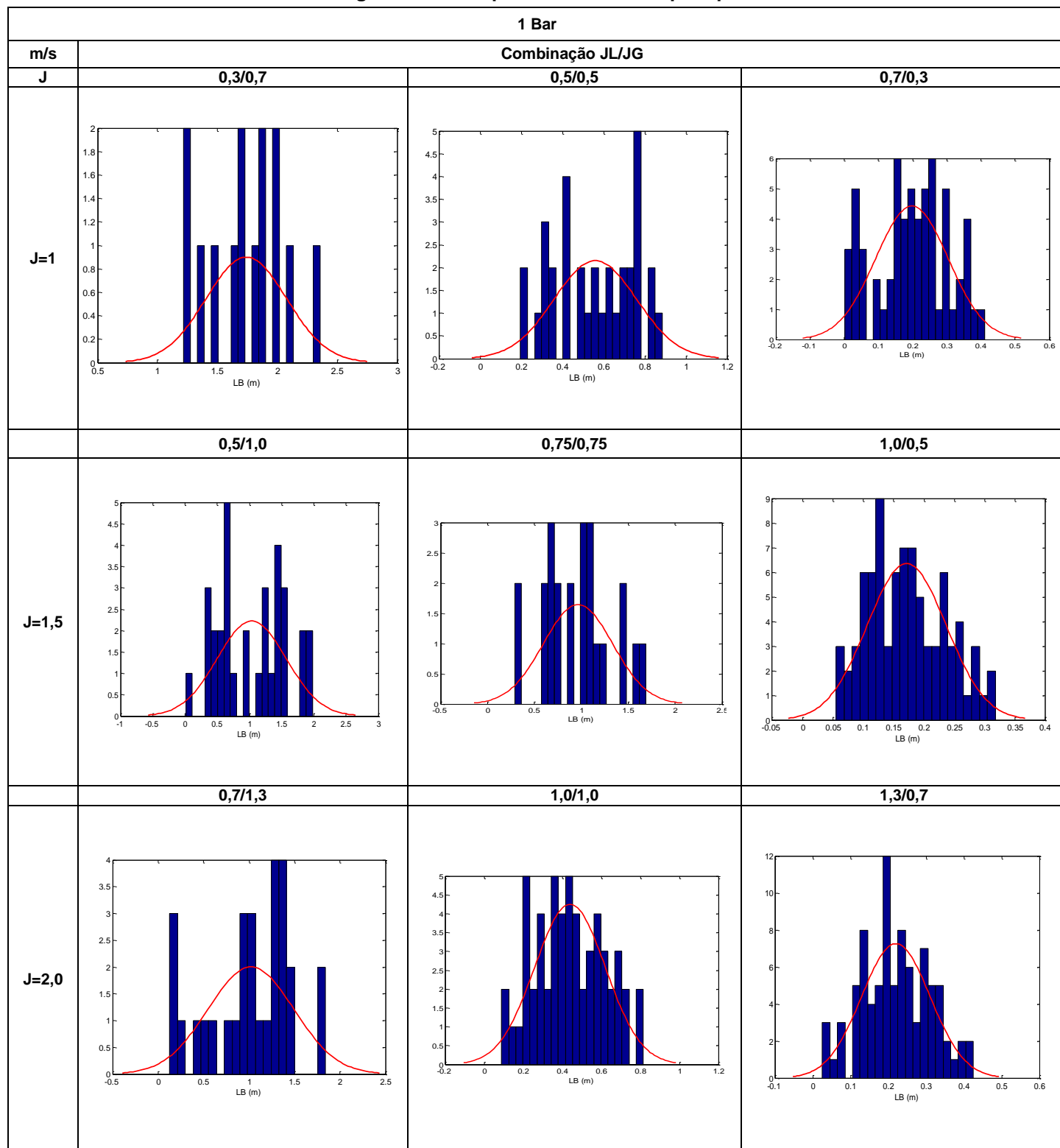


Tabela 19 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 2 Bar

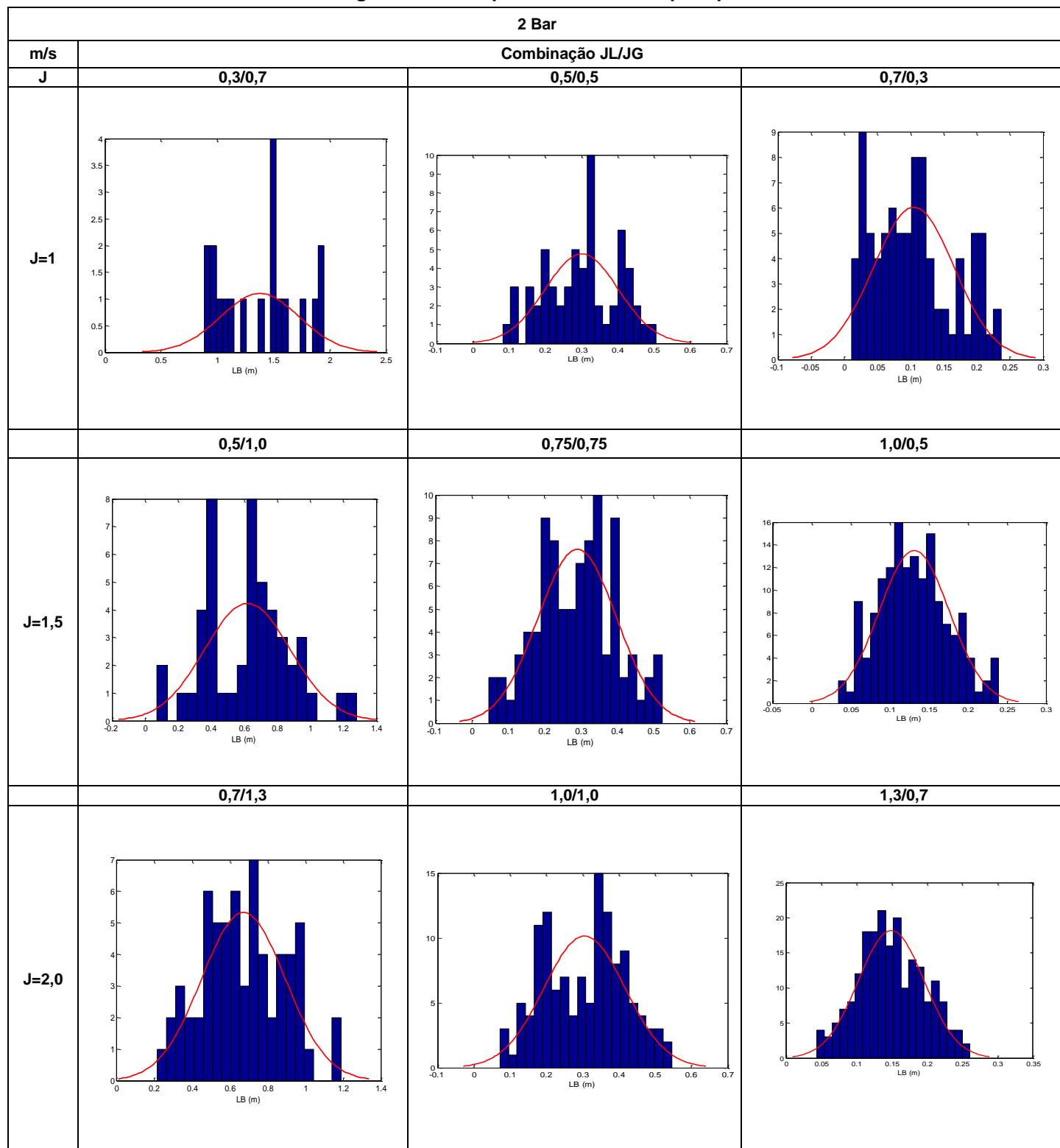


Tabela 20 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 3 Bar

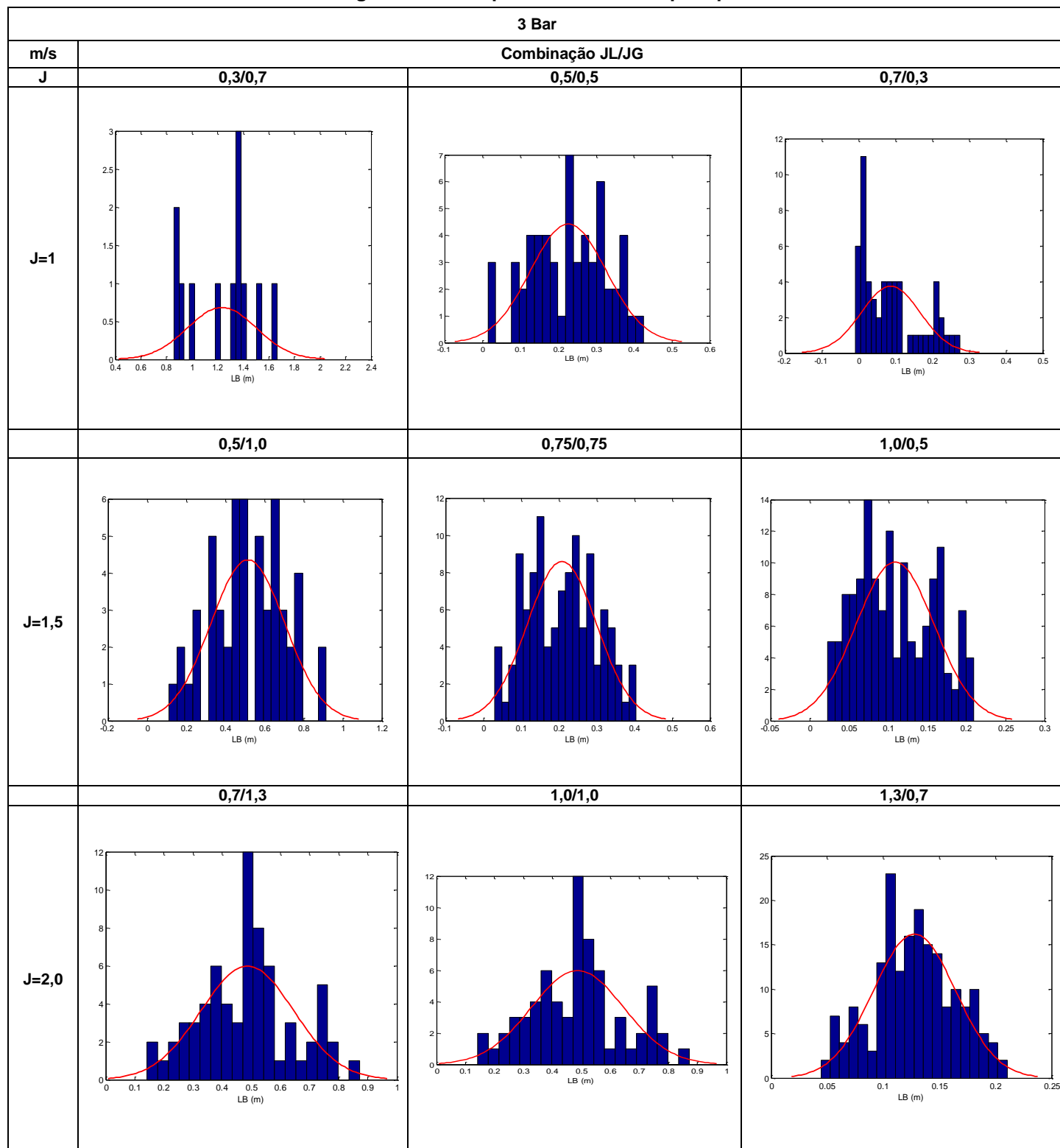


Tabela 21 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 4 Bar

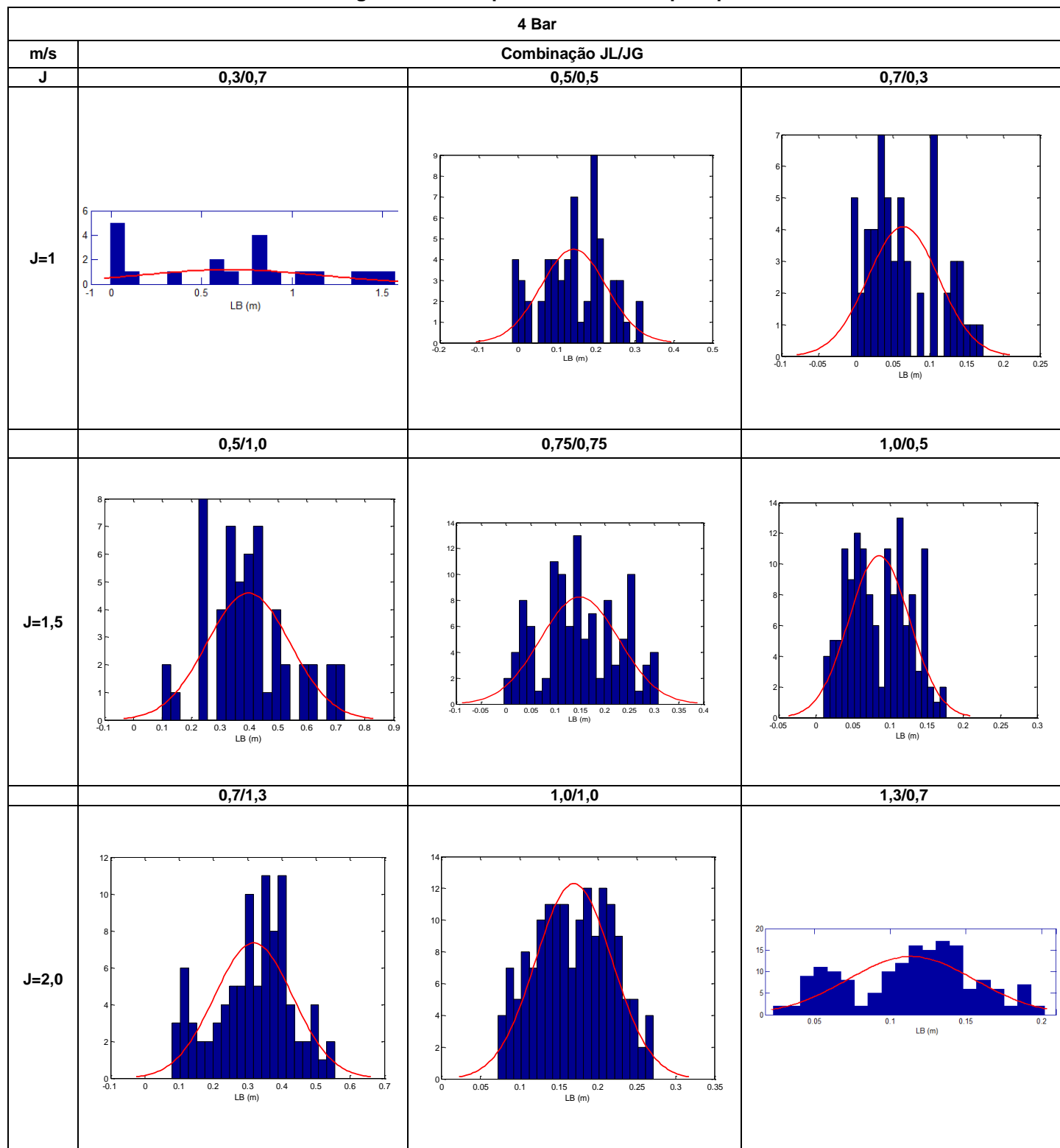


Tabela 22 - Histograma de Comprimento de Bolha para pressão de 5 Bar

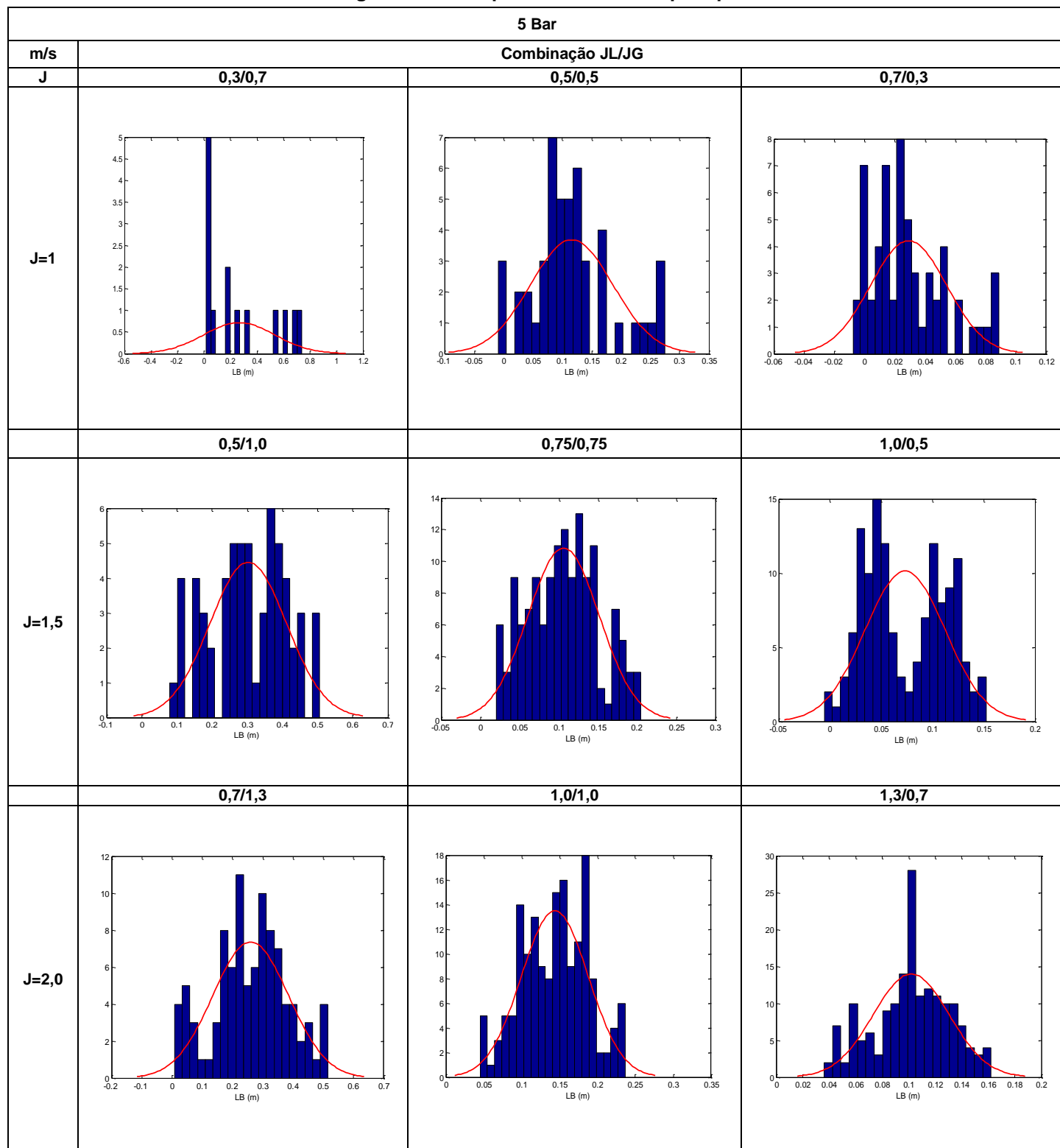


Tabela 23 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 1 Bar

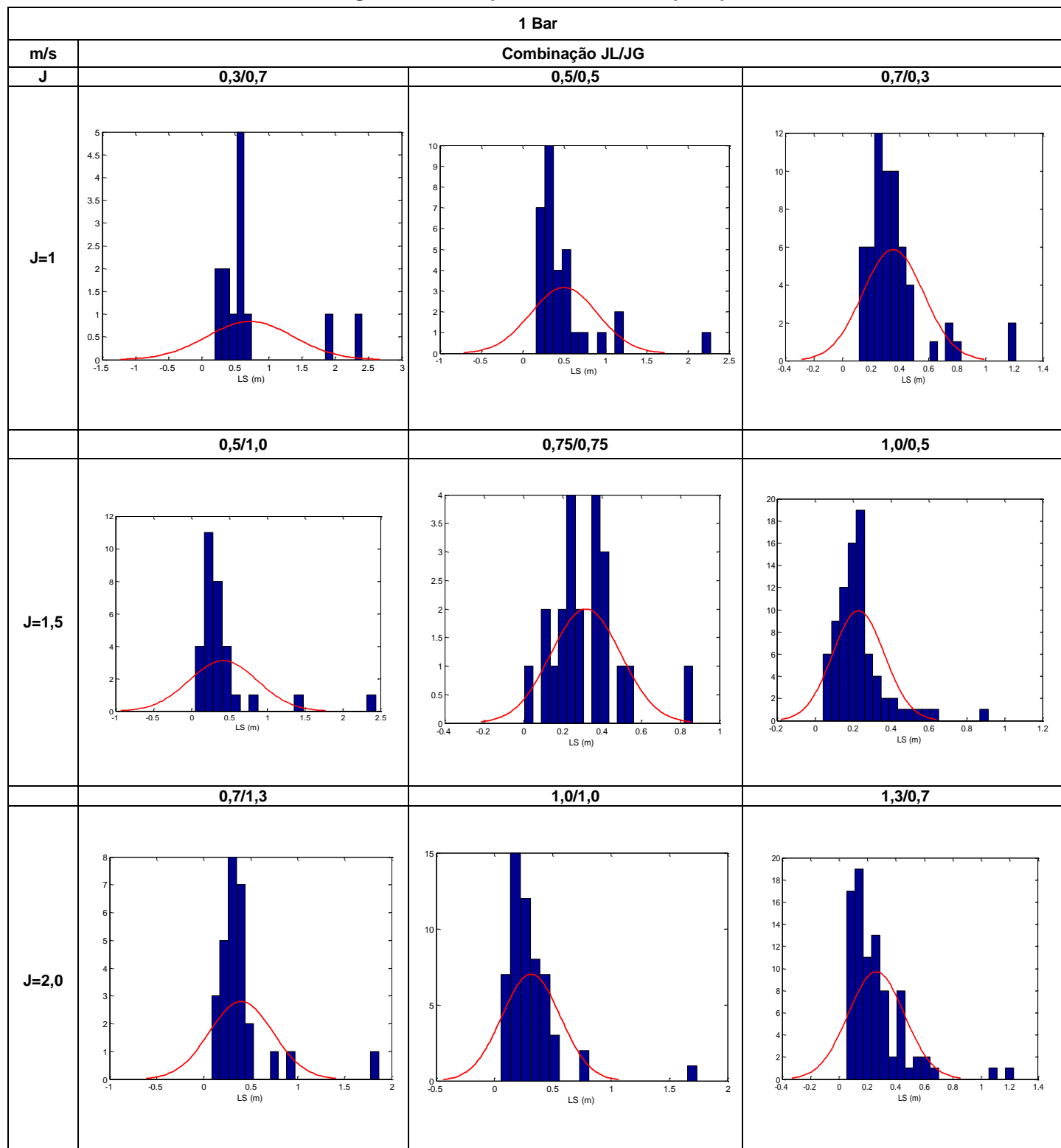


Tabela 24 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 2 Bar

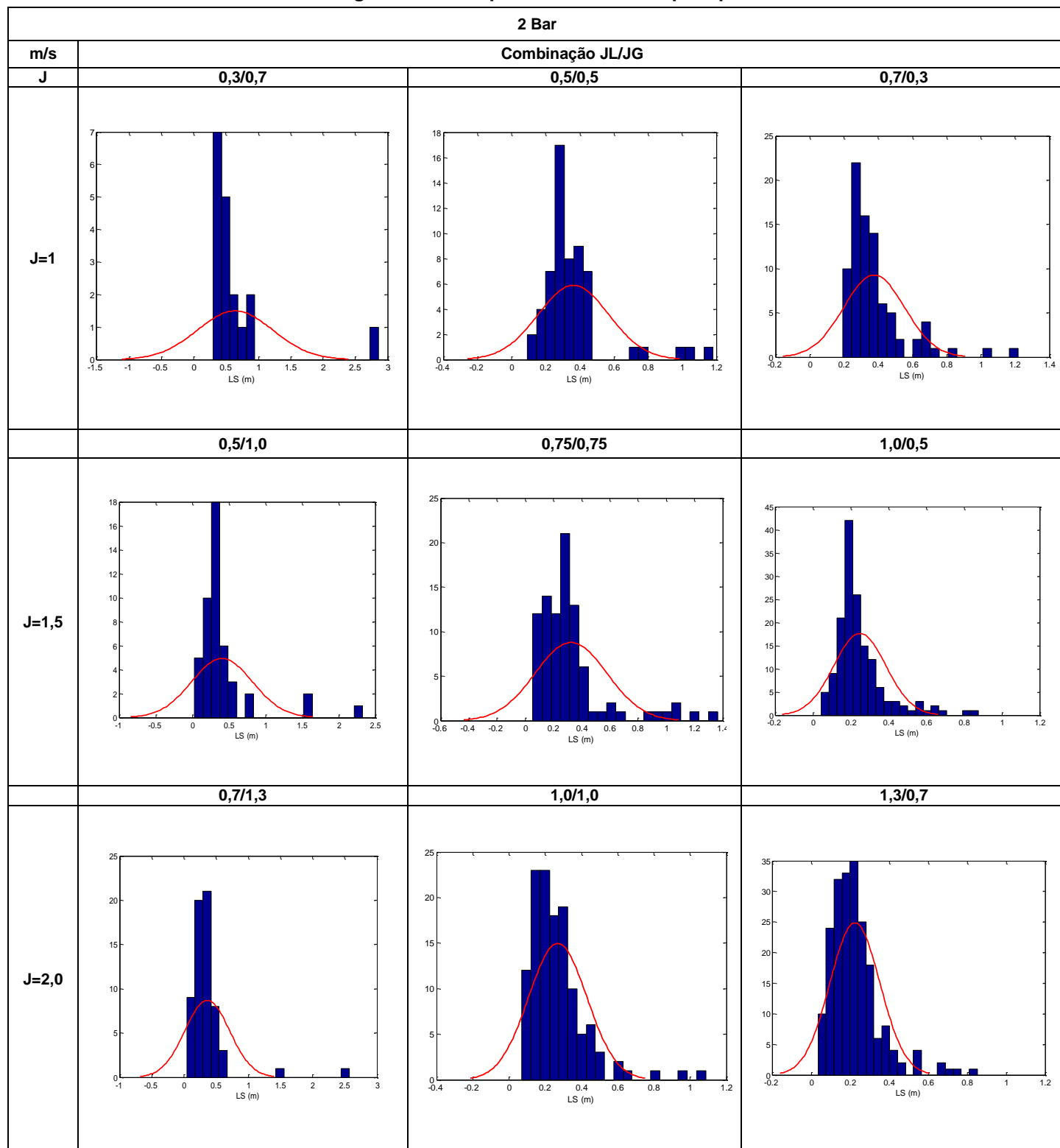


Tabela 25 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 3 Bar

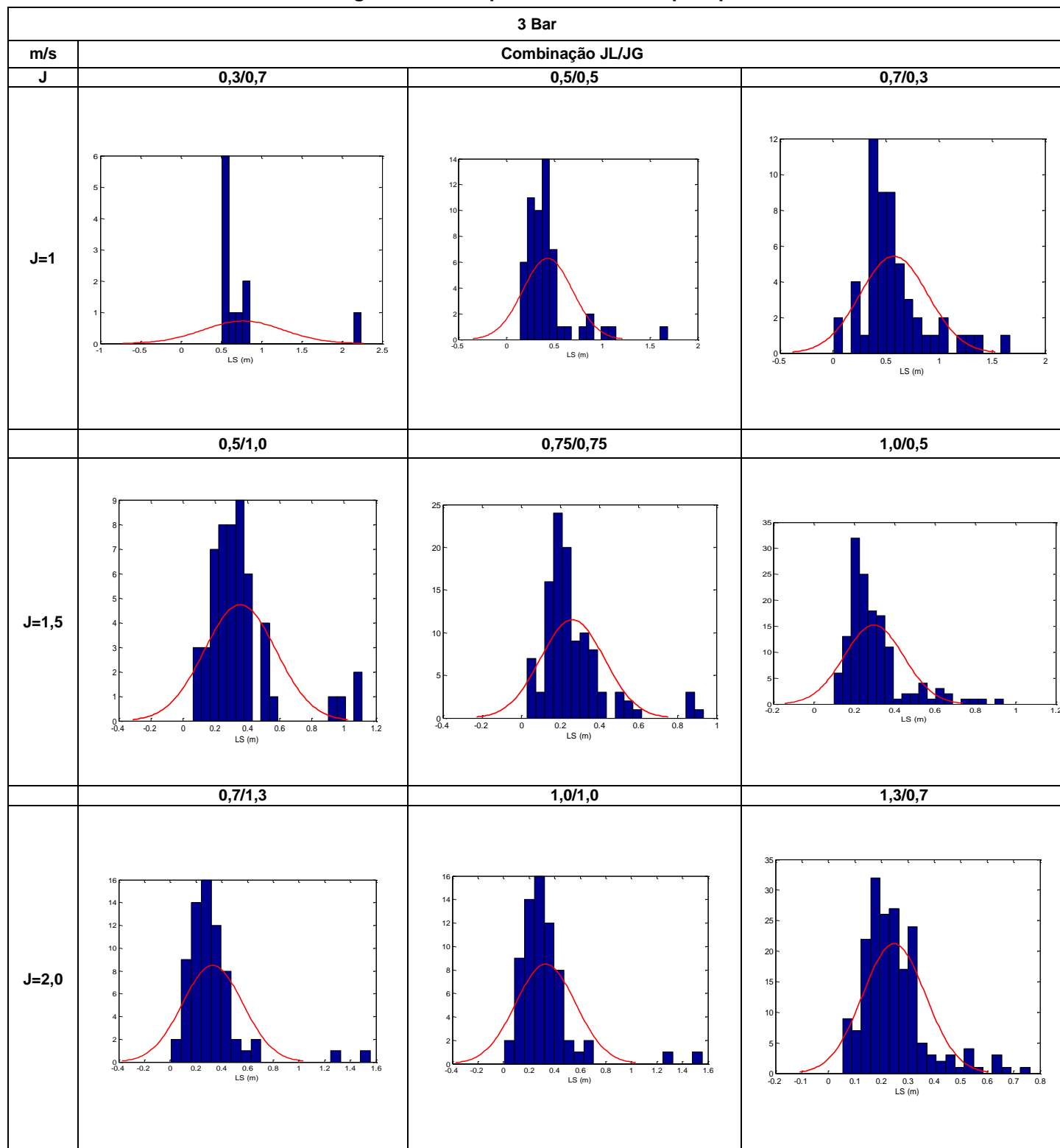


Tabela 26 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 4 Bar

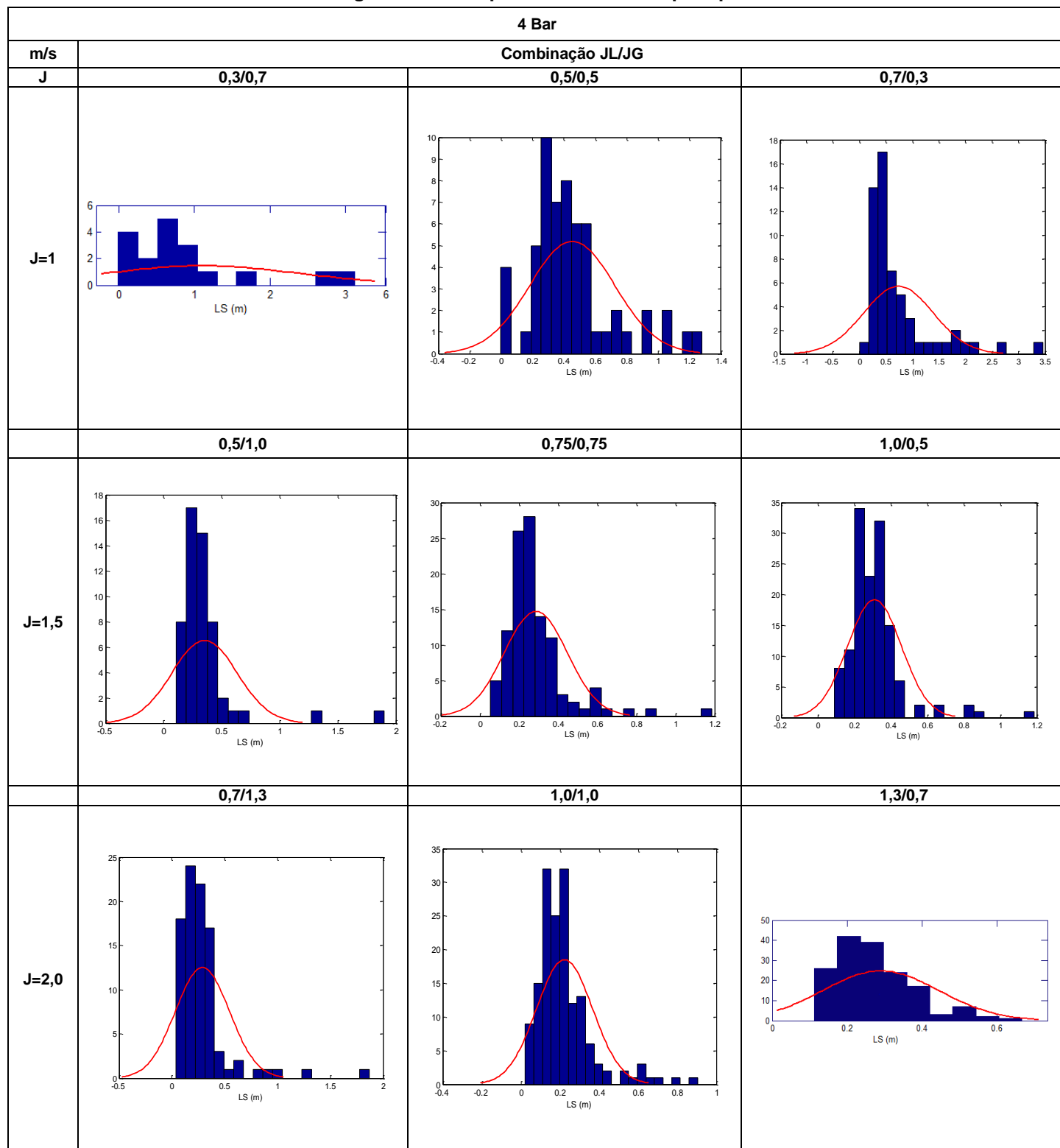


Tabela 27 - Histograma de Comprimento de Pistão para pressão de 5 Bar

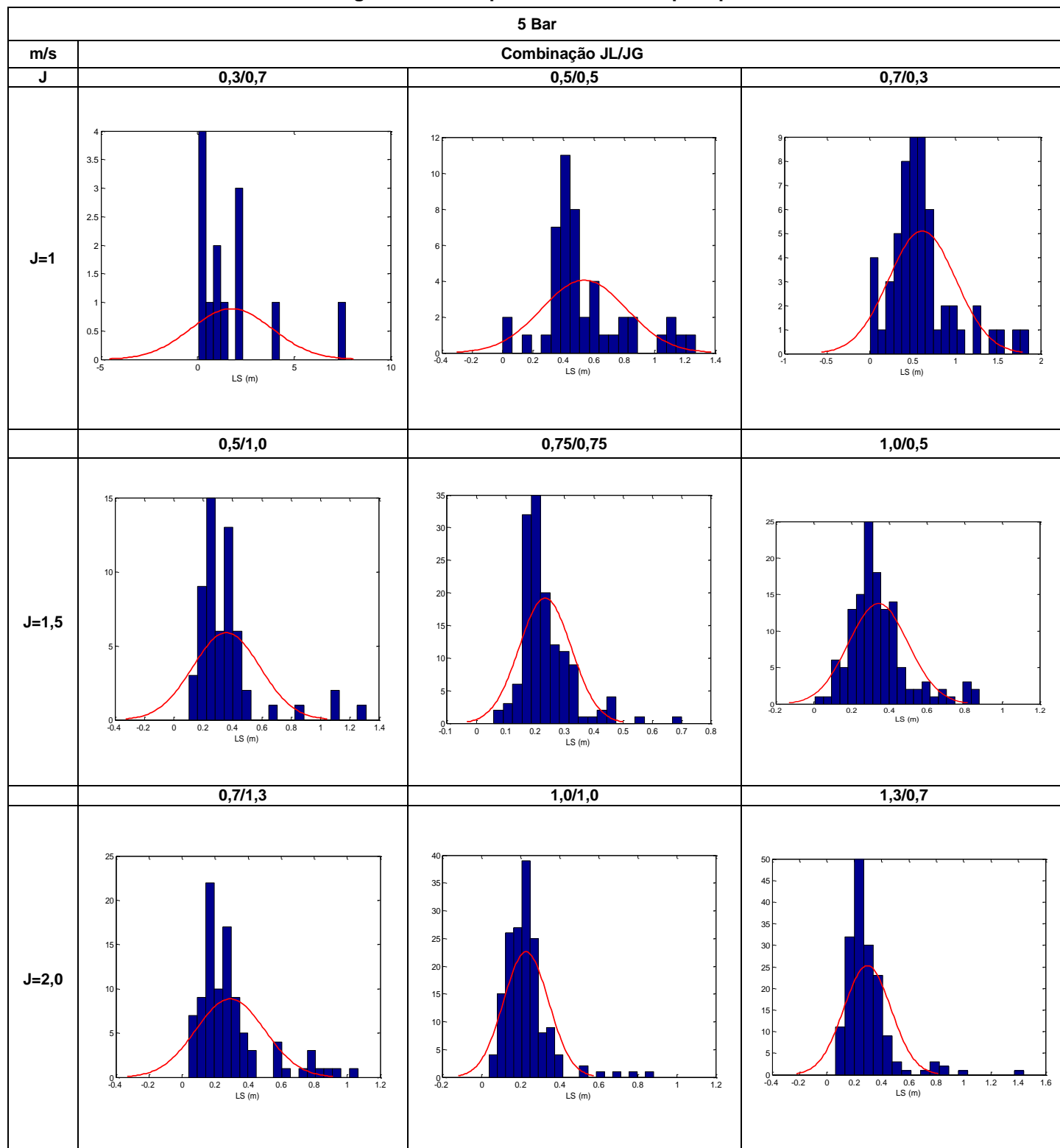


Tabela 28 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 1 Bar

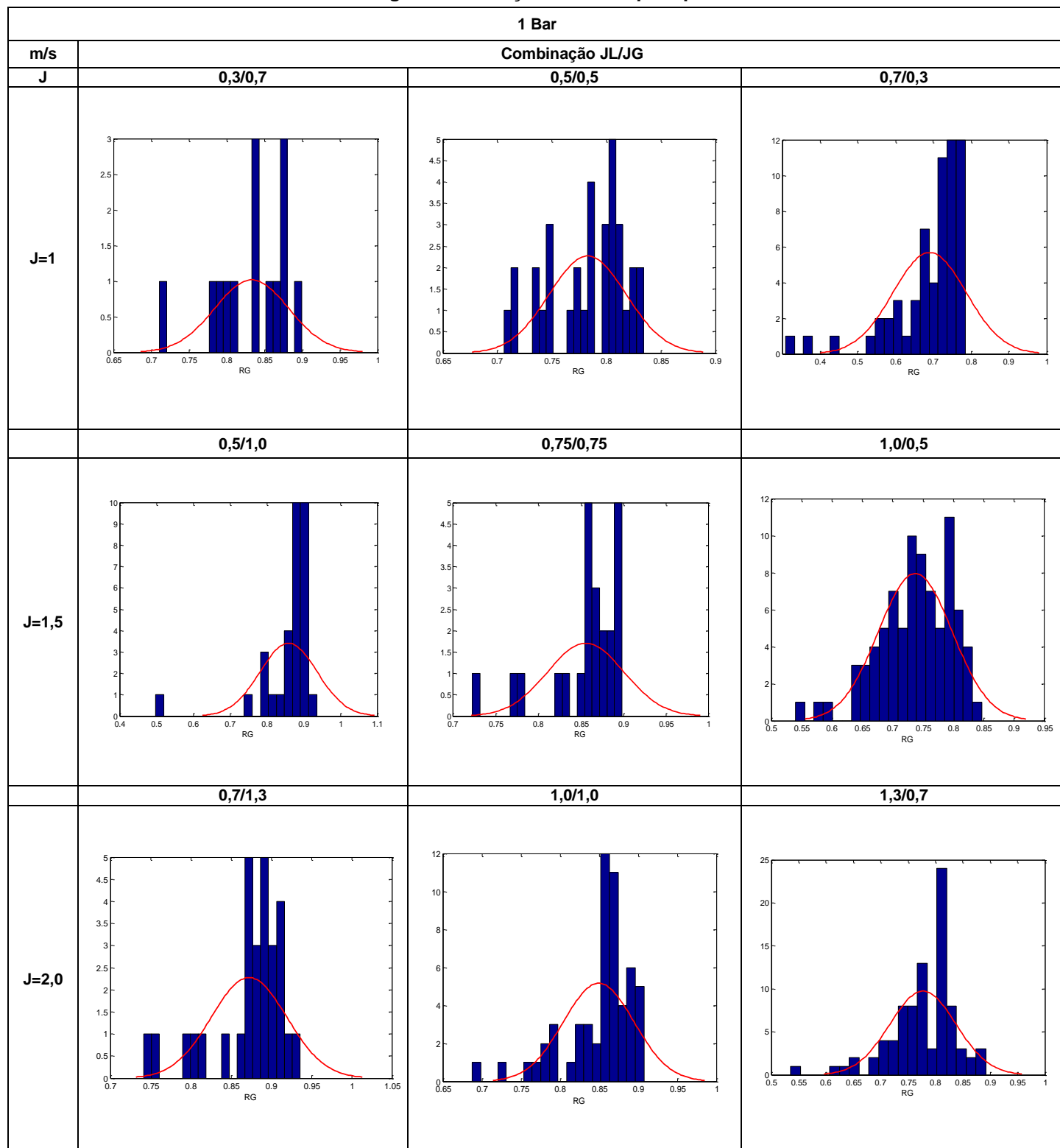


Tabela 29 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 2 Bar

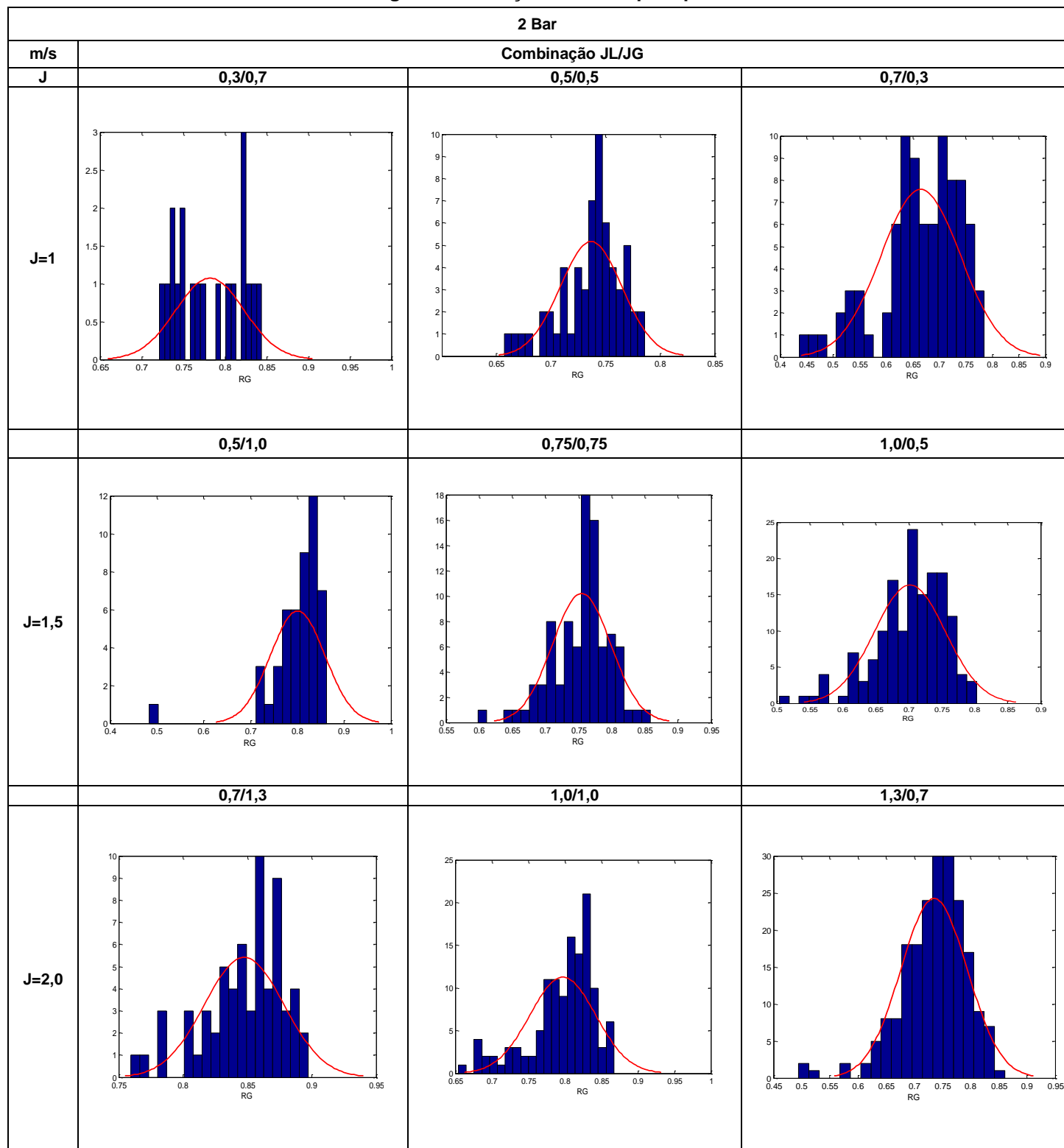


Tabela 30 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 3 Bar

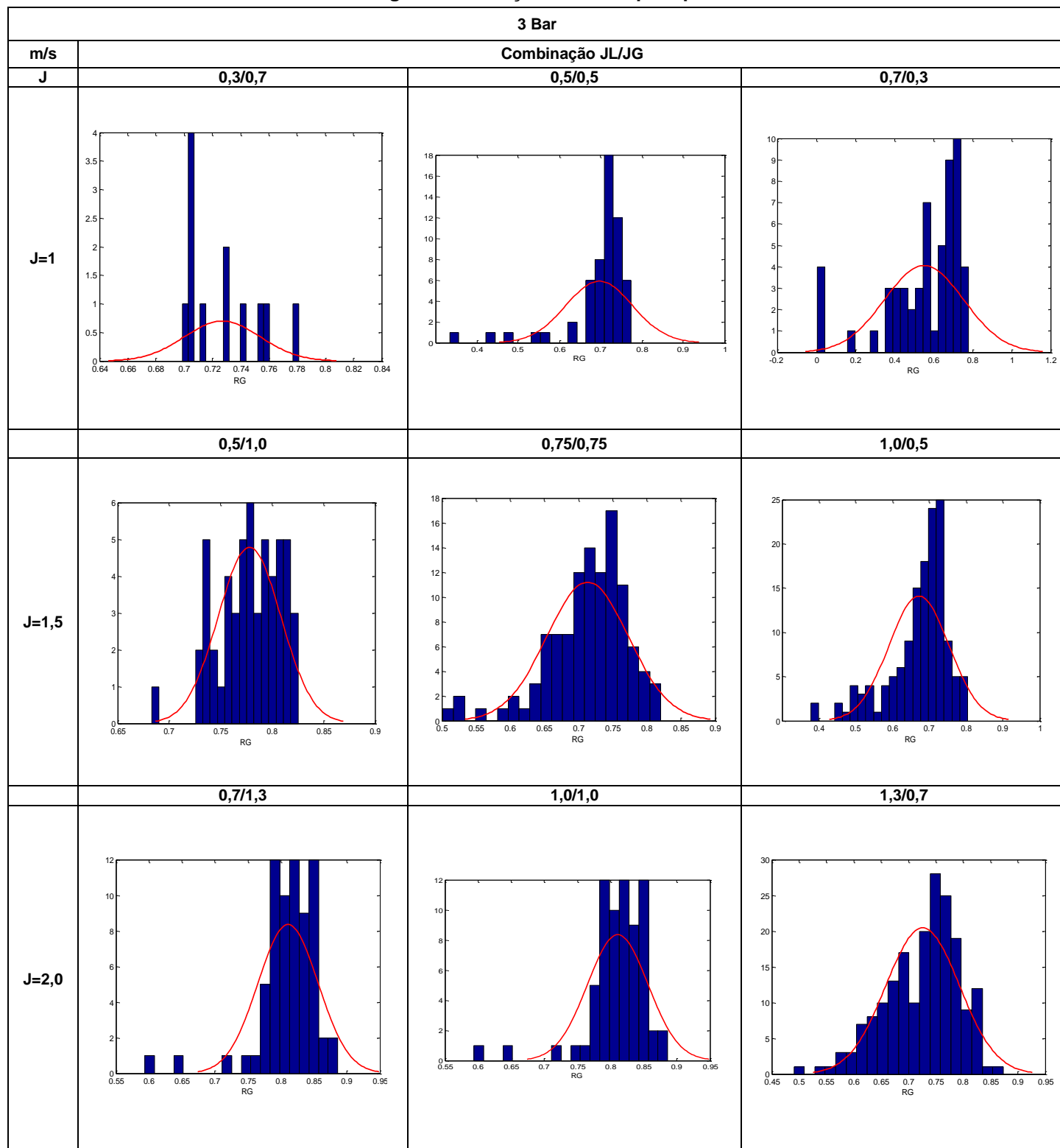


Tabela 31 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 4 Bar

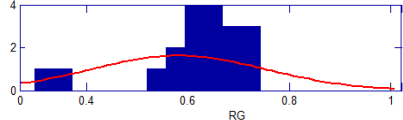
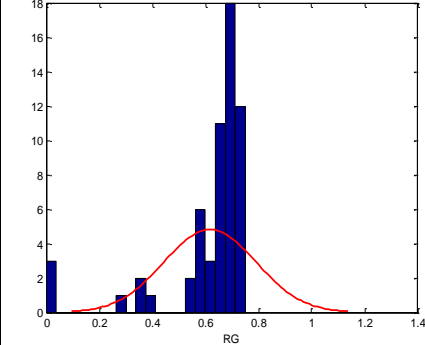
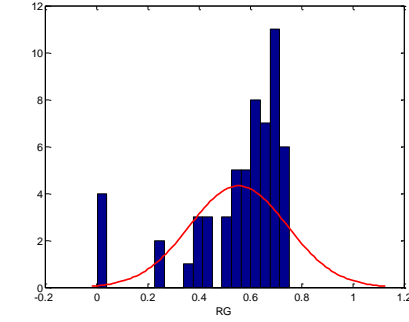
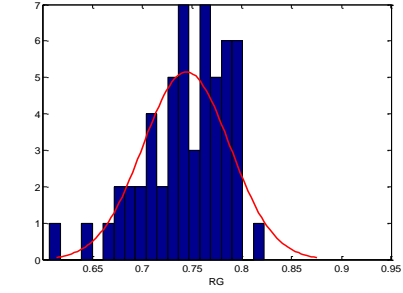
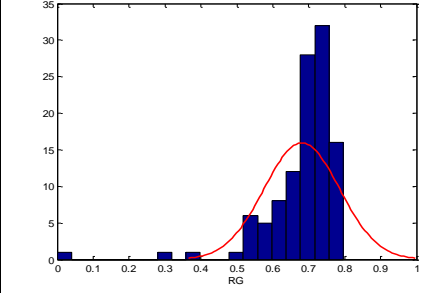
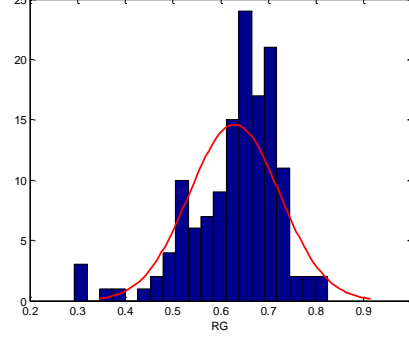
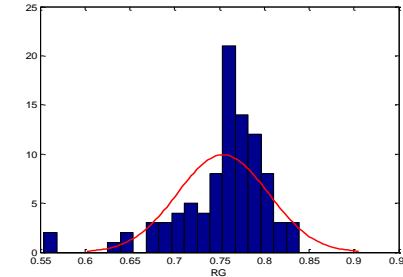
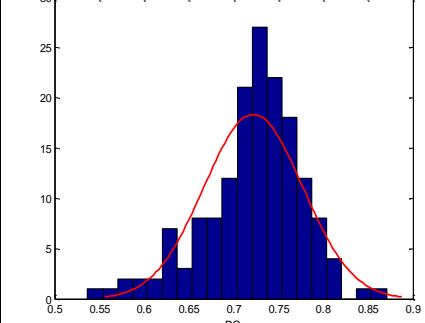
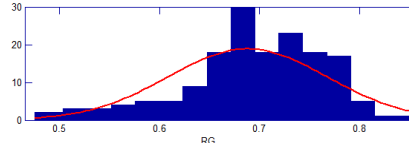
4 Bar			
m/s	Combinação JL/JG		
J	0,3/0,7	0,5/0,5	0,7/0,3
J=1			
J=1,5			
J=2,0			

Tabela 32 - Histograma de Fração de Vazio para pressão de 5 Bar

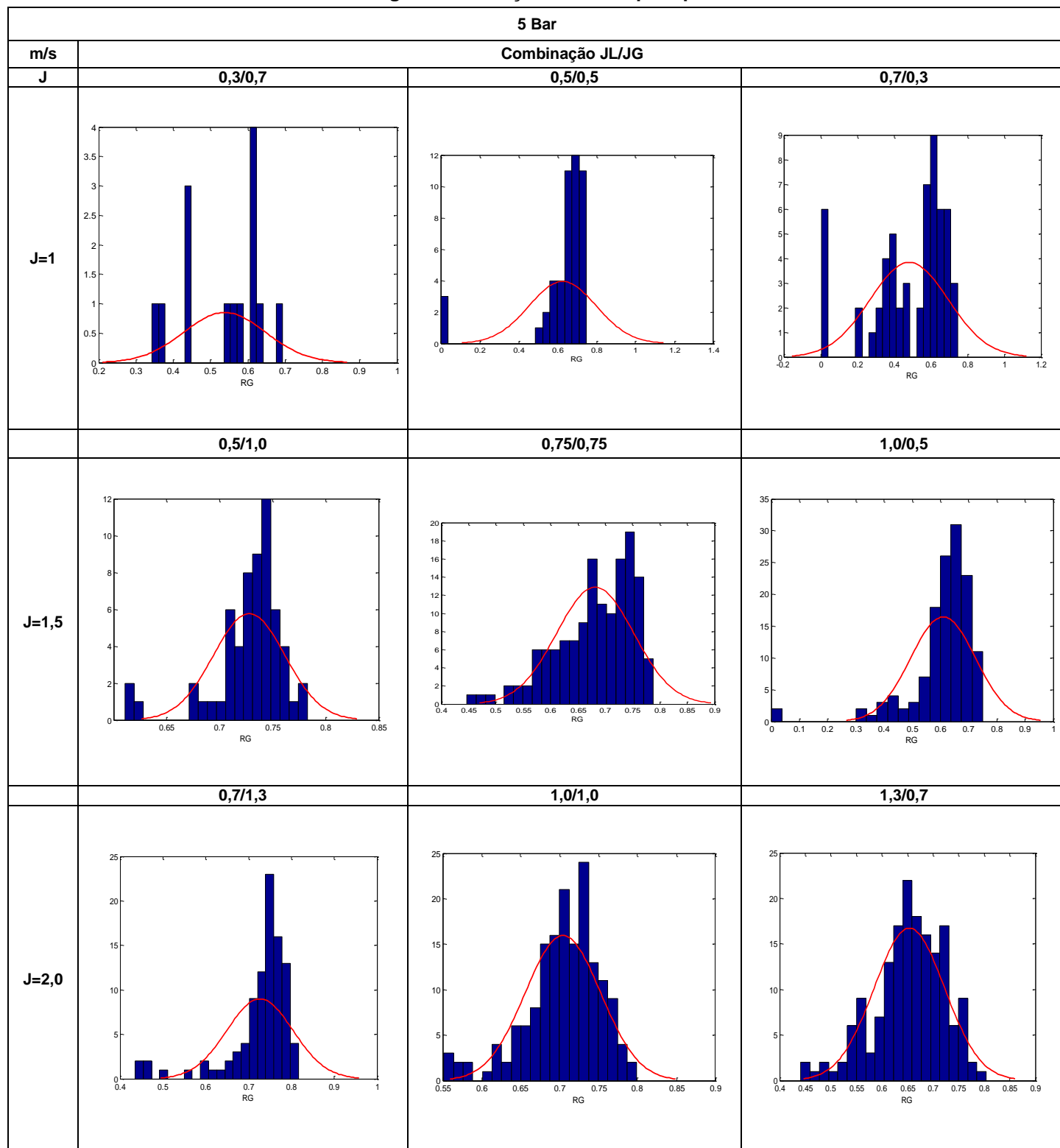


Tabela 33 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 1 Bar

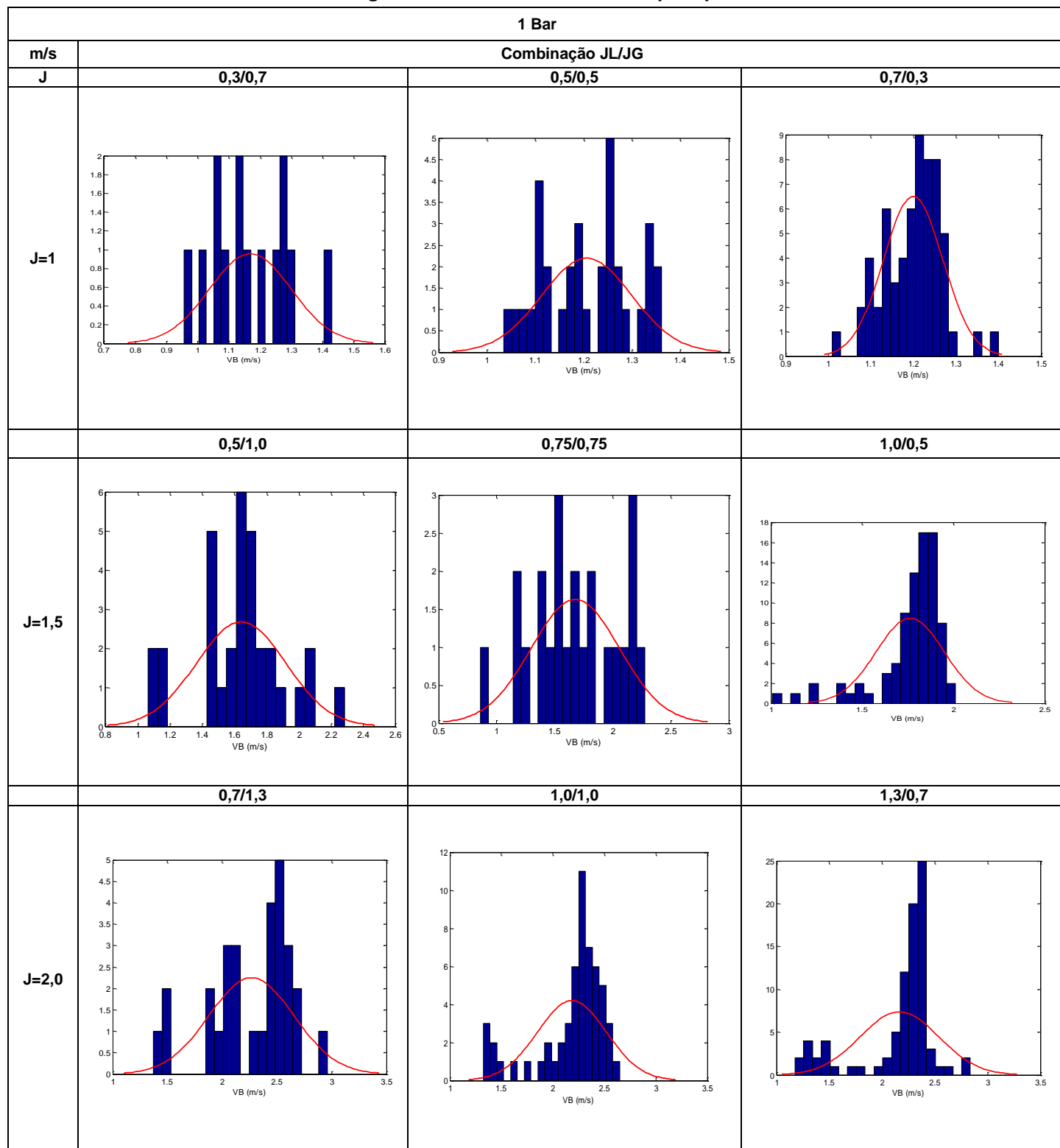


Tabela 34 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 2 Bar

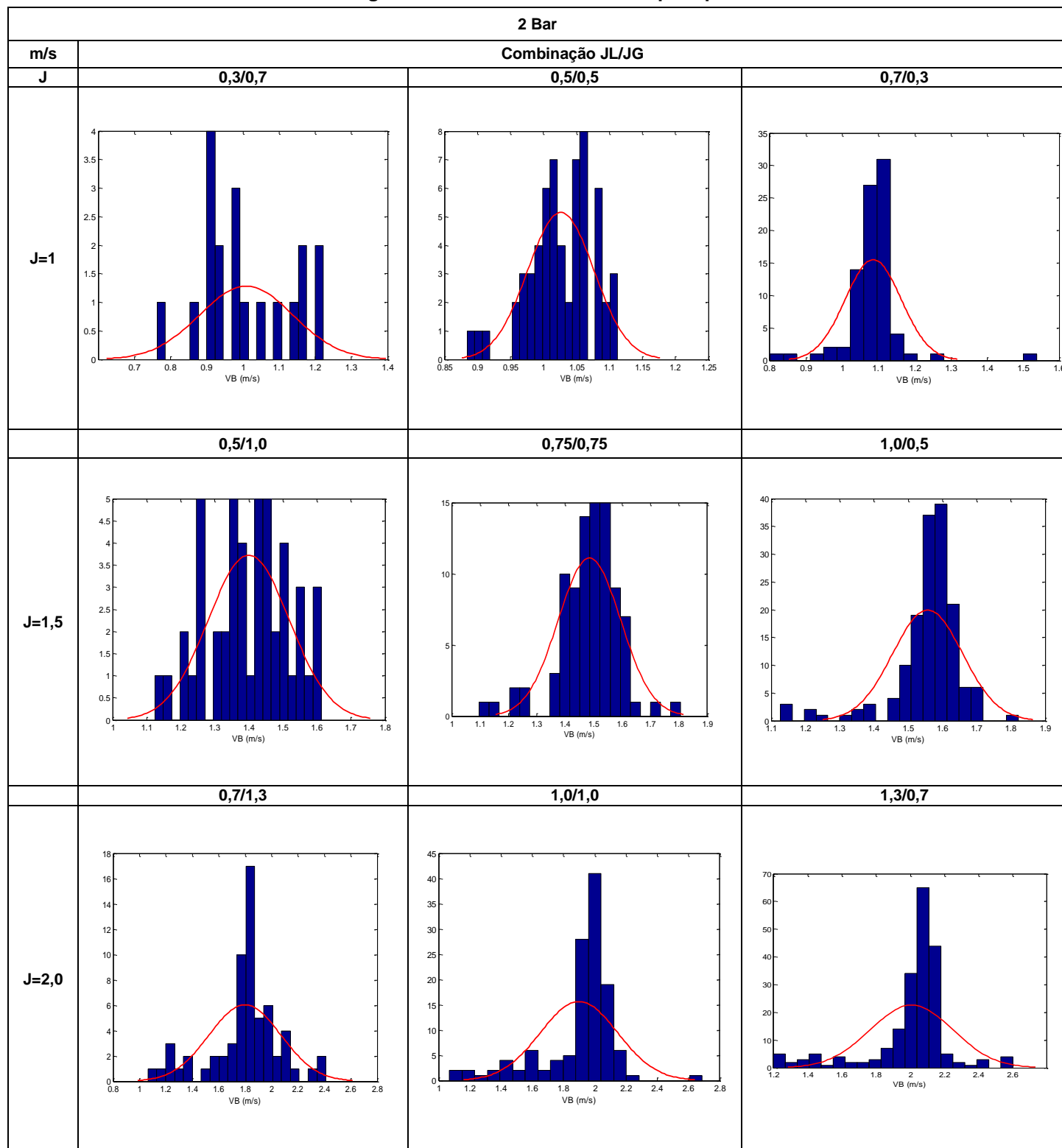


Tabela 35 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 3 Bar

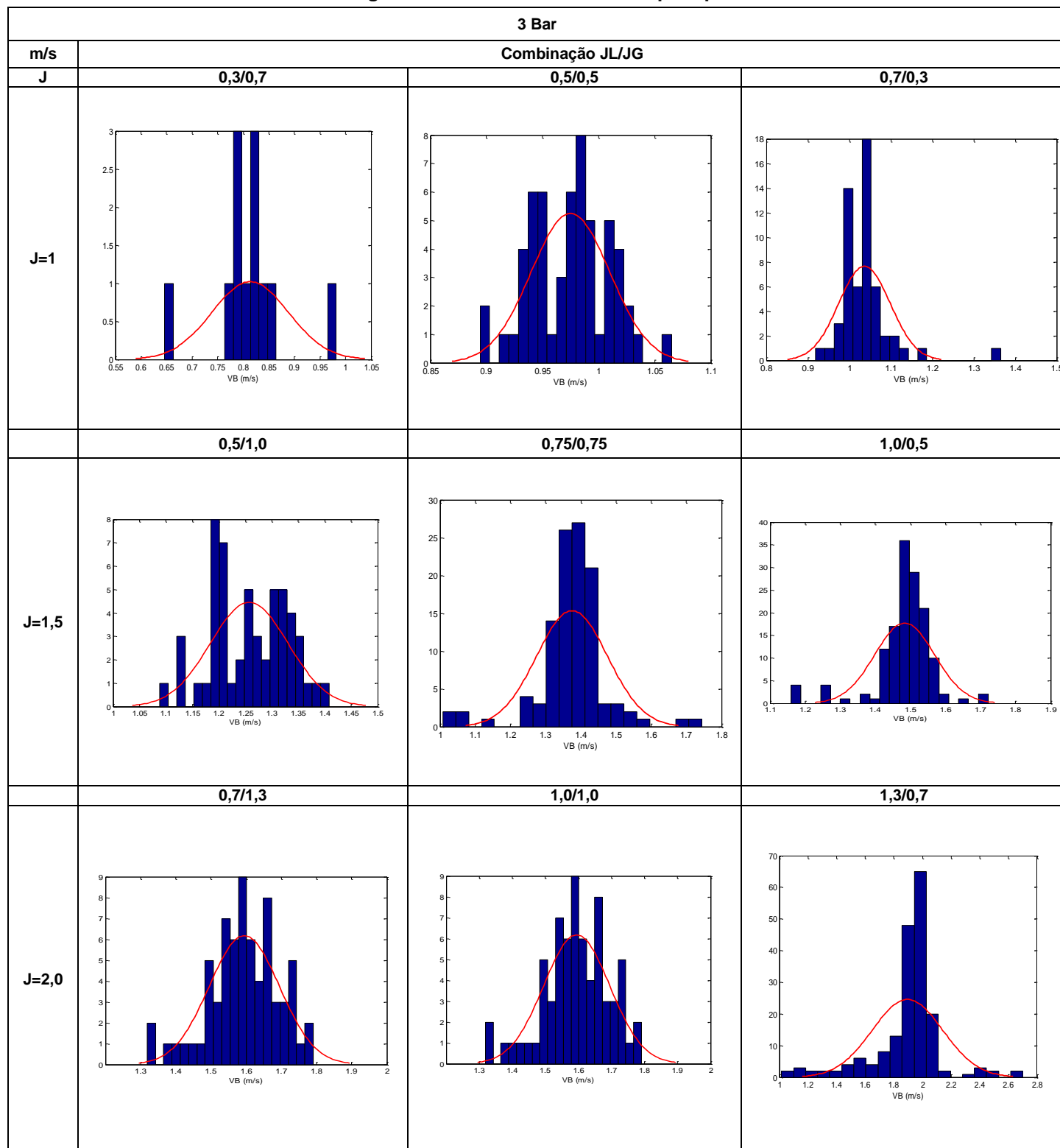


Tabela 36 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 4 Bar

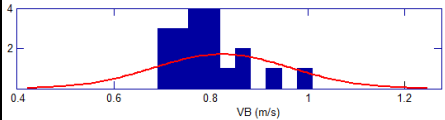
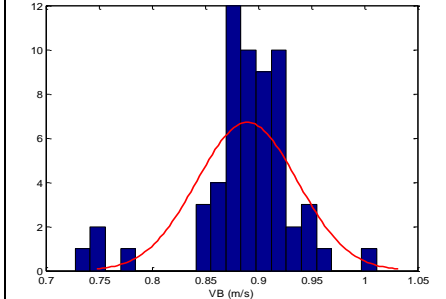
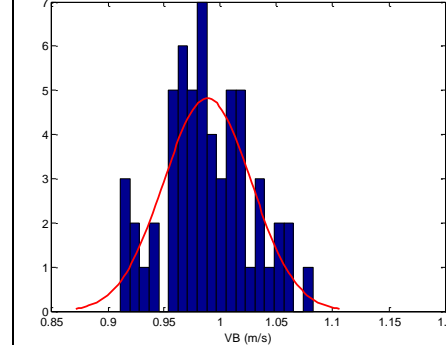
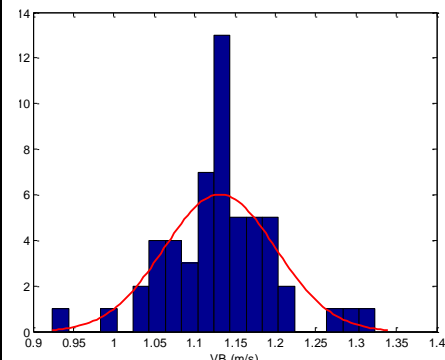
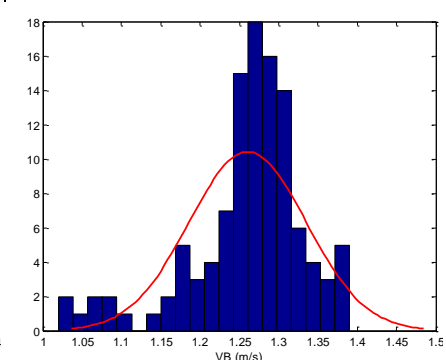
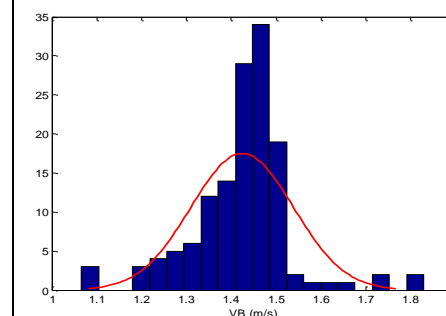
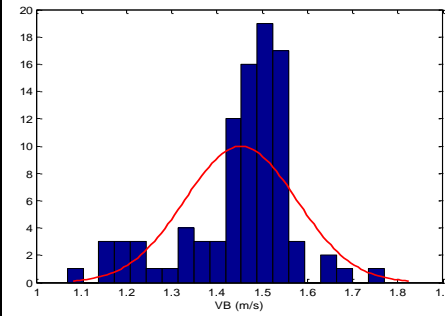
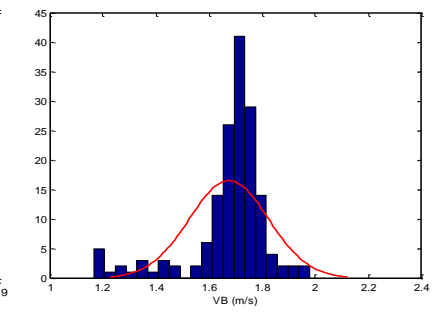
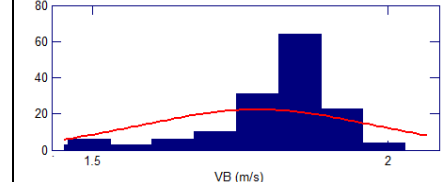
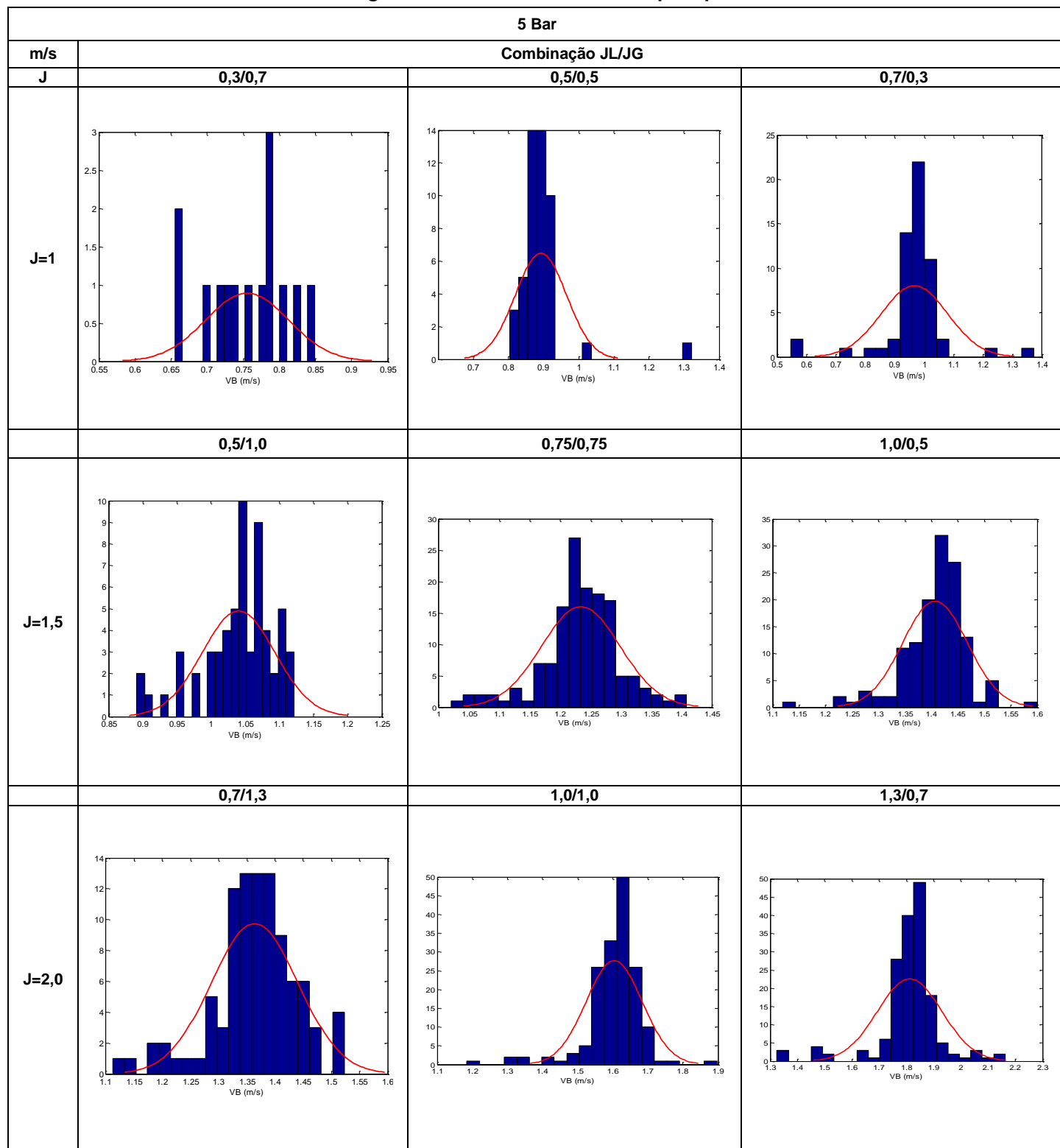
m/s		4 Bar		
J	Combinação JL/JG			
	0,3/0,7	0,5/0,5	0,7/0,3	
J=1				
	0,5/1,0	0,75/0,75	1,0/0,5	
J=1,5				
	0,7/1,3	1,0/1,0	1,3/0,7	
J=2,0				

Tabela 37 - Histograma de Velocidade da Bolha para pressão de 5 Bar



ANEXO 1 – CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DO ENSAIO

O desenvolvimento abaixo mostra como foi realizado a calibração da placa de orifício para ensaios acima da pressão atmosférica. Esse trabalho foi desenvolvido pelo corpo técnico do LACIT. Houve validação dessas equações nos testes preliminares.

A princípio, a placa de orifício é colocada em série com o rotâmetro, o qual está calibrado, em função de uma escala vertical, graduada para uma variável SKT. Para 20,0 °C e pressão de 101,325 KPa, o fabricante fornece SKT em função da vazão em l/h conforme Tabela 38.

Tabela 38 – Vazão de gás em função da variável SKT

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

Observa-se que a relação entre SKT e a vazão de gás é linear conforme gráfico da Figura 35.

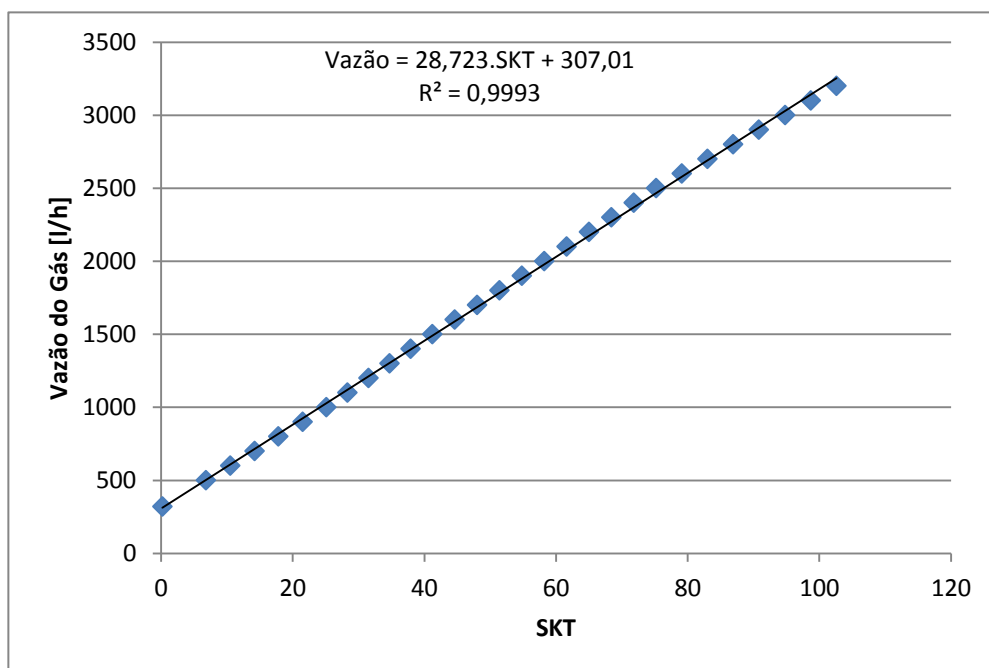


Figura 35 - Relação linear entre SKT e vazão de gás

Logo, a vazão de gás \dot{Q}_{ROT} [l/h] do rotômetro pode ser aproximada pela equação A1, à 20°C e 1,01325 KPa, com em l/h.

$$\dot{Q}_{ROT} = 28,723.SK + 307,01 \quad \text{Eq. A1}$$

Para corrigir a vazão em função da pressão e temperatura, usa-se a equação A2, fornecida por Fox (2006), substituindo \dot{Q}_{ROT} pela equação A1.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_C &= \dot{Q}_{ROT} \sqrt{\frac{(P_{ROT} + P_{atm}) (20 + 273,15)}{1,0325 (T_G + 273,15)}} = \\ &= (28,723.SK + 307,01) \sqrt{\frac{(P_{ROT} + P_{atm}) (20 + 273,15)}{1,0325 (T_G + 273,15)}} \end{aligned} \quad \text{Eq. A2}$$

A vazão volumétrica na placa de orifício \dot{Q}_{PO} [l/h] é da por:

$$\dot{Q}_{PO} = C_d Y \frac{A_{orif}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2 \Delta P_{PO} 9.80665}{\rho_G}}$$

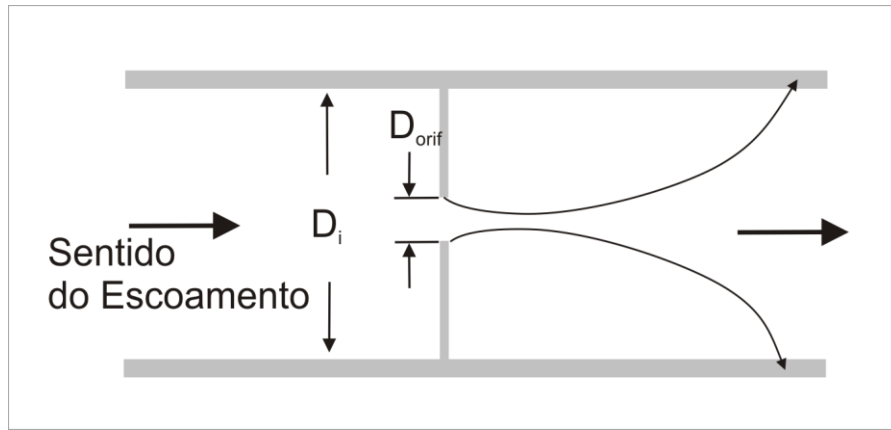


Figura 36 – Placa de Orifício.

Detalhes da geometria da placa são visto na Figura 36, onde $\beta = \frac{d_i}{d_{orif}}$, e

$A_{orif} = \frac{\pi d_{orif}^2}{4}$. O fator 9.80665 dentro da raiz é a conversão de mmH₂O para Pa.

Y é dado por:

$$Y = 1 - \frac{(0,41 + 0,35\beta^4)}{k} \left[1 - \frac{(P_G + P_{atm} - \Delta P_{PO} 9.80665 \cdot 10^{-5})}{(P_G + P_{atm})} \right]$$

K vale 1,4 para o ar e $9.80665 \cdot 10^{-5}$ é o fator de conversão mmH₂O para Bar.

$$\rho = \frac{28,97 \cdot (P_G + P_{atm}) 10^5}{8314 (T_G + 273,15)}$$

10^5 é a conversão de Bar para Pa.

Dessa forma, igualando a vazão do rotâmetro com a da placa de orifício, a única constante não determinada é o coeficiente de descarga C_d .

$$(28,723 \cdot SKT + 307,01) \sqrt{\frac{(P_{ROT} + P_{atm}) (20 + 273,15)}{1,0325 (T_{GAS} + 273,15)}} = C_d Y \frac{A_{orif}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2 \Delta P_{P.O.}}{\rho}}$$

$$C_d = (28,723 \cdot SKT + 307,01) \sqrt{\frac{(P_{ROT} + P_{atm}) (20 + 273,15)}{1,0325 (T_{GAS} + 273,15)}} \left(Y \frac{A_{orif}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2 \Delta P_{P.O.}}{\rho}} \right)^{-1} \quad \text{Eq. A3}$$

A equação A3 indica que C_d pode varia com a vazão, queda de pressão, pressão manométrica, temperatura e geometria da placa do orifício. Assumindo que

os ensaios ocorrem a aproximadamente a 20°C, T_{gas} é simplificado. O diferencial de pressão na placa do orifício é coletado por um transdutor de pressão. As dimensões da placa são itens definidos para fabricação. Dessa forma, as únicas variáveis livres são SKT e pressão manométrica.

Assim, há a necessidade de investigar o comportamento de C_d em função SKT e da pressão de gás. É possível variar a vazão e a pressão de entrada de gás, com uma válvula reguladora de pressão e uma válvula esfera expostas na Figura 37, e determinar o comportamento do coeficiente de descarga. Para tal, realiza-se um procedimento exposto no fluxograma na Figura 38.



Figura 37- Válvula reguladora de pressão e válvula esfera para variação de SKT.

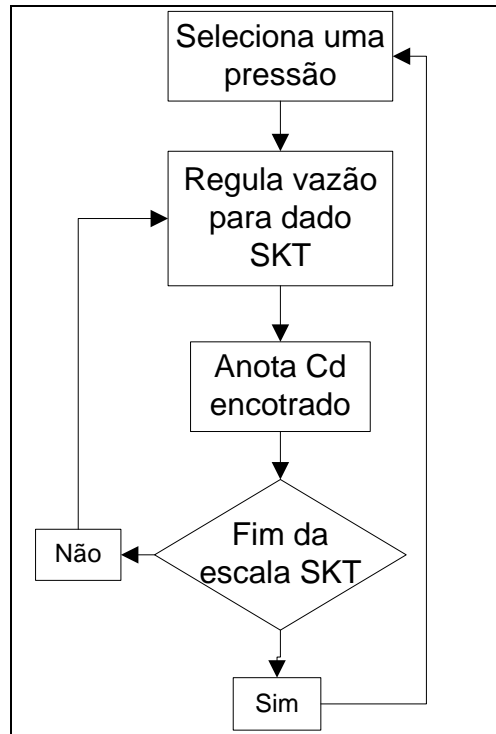


Figura 38- Determinação da relação entre Cd e pressão

Após sucessivas interações, observou-se que para Reynolds acima de 10^4 o valor de Cd é aproximadamente constante com a variação de SKT para a faixa de valores da Figura 35. Já em relação a pressão, observou-se que Cd varia linearmente conforme Figura 39.

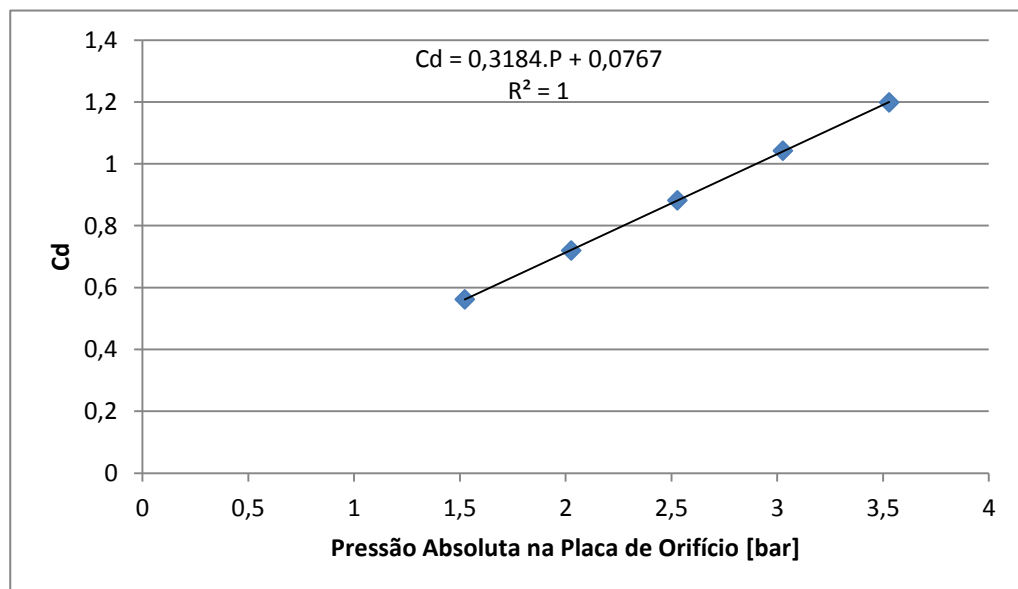


Figura 39 - Relação linear entre Cd e pressão absoluta na placa de orifício

Dessa forma, os coeficientes da reta $C_d = 0,3184.P + 0,0767$ são dados de entrada do algoritmo desenvolvido na plataforma *LabView*, viabilizando a realização de ensaios a pressões acima de 1 Bar e com Reynolds 10^4 .

Determinado a relação entre C_d e a pressão de ensaio, a equação final para vazão de gás é:

$$\dot{Q}_{PO} = C_d Y \frac{A_{Orif}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P_{PO}}{\rho}}$$

$$\dot{Q}_{PO} = [0,3184(P_G + P_{atm}) + 0,0767] Y \frac{A_{Orif}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P_{PO}}{\rho_G}} \quad \text{Eq. A4}$$

Ou seja, a equação A3 pode ser aproximada pela equação A4 para determinar a vazão de gás.

ANEXO 2 – TELA DE MONITORAMENTO

A tela de monitoramento programada na plataforma *LabView* é detalhada na Tabela 39 e os itens correspondentes mostrados na Figura 40. O algoritmo foi desenvolvido ao longo de trabalhos do corpo técnico do LACIT. São detalhados somente os itens usados neste trabalho.

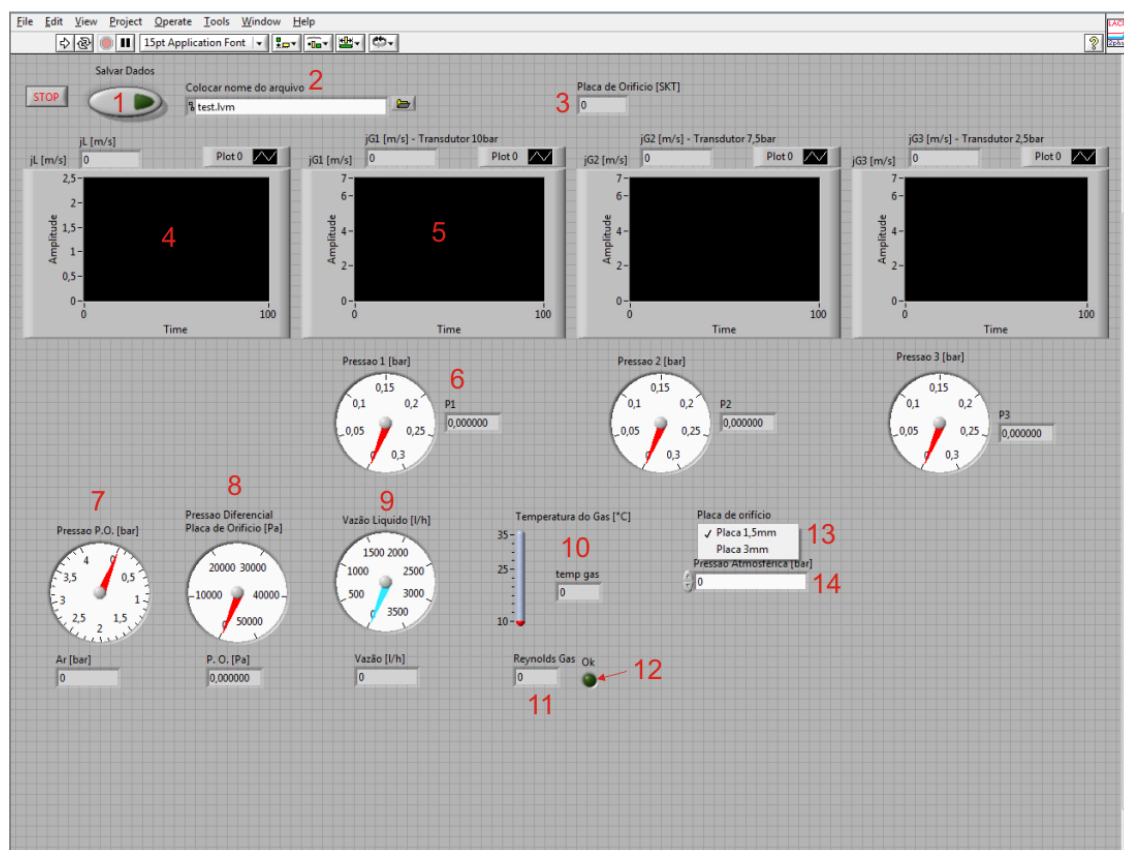


Figura 40 - Tela de monitoramento

Tabela 39 - Itens e funções de monitoramento

Número	Função
1	Gravar valores velocidade superficial de gás, de líquido e a pressão de ensaio
2	Selecionar local de gravação de dados
3	Monitorar valor de SKT (deve ser igual ao valor instantâneo do rotâmetro)
4	Monitorar velocidade superficial de líquido
5	Monitorar velocidade superficial de gás
6	Monitorar pressão na seção de teste
7	Monitorar pressão na entrada da placa de orifício
8	Monitorar pressão diferencial da placa de orifício
9	Monitorar vazão de líquido fornecido pela bomba
10	Monitorar temperatura de gás na placa de orifício

11	Monitorar valor de Reynolds da placa de orifício
12	Garantir restrição do número de Reynolds na placa de orifício conforme Anexo 1 (Se maior que 10^4 sinaliza verde)
13	Selecionar da placa de orifício utilizada (1,5 mm ou 3 mm)
14	Inserir valor da pressão atmosférica no momento do ensaio