



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

FERNANDO ENRIQUE CASTILLO VICENCIO

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO
INTERMITENTE LÍQUIDO-GÁS EM TUBULAÇÕES HORIZONTAIS

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

SETEMBRO 2013

FERNANDO ENRIQUE CASTILLO VICENCIO

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO
INTERMITENTE LÍQUIDO-GÁS EM TUBULAÇÕES HORIZONTAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba.
Área de Concentração: Engenharia Térmica.

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

Co-orientador: Prof. Marco J. Da Silva, Dr.

CURITIBA

SETEMBRO 2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

C352c Castillo Vicencio, Fernando Enrique
2013 Caracterização experimental do escoamento intermitente
líquido-gás em tubulações horizontais / Fernando Enrique
Castillo Vicencio.-- 2013.
xxiii, 138 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2013
Bibliografia: f. 88-94

1. Escoamento bifásico. 2. Escoamento em golfadas.
3. Modelos matemáticos. 4. Tubulação - Dinâmica dos
fluidos. 5. Métodos de simulação. 6. Engenharia mecânica
- Dissertações. I.Morales, Rigoberto Eleazar Melgarejo.
II.Silva, Marco José da. III.Universidade Tecnológica
Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica e de Materiais. IV. Título.

CDD 22 -- 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

FERNANDO ENRIQUE CASTILLO VICENCIO

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO INTERMITENTE LÍQUIDO-GÁS EM TUBULAÇÕES HORIZONTAIS

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia de ciências térmicas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora

Prof. Rigoberto E. M. Morales, Dr.
PPGEM/UTFPR - Orientador

Prof. Luis F. A. Azevedo, Dr.
CTC – DEM / PUC-Rio

Prof. Admilson T. Franco, Dr.
PPGEM / UTFPR

Curitiba, 04 de setembro de 2013

A minha mãe, exemplo vivo de perseverança e luta sem quartel pelos seres amados.

AGRADECIMENTOS

Devo especiais agradecimentos:

Aos meus pais pela vida dedicada a lutar e fixar os valores e princípios em mim e nos meus irmãos. A minha mãe que sempre lutou para que eu possa me superar cada dia e ao meu pai que descansa em paz, mas sempre me ilumina nos momentos difíceis. Também aos meus irmãos e primos por me forçar a ser exemplo deles.

Ao estimado professor Rigoberto E. M. Morales, pelo apoio durante todo o projeto e pela confiança depositada, embora tenha lhe dado várias dores de cabeça. Sem o seu apoio não tivesse sido possível minha estadia nesses mais de dois anos nem tivesse concluído o presente estudo.

Aos estimados Marco J. Da Silva, Fausto A. de Barbuto, Cristiane Cozin e Fabio A. Schneider pela sua imensurável colaboração no presente estudo, pelas dicas em vários pontos chave e pelas correções feitas neste estudo.

Aos amigos e colegas do LACIT, pelas dicas em cada jornada e por me fazer conhecer um pouco da sua cultura, amizade, estudo, entre outros. Principalmente agradeço ao Reinaldo G. Justiniano pela ajuda prestada nos experimentos e por fazer do café das 15 horas mais entretido. Também agradeço ao Victor Parra, César Medina, Paulo Canedo, Fernando De Lai, Ernani Kopp, Diogo Andrade, Eduardo Santos, Nikolas Libert, Leonardo Lipinski, Rafael Alves e a todo o pessoal do LACIT, por compartilhar comigo estes dois anos de novas experiências e aprendizado, colaborando com sua amizade, seus conselhos ou alguma dica que serviu para o desenvolvimento do presente estudo.

Finalmente, aos meus amigos piratas: Saúl Vallejos, Marino Ayala, José Aguilar e Javier Gutarra, pela amizade sincera e bons conselhos nos momentos bons e ruins, a pesar da distância. E não posso me esquecer da Catarina Bona, por adoçar os meus dias no Brasil.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Martin Luther King

CASTILLO, Fernando Enrique, **Caracterização Experimental do escoamento Intermitente Líquido-Gás em Tubulações Horizontais**, 2013, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 129 p.

RESUMO

O presente estudo visa ampliar o conhecimento sobre a dinâmica do escoamento intermitente líquido-gás, caracterizando experimentalmente os principais parâmetros deste tipo de escoamento. Para este fim, é utilizada a bancada experimental que consta de uma linha bifásica horizontal de 9,2 m de comprimento e 25,8 mm de diâmetro. A monitoração das estruturas do escoamento bifásico foi realizada utilizando dois (02) sensores de malha de eletrodos de 12x12 nós separados 3,75 cm entre si. Os testes experimentais foram realizados para 47 condições de vazão de líquido e de gás do escoamento bifásico no padrão intermitente, levando em conta as limitações da bancada experimental. Após processar o sinal medido, é obtida a série temporal dos dados e os parâmetros característicos do escoamento intermitente em golfadas, como a velocidade da bolha alongada, frequência, comprimentos da bolha e do pistão de líquido e a fração de vazio. A distribuição de probabilidades de cada parâmetro foi aproximada com uma função probabilística, do tipo normal ou log-normal. Foram elaboradas relações funcionais para calcular os parâmetros característicos médios do escoamento em golfadas e seus respectivos desvios padrão a partir das condições de operação do escoamento (velocidades superficiais e propriedades dos fluidos). Essas correlações visam prever o comportamento dos parâmetros do escoamento intermitente líquido-gás e podem ser utilizados como dados de entrada ou de fechamento dos modelos matemáticos existentes. Este estudo também pode servir de referência para futuros estudos e para o desenvolvimento e validação de modelos teóricos do escoamento em golfadas em dutos horizontais.

Palavras-chave: Escoamento bifásico, caracterização experimental, distribuição estatística.

CASTILLO, Fernando Enrique. **An Experimental Characterization of Intermittent Two-Phase Gas-Liquid Flows in Horizontal Pipes**, 2013, Dissertation (Masters in Engineering) – Federal Technological University - Paraná, Postgraduation Programme, Curitiba, 129 p.

ABSTRACT

The goal of the present work is to broaden the knowledge on the dynamics of two-phase intermittent gas-liquid flows through the experimental characterization of their parameters. The experimental work was carried out at the LACIT-UTFPR labs and a two-phase flow apparatus consisting of a 25.8-mm ID, 9-m long transparent line was used. A pair of 12x12-nodes wire mesh sensors 3.75 cm apart was used to identify the existing phase at each node. A test grid comprehending a broad range of gas and liquid flow rates within the intermittent flow pattern region was chosen. The operational limitations of the experimental rig were taken into account on defining the boundaries of the aforementioned test grid. The temporal series of the data, as well as characteristic parameters of the intermittent flows such as frequency, void fraction, elongated bubble velocity and the lengths of the liquid slug and the elongated bubble were obtained after signal processing. The probability distribution of each parameter was found and approximated to a known statistical distribution such as the normal or the log-normal ones. Correlations to fit the averaged parameters and their standard deviations were proposed. The objective of such correlations is to predict the average values of the characteristic parameters of the intermittent flows so that such predicted values might be used as input data for the theoretical models developed. Finally, statistical distributions based on the empirical correlations and their normal and log-normal distributions were found. These distributions validated the aforementioned correlations, which can henceforth be used in future theoretical modelling in this field.

Keywords: Two-phase flows, experimental characterization, statistical distributions.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	24
1.1.	Objetivos	27
1.2.	Justificativas.....	28
1.3.	Estrutura do trabalho.....	29
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1.	Parâmetros característicos do escoamento líquido-gás em golfadas.....	30
2.1.1.	Velocidade de translação da bolha alongada.....	32
2.1.2.	Frequência de passagem da célula unitária	34
2.1.3.	Comprimento do pistão.....	36
2.2.	Estudos experimentais sobre o escoamento em golfadas	37
2.3.	Síntese do capítulo	39
3.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	41
3.1.	Circuito experimental.....	41
3.1.1.	Linha de líquido.....	42
3.1.2.	Linha de gás.....	43
3.1.3.	Linha bifásica.....	43
3.1.4.	Câmara de alta velocidade	44
3.2.	O sensor de malha de eletrodos (WMS).....	45
3.3.	Procedimento das medições.....	48
3.4.	Processamento dos dados	49
3.4.1.	Tratamento da série temporal de fração de vazio	50
3.4.2.	Obtenção dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas....	51
3.4.3.	Repetitividade das medidas.....	54

3.4.4.	Verificação dos valores médios	55
3.4.5.	Caracterização estatística do escoamento em golfadas	55
4.	RESULTADOS	59
4.1.	Grade de Testes	59
4.2.	Parâmetros característicos do escoamento em golfadas.....	60
4.2.1.	Velocidade da bolha alongada.....	60
4.2.2.	Frequência da passagem da célula unitária.....	64
4.2.3.	Comprimento da bolha alongada	67
4.2.4.	Comprimento do pistão.....	70
4.2.5.	Fração de vazio na região da bolha.....	72
4.3.	Avaliação das relações obtidas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás.....	74
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	79
5.1.	Conclusões.....	79
5.2.	Recomendações.....	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE A – CÁLCULO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS.....	88
	APÊNDICE B – OBTENÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIO.....	94
	APÊNDICE C – PROCESSAMENTO DA SÉRIE TEMPORAL DE FRAÇÃO DE VAZIO	97
	APÊNDICE D – MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.....	101
	APÊNDICE E – ANÁLISE DE INCERTEZAS NA MEDIÇÃO	104
	APÊNDICE F – FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA OS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO INTERMITENTE..	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Principais padrões de escoamento bifásico em um tubo horizontal, segundo Wallis (1969).....	25
Figura 1.2. Mapas de escoamento bifásico líquido-gás de Mandhane et al. (1974) e Taitel e Dukler (1976) para uma tubulação horizontal de 1” de diâmetro interno.	26
Figura 2.1. Esquema da célula unitária e os parâmetros característicos do escoamento em golfadas.....	31
Figura 3.1. Esquema da bancada experimental do LACIT.	41
Figura 3.2. Esquema de instalação do WMS e da câmera de alta velocidade.	44
Figura 3.3. Vistas e esquema da configuração dos fios do WMS.....	46
Figura 3.4. Esquema de dois WMS gêmeos para a medição da velocidade e dos comprimentos característicos do escoamento em golfadas.....	47
Figura 3.5. Série temporal característica para o escoamento intermitente com pistão aerado,.	50
Figura 3.6. Esquema de obtenção da velocidade da bolha alongada.....	53
Figura 3.7. Verificação da repetibilidade das três medidas realizadas para dois pontos da grade de testes do presente estudo.	54
Figura 3.8. Comparação da velocidade da bolha alongada, obtida pela câmera de alta velocidade e pelo WMS.....	55
Figura 3.9. PDF característica do comprimento da bolha e distribuições de probabilidade mais utilizadas.....	58
Figura 4.1. Grade de testes dentro da faixa de operação da bancada experimental do LACIT no mapa de Taitel e Dukler (1976).	59
Figura 4.2. Distribuições de probabilidades para a velocidade da bolha alongada.	61
Figura 4.3. (a) Contribuição da velocidade de mistura na velocidade de translação da bolha alongada. (b) Relação linear para a velocidade da bolha alongada.....	63

Figura 4.4. Desvio padrão da velocidade da bolha alongada em função do número de Froude da mistura.....	63
Figura 4.5. Distribuições de probabilidades para a frequência da célula unitária.	64
Figura 4.6. Correlação para a frequência da célula unitária da equação (4.4) e comparação com os dados experimentais obtidos no presente estudo.	65
Figura 4.7. Correlação empírica para o número de Strouhal da equação (4.5) e comparação com os dados experimentais obtidos no presente estudo.	66
Figura 4.8. Comparação da correlação experimental proposta na equação (4.5) com a correlação de Fossa et al. (2003) e Wang et al. (2007).....	67
Figura 4.9. Correlação empírica para o desvio padrão da frequência utilizando a equação (4.5).	67
Figura 4.10 .Distribuições de probabilidades para o comprimento da bolha alongada.	68
Figura 4.11. Correlação empírica para o comprimento adimensional da bolha alongada.	69
Figura 4.12. Correlação empírica para o desvio padrão do comprimento da bolha alongada utilizando a equação (4.8).....	69
Figura 4.13. Distribuições de probabilidades para o comprimento do pistão.	70
Figura 4.14. Correlação empírica da equação (4.9) para o comprimento adimensional do pistão.....	71
Figura 4.15. Correlação empírica para o desvio padrão do comprimento da bolha alongada utilizando a equação (4.10).....	72
Figura 4.16. Distribuições de probabilidades para a fração de vazio na região da bolha alongada.....	73
Figura 4.17. Correlação empírica da equação (4.11) para a fração de vazio.	73
Figura 4.18. Dispersão do desvio padrão da fração de vazio na bolha.	74
Figura 4.19. Comparação entre a distribuição de probabilidades experimental (Exp.) e a PDF gerada mediante equações, para JL=1,00 m/s e JG=0,9 m/s.	76
Figura 4.20. . Comparação entre a distribuição de probabilidades experimental (Exp.) e a PDF gerada mediante equações, para JL=0,25 m/s e JG=1,7 m/s.	77

Figura 4.21. Comparação entre a distribuição de probabilidades experimental (Exp.) e a PDF gerada mediante equações, para $JL=0,25$ m/s e $JG=1,7$ m/s.	78
Figura A. 1. Esquema dos parâmetros disponíveis para a medição das velocidades superficiais do líquido e do gás na bancada experimental do presente estudo.	89
Figura A. 2. Esquema do arranjo dos rotâmetros utilizados no presente estudo.	90
Figura A. 3. Curvas de calibração dos rotâmetros utilizados no presente estudo.	91
Figura B. 1. Esquema elétrico do cruzamento de dois eletrodos do WMS. Adaptado de Da Silva (2008).	94
Figura C. 1. Transformação da série temporal de fração de vazio (a) na função binária (b).	97
Figura C. 2. Filtro da série temporal fração de vazio para detectar ondas de pressão no pistão líquido debaixo de algumas bolhas compridas.	98
Figura C. 3. Filtro da série temporal fração de vazio para distinguir bolhas alongadas das bolhas dispersas no pistão.	99
Figura C. 4. Exemplo da análise do fator de corte a ser utilizado em cada ponto de medição.	100
Figura F. 1. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 01.	107
Figura F. 2. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 02.	108
Figura F. 3. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 03.	108
Figura F. 4. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações	

	apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 04.....	109
Figura F. 5.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 05.....	109
Figura F. 6.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 06.....	110
Figura F. 7.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 07.....	110
Figura F. 8.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 08.....	111
Figura F. 9.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 09.....	111
Figura F. 10.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 10.....	112
Figura F. 11.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 11.....	112
Figura F. 12.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações	

	apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 12.....	113
Figura F. 13.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 13.....	113
Figura F. 14.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 14.....	114
Figura F. 15.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 15.....	114
Figura F. 16.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 16.....	115
Figura F. 17.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 17.....	115
Figura F. 18.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 18.....	116
Figura F. 19.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 19.....	116
Figura F. 20.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações	

apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 20..... 117

Figura F. 21. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 21..... 117

Figura F. 22. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 22..... 118

Figura F. 23. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 23..... 118

Figura F. 24. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 24..... 119

Figura F. 25. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 25..... 119

Figura F. 26. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 26..... 120

Figura F. 27. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 27..... 120

Figura F. 28. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações

	apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 28.....	121
Figura F. 29.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 29.....	121
Figura F. 30.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 30.....	122
Figura F. 31.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 31.....	122
Figura F. 32.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 32.....	123
Figura F. 33.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 33.....	123
Figura F. 34.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 34.....	124
Figura F. 35.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 35.....	124
Figura F. 36.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações	

	apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 36.....	125
Figura F. 37.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 37.....	125
Figura F. 38.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 38.....	126
Figura F. 39.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 39.....	126
Figura F. 40.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 40.....	127
Figura F. 41.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 41.....	127
Figura F. 42.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 42.....	128
Figura F. 43.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 43.....	128
Figura F. 44.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações	

	apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 44.....	129
Figura F. 45.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 45.....	129
Figura F. 46.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 46.....	130
Figura F. 47.	Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 47.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Comprimentos médios do pistão de líquido do escoamento em um duto horizontal. Adaptado de Carpintero (2009).....	36
Tabela 4.1. Grade de testes do presente estudo.....	60
Tabela 4.2. Dados para velocidade média de translação da bolha	61
Tabela 4.3. Dados para a frequência da passagem da célula unitária.....	65
Tabela 4.4. Resumo das relações obtidas para os parâmetros característicos do escoamento em golfadas.....	75
Tabela E. 1. Incerteza relativa dos instrumentos utilizados.....	105
Tabela E. 2. Incerteza na medição das velocidade superficiais.....	106

NOMENCLATURA

Letras Romanas

a	Constante	Adimensional
A	Área interna da tubulação na seção de teste	[m ²]
$A_{G,rot}$	Área de passagem do gás ao redor do flutuador do rotâmetro	[m ²]
A_{LB}	Área ocupada pelo líquido na região da bolha alongada	[m ²]
A_{LS}	Área ocupada pelo líquido na região do pistão	[m ²]
A_x	Área correspondente à vizinhança de um nó do WMS	[m ²]
b	Constante	Adimensional
B_i	i -ésima bolha alongada	Adimensional
C_0	Coefficiente da contribuição da velocidade superficial da mistura na velocidade de translação da bolha alongada	Adimensional
C_∞	Coefficiente da contribuição da gravidade na velocidade de translação da bolha alongada	Adimensional
C_d	Coefficiente de arrasto	Adimensional
C_f	Capacitância elétrica do amplificador do WMS	[F]
C_x	Capacitância elétrica no ponto de cruzamento do WMS	[F]
d_{WMS}	Distância entre os planos de medição do par de WMS gêmeos	[m]
D	Diâmetro interno da tubulação na seção de teste	[m]
E_O	Número de Eötvös	Adimensional
f	Frequência da célula unitária	[Hz]
F_B	Força de flutuação do flutuador do rotâmetro	[N]
F_D	Força de arrasto no flutuador do rotâmetro	[N]
F_W	Peso do flutuador do rotâmetro	[N]
Fr_J	Número de Froude da mistura	Adimensional
g	Aceleração da gravidade terrestre	[m s ⁻²]
H_{LB}	Fração de área do líquido na região da bolha alongada	Adimensional
H_{LS}	Fração de área do líquido na região do pistão	Adimensional
J	Velocidade superficial da mistura na seção de teste	[m s ⁻¹]
J_G	Velocidade superficial do gás na seção de teste	[m s ⁻¹]
J_L	Velocidade superficial do líquido na seção de teste	[m s ⁻¹]
L_B	Comprimento da bolha alongada	[m]

L_S	Comprimento do pistão	[m]
L_T	Comprimento da linha de teste a partir do misturador	[m]
m_{flut}	Massa do flutuador do rotâmetro	[kg]
$m_{G,flut}$	Massa de gás deslocada pelo flutuador do rotâmetro	[kg]
$\dot{m}_{G,rot}$	Vazão mássica do gás no rotâmetro	[kg s ⁻¹]
$\dot{m}_{G,ts}$	Vazão mássica do gás na seção de teste	[kg s ⁻¹]
$\dot{m}_{L,mvm}$	Vazão mássica do líquido no sensor de vazão mássica	[kg s ⁻¹]
$\dot{m}_{L,ts}$	Vazão mássica do líquido na seção de teste	[kg s ⁻¹]
n	Constante	Adimensional
p	Função de probabilidade	Adimensional
P_i	i-ésimo pistão	Adimensional
P_{rot}	Pressão absoluta na saída do rotâmetro	[N m ⁻²]
P_{ts}	Pressão absoluta na seção de teste	[N m ⁻²]
P_r	Probabilidade	Adimensional
Q	Vazão	[m ³ s ⁻¹]
R	Coefficiente de correlação	Adimensional
R_{ar}	Constante de gás ideal do ar	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
R_f	Resistência elétrica no amplificador do WMS	[Ω]
Re_J	Número de Reynolds da mistura	Adimensional
t_b	Tempo de passagem da bolha alongada	[s]
T	Intervalo de tempo	[s]
T_B	Período de passagem da bolha alongada	[s]
T_S	Período de passagem do pistão	[s]
T_{rot}	Temperatura na saída do rotâmetro	[K]
T_{ts}	Temperatura na seção de teste	[K]
T_x	Frequência de ocorrência de um intervalo de classe determinado	Adimensional
u	Função escalão unitário	Adimensional
$U_{G,rot}$	Velocidade média do gás que atravessa o flutuador do rotâmetro	[m s ⁻¹]
U_{TB}	Velocidade da bolha alongada	[m s ⁻¹]
\forall	Volume	[m ³]
V_a	Constante do detector logarítmico do WMS	Adimensional
V_b	Constante do detector logarítmico do WMS	Adimensional
V_H	Tensão elétrica de calibração do WMS para um tubo cheio de água.	[V]
V_i	Tensão elétrica na entrada do amplificador do WMS	[V]
V_{log}	Tensão elétrica na saída do detector logarítmico do WMS	[V]

V_L	Tensão elétrica de calibração do WMS para um tubo com ar	[V]
V_o	Tensão elétrica na saída do amplificador do WMS	[V]
x	Variável	Adimensional
y	Variável	Adimensional

Letras Gregas

α	Fração de vazio	Adimensional
α_B	Fração de vazio média na região da bolha alongada	Adimensional
α_S	Fração de vazio média na região do pistão	Adimensional
α_x	Fração de vazio em um ponto de cruzamento do WMS	Adimensional
β	Fator de intermitência	Adimensional
Δt_B	Varição do tempo de início de uma bolha entre os dois WMS	[s]
Δt_S	Varição do tempo de início de um pistão entre os dois WMS	[s]
ε_x	Permissividade elétrica em um ponto de cruzamento do WMS	[F m ⁻¹]
ϕ_{normal}	Função de probabilidade normal	Adimensional
$\phi_{log-normal}$	Função de probabilidade log-normal	Adimensional
θ	Ângulo de inclinação da linha de teste	[rad]
μ_L	Viscosidade do líquido	[Pa s]
ν_L	Viscosidade cinemática do líquido	[m ² s ⁻¹]
ρ_L	Densidade do líquido	[kg m ⁻³]
ρ_G	Densidade do gás	[kg m ⁻³]
ρ_{xy}	Coefficiente de correlação de uma população	Adimensional
σ_x	Desvio padrão de uma variável x	Adimensional
σ_f	Desvio padrão da frequência da célula unitária	[Hz]
σ_{L_B}	Desvio padrão do comprimento da bolha alongada	[m]
σ_{L_S}	Desvio padrão do comprimento do pistão	[m]
$\sigma_{U_{TB}}$	Desvio padrão da velocidade da bolha alongada	[m s ⁻¹]
σ_{α_B}	Desvio padrão da fração de vazio na região da bolha alongada	Adimensional
σ_{α_S}	Desvio padrão da fração de vazio na região do pistão	Adimensional
σ_{LG}	Tensão superficial da interface líquido-gás	[N m ⁻¹]
ω	Frequência angular da tensão fornecida aos eletrodos do WMS	[rad s ⁻¹]

Índices

$()_B$	Bolha alongada (<i>Bubble</i>)
$()_{flut}$	Flutuador do rotâmetro
$()_G$	Gás
$()_J$	Mistura
$()_L$	Líquido
$()_S$	Pistão (<i>Slug</i>)
$()_{rot}$	Rotâmetro
$()_{TB}$	Translação da bolha
$()_{ts}$	Seção de teste (<i>Test section</i>)

Abreviaturas

DI	Diâmetro interno da tubulação
FC	Fator de corte principal
FC2	Fator de corte adicional
FC3	Fator de corte pelo tamanho da bolha
LACIT	Laboratório de Ciências Térmicas
LED	Diodo emissor de luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
PDF	Função densidade de probabilidade (<i>Probability Density Function</i>)
PIV	Velocímetro por imagem de partícula (<i>Particle Image Velocimetry</i>)
PSD	Densidade espectral de potência (<i>Power Spectral Density</i>)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WMS	Sensor de malha de eletrodos (<i>Wire-mesh Sensor</i>)

1. INTRODUÇÃO

Define-se o escoamento multifásico como o movimento de fluidos contendo duas ou mais fases imiscíveis, sendo que estas fases podem ser sólidas, líquidas ou gasosas. Este tipo de escoamento é encontrado em várias áreas da natureza assim como em diversas aplicações tecnológicas. Pode-se apresentar como o escoamento simultâneo de líquido-sólido, líquido-gás, gás-sólido, líquido-líquido, líquido-líquido-gás, entre outros.

Alguns exemplos de escoamento multifásico são apresentados por Ishii e Hibiki (2006), tais como o transporte do sangue no sistema cardiovascular, o transporte da seiva nas plantas, o transporte de sedimentos no leito marinho, assim como o resfriamento de reatores nucleares ou o transporte de petróleo em instalações submarinas, além de trocadores de calor e turbinas.

Um caso particular do escoamento multifásico é o fluxo simultâneo de líquido e gás, denominado escoamento bifásico líquido-gás, que pode ser encontrado em setores importantes da indústria, como a geração de energia nuclear e produção e transporte de petróleo.

O escoamento bifásico líquido-gás em tubulações pode apresentar diferentes distribuições geométricas entre suas fases, denominados padrões de escoamento, os quais dependem das condições de operação. Assim, no escoamento líquido-gás em uma tubulação na direção horizontal, podem ser identificados os padrões mostrados na Figura 1.1.

O padrão estratificado, mostrado na Figura 1.1(b), apresenta-se para baixas vazões de gás e líquido, onde o efeito gravitacional é o predominante, fazendo que o líquido escoe na parte inferior da tubulação. Levy (1999) observou que para baixas vazões de gás a interface do líquido e gás, apresenta-se lisa e sem perturbações, mas na medida em que a vazão de gás aumenta, a interface torna-se ondulada e instável.

Se a partir do escoamento monofásico de líquido é introduzida uma vazão de gás reduzida, pequenas bolhas podem ser observadas na parte superior do tubo. Este padrão é conhecido como o de bolhas dispersas, mostrado na Figura 1.1(a). Wallis (1969) afirmou que este tipo de escoamento é raramente observado como estado final

de equilíbrio em uma tubulação horizontal, devido à coalescência entre as bolhas dispersas, que dá lugar a outros padrões de fluxo.

O escoamento em golfadas, mostrado na Figura 1.1(c), é caracterizado pela presença de uma bolha alongada de gás seguida por um pistão de líquido, que em alguns casos pode conter pequenas bolhas dispersas. O último dos padrões, mostrado na Figura 1.1(d), é o denominado escoamento anular, o qual acontece para altas vazões de gás e líquido. Neste escoamento pode-se observar um núcleo de gás no meio do tubo envolvido por um filme de líquido contínuo nas paredes da tubulação.

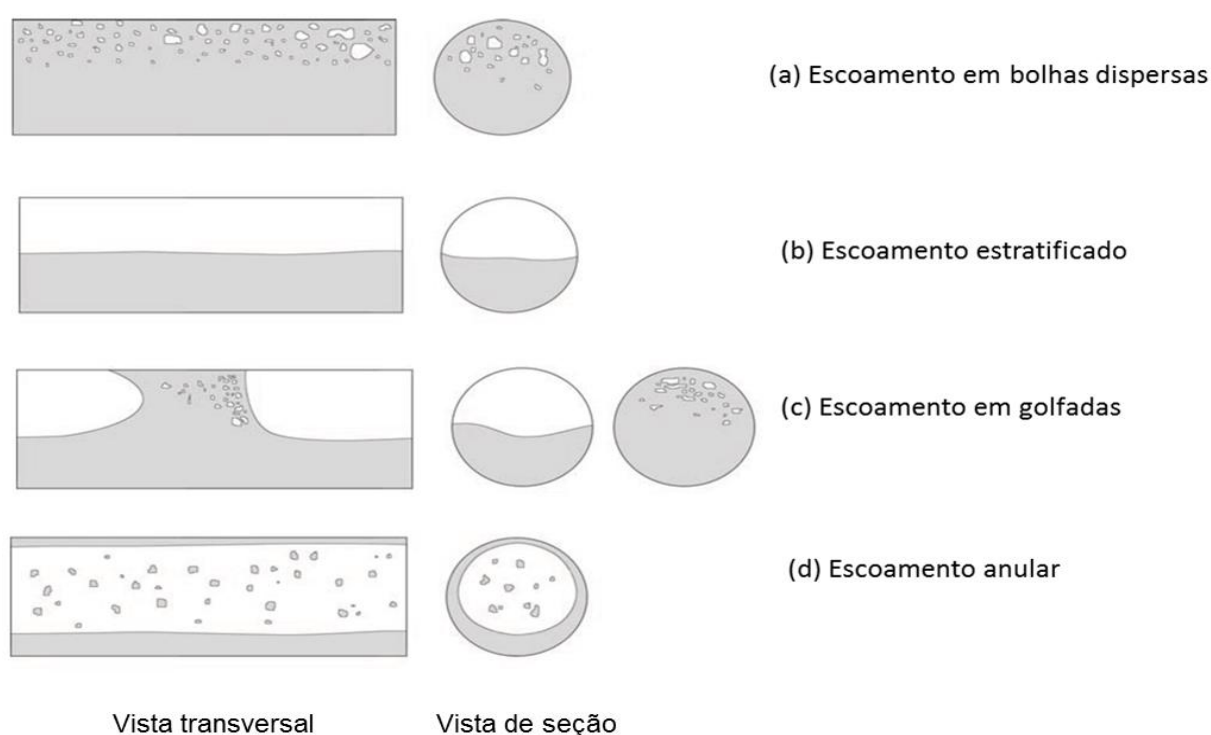


Figura 1.1. Principais padrões de escoamento bifásico em um tubo horizontal, segundo Wallis (1969).

Um aspecto importante a considerar é a predição da ocorrência desses padrões. Para este fim têm sido desenvolvidos diversos mapas de fluxo para diferentes condições de operação. Dois dos principais mapas de fluxo são apresentados na Figura 1.2, os quais foram desenvolvidos para o escoamento líquido-gás em uma tubulação horizontal de 1" de diâmetro interno da tubulação, onde o de Mandhane et al. (1974) foi desenvolvido experimentalmente e, por sua vez, o mapa de Taitel e Dukler (1976) está baseado em um modelo matemático.

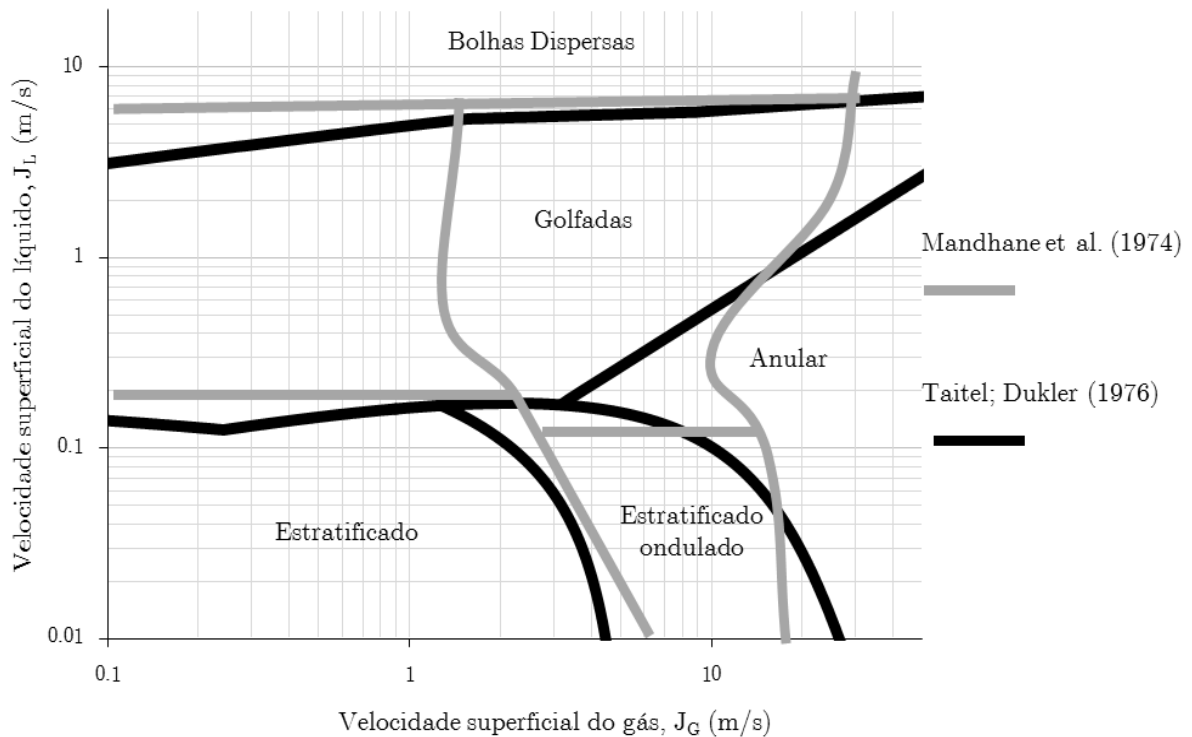


Figura 1.2. Mapas de escoamento bifásico líquido-gás de Mandhane et al. (1974) e Taitel e Dukler (1976) para uma tubulação horizontal de 1'' de diâmetro interno.

Dos padrões de fluxo descritos na Figura 1.1, o escoamento bifásico líquido-gás em golfadas, ou intermitente, é o de maior importância na área de produção petrolífera. Este escoamento pode ser descrito como uma evolução intermitente, no espaço e no tempo, de bolhas alongadas e pistões de líquido.

Para prever os parâmetros do escoamento intermitente ou em golfadas, foram propostos modelos matemáticos a partir das equações de conservação, os quais, como descrito por Falcone et al. (2009), foram desenvolvidos a partir da segunda metade do século passado, impulsionados pela indústria de geração de energia nuclear e da indústria aeroespacial. Nas últimas três décadas, as pesquisas também foram aplicadas à indústria petrolífera, tendo ganho protagonismo devido à necessidade de modelar corretamente o escoamento de óleo e gás nas linhas de produção ou nos equipamentos utilizados.

Assim, existe na literatura uma quantidade considerável de modelos para prever o escoamento em golfadas, que vão desde modelos simplificados em regime estacionário até modelos complexos em regime transiente. No entanto, esses modelos

precisam de equações de fechamento para os parâmetros característicos do escoamento intermitente e, em alguns casos, das distribuições estatísticas desses parâmetros, razão pela qual os estudos experimentais do escoamento em golfadas tornaram-se importantes.

Devido a esta necessidade, nas últimas décadas os estudos experimentais sobre escoamentos em golfadas tem aumentado significativamente (Da Silva, 2008; Carpintero, 2009 e Carneiro et al., 2011). Muitos destes trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de identificar experimentalmente o comportamento das estruturas do escoamento em golfadas, utilizando diversas técnicas de medição. Porém, foi identificada uma divergência entre os resultados obtidos pelos diferentes autores (Carpintero, 2009). Portanto, faz-se necessário um estudo que amplie a base de dados experimentais para identificar a relação das estruturas do escoamento em golfadas com as condições de operação (vazões, pressão e propriedades dos fluidos).

1.1. Objetivos

O objetivo geral do presente estudo é a caracterização experimental do escoamento líquido-gás em golfadas em uma tubulação horizontal, visando ampliar o conhecimento sobre o comportamento dos parâmetros característicos deste tipo de escoamento como velocidade da bolha alongada (U_{TB}), comprimento da bolha alongada (L_B), comprimento do pistão de líquido (L_S), frequência de passagem das células unitárias (f) e fração de vazio na região da bolha alongada (α_B).

Para atingir o objetivo proposto, o escoamento bifásico em golfadas será monitorado utilizando o sensor de malha de eletrodos (WMS) para 47 diferentes combinações de vazões de líquido e de gás. Os estudos foram realizados para o escoamento de água e ar em um duto horizontal de 25,8 mm de diâmetro interno, a temperatura ambiente e pressão atmosférica na saída.

A partir dos resultados será analisado o comportamento das estruturas do escoamento bifásico líquido-gás em golfadas, tanto para os valores médios quanto para as suas distribuições estatísticas. Será identificada, quando possível, a relação funcional entre os parâmetros característicos do escoamento em golfadas e as velocidades superficiais.

1.2. Justificativas

A crescente demanda de energia da nossa sociedade têm desenvolvido projetos cada vez mais desafiantes e complexos para a sua exploração ou geração. Uma das indústrias que apresenta projetos mais complexos e de maior escala, é a indústria de exploração e produção de petróleo, que nos últimos anos tem explorado poços em profundidades marinhas cada vez maiores.

Particularmente, o estudo do escoamento intermitente tem-se tornado mais importante devido às grandes distâncias que devem percorrer as misturas de petróleo, muitas delas no padrão intermitente, somadas às adversas condições de operação das linhas submarinas de transporte.

Além disso, os estudos do escoamento intermitente também podem ser aplicados em outras vertentes tecnológicas como a geração de energia nuclear, onde o processo de resfriamento dos reatores dá lugar à formação do escoamento em golfadas.

Dada a intermitência inerente ao escoamento em golfadas, altos gradientes de pressão e vazão podem apresentar-se na tubulação. As vibrações resultantes desses gradientes podem causar o fenômeno de ressonância, que põe em risco a segurança das instalações. Para evitar ou mitigar este fenômeno, é necessário conhecer as características físicas do escoamento em golfadas.

Por outro lado, o vertiginoso avanço do poder de processamento computacional, tem tornado factível o processamento de modelos matemáticos cada vez mais complexos, cuja resolução do sistema de equações precisa de relações de fechamento, as quais são obtidas experimentalmente. Eis, então, a importância de desenvolver estudos experimentais do escoamento em golfadas, estabelecendo relações para a velocidade de translação da bolha alongada, frequência da passagem da célula unitária e comprimento do pistão entre outros.

Finalmente, o presente estudo pode servir como referência para outros estudos experimentais sobre o escoamento intermitente, tanto para tubulações horizontais quanto para tubulações inclinadas ou verticais.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente estudo foi dividido em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo, é apresentada uma introdução à problemática do escoamento intermitente líquido-gás, levando em conta a sua situação dentro da indústria e os conceitos básicos a serem considerados antes de abordar o problema. Após a delimitação do problema, estão mostrados os objetivos a serem atingidos no presente estudo. Aqui também são apresentadas as justificativas para o desenvolvimento deste estudo.

No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica de estudos que podem ajudar a desenvolver este trabalho. São mostrados os conceitos básicos do escoamento intermitente ou em golfadas. Em seguida, são apresentados os principais trabalhos que apresentam relações algébricas e modelos matemáticos para a obtenção dos parâmetros característicos do escoamento intermitente. Também é feita uma revisão-síntese dos trabalhos experimentais similares a este, buscando aproveitar os trabalhos de outros autores para atingir os objetivos aqui propostos.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia experimental seguida para o desenvolvimento do presente estudo. Primeiramente, é descrito o funcionamento da bancada experimental do LACIT-UTFPR, sendo descrita a bancada experimental utilizada. Também é feita uma breve descrição do sensor de malha de eletrodos e o seu princípio de funcionamento. Logo depois, é mostrado o procedimento a seguir para realizar as medições e para o processamento dos dados obtidos, até obter a série temporal da fração de vazio e os parâmetros característicos do escoamento intermitente, assim como as suas distribuições estatísticas.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos dos experimentos, mostrando a grade de testes aqui utilizada e as principais observações e equações deduzidas dos dados. Finalmente, é feita uma verificação das correlações propostas, sendo elaboradas as funções de probabilidade a partir das equações obtidas. Então, as funções de probabilidade elaboradas são comparadas com as distribuições obtidas dos experimentos.

Por último, no quinto capítulo são descritas as conclusões resultantes do desenvolvimento deste trabalho, assim como as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são apresentados os conceitos utilizados nos estudos sobre o escoamento em golfadas, assim como uma revisão dos estudos existentes na literatura sobre o assunto. Na primeira parte do capítulo, são definidos os parâmetros mais utilizados para descrever o escoamento em golfadas. Na sequência, é apresentada uma revisão das principais relações e modelos que sirvam para calcular cada um dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas. Finalmente, são revisados os estudos experimentais sobre o escoamento em golfadas os quais servem como referência para o desenvolvimento do presente estudo.

2.1. Parâmetros característicos do escoamento líquido-gás em golfadas

Em princípio, as velocidades superficiais do líquido e do gás, J_L e J_G , respectivamente, são definidas como as velocidades médias que teria cada fase se estivesse escoando sozinha na mesma tubulação, ou seja, pode ser calculada como a vazão Q da fase dividida pela área da seção transversal da tubulação, A . Para o líquido, a velocidade superficial é dada por:

$$J_L = \frac{Q_L}{A} \quad (2.1)$$

Por sua vez, a velocidade superficial do gás é definida como:

$$J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (2.2)$$

A soma dessas velocidades superficiais é conhecida como a velocidade superficial da mistura, a qual é calculada mediante a expressão seguinte:

$$J = J_L + J_G \quad (2.3)$$

Dado que o escoamento em golfadas é complexo e inerentemente transiente, diversos modelos matemáticos têm sido apresentados para calcular os principais parâmetros do escoamento intermitente. Nessa direção, um dos conceitos mais

importantes, o da célula unitária, foi introduzido Wallis (1969), o qual simplifica a característica transiente do escoamento em uma estrutura intermitente. A Figura 2.1 mostra o esquema característico da célula unitária, assim como parâmetros característicos estudados na maior parte dos estudos relacionados. Observa-se que a região da bolha alongada é dada pela bolha de gás e um filme de líquido escoando debaixo dela. Por sua vez, a região do pistão de líquido é dada pelo líquido como meio contínuo que, em alguns casos, pode conter pequenas bolhas dispersas.

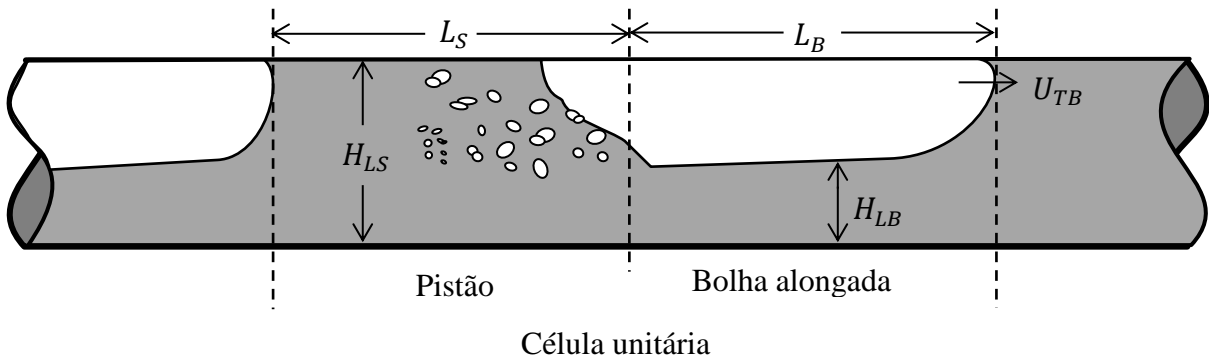


Figura 2.1. Esquema da célula unitária e os parâmetros característicos do escoamento em golfadas.

Na Figura 2.1 pode-se observar que a região da bolha alongada caracteriza-se pela velocidade de translação da bolha alongada, U_{TB} , o comprimento da bolha alongada, L_B , e a fração de líquido, H_{LB} (ou fração de vazio, α_B) dada pela razão entre a área do líquido, A_{LB} , e a área da tubulação, A , para uma determinada seção da região da bolha alongada.

Assim, as frações de líquido na região da bolha alongada, H_{LB} , e na região do pistão de líquido, H_{LS} , são definidas mediante as relações seguintes:

$$H_{LB} = 1 - \alpha_B = \frac{A_{LB}}{A} \quad (2.4)$$

$$H_{LS} = 1 - \alpha_S = \frac{A_{LS}}{A} \quad (2.5)$$

Onde A_{LB} e A_{LS} correspondem às áreas ocupadas pelo líquido nas regiões da bolha alongada e do pistão, respectivamente.

Por outro lado, um parâmetro bastante utilizado nos estudos sobre escoamento em golfadas é o número de Froude da mistura, Fr_J , dado por

$$Fr_J = \frac{J}{\sqrt{gD}} \quad (2.6)$$

onde g é a aceleração da gravidade terrestre e D é o diâmetro interno da tubulação.

Em alguns trabalhos, também é utilizado o número de Reynolds da mistura, Re_J , a qual é definida mediante a equação seguinte:

$$Re_J = \frac{\rho_L J D}{\mu_L} \quad (2.7)$$

onde μ_L é a viscosidade do líquido e ρ_L é a densidade do líquido.

Outro número adimensional, utilizado em algumas correlações de frequência de passagem da célula unitária, f , é o número de Strouhal, St :

$$St = \frac{fD}{J_G} \quad (2.8)$$

A seguir, são descritos os principais parâmetros característicos do escoamento em golfadas, para os quais foram encontradas correlações empíricas e modelos matemáticos que serão descritos brevemente.

2.1.1. Velocidade de translação da bolha alongada

Os primeiros estudos sobre o escoamento em golfadas focaram-se em descrever o movimento da bolha alongada em uma coluna vertical. Primeiramente, Davies e Taylor (1950) analisaram o movimento de uma bolha alongada em uma tubulação vertical com líquido estacionário. Posteriormente, Griffith e Wallis (1959) analisaram o movimento das bolhas alongadas em uma tubulação vertical de escoamento paralelo de líquido e gás.

Alguns anos depois, Nicklin et al. (1962) propuseram que a velocidade de translação da bolha alongada, U_{TB} , pode ser expressa como a soma de uma componente devida ao fluxo de líquido em volta da bolha alongada e uma

componente conhecida como velocidade de deslizamento (*drift velocity*), que ocorre isoladamente no escoamento vertical com líquido estacionário. Posteriormente, no modelo de Taitel e Barnea (1990), esta abordagem foi ampliada para o escoamento horizontal e inclinado.

Nicklin et al. (1962) analisaram ambas as componentes da velocidade de translação da bolha alongada, afirmando que a velocidade de deslizamento depende principalmente da aceleração da gravidade, g , e, em segunda instância, de outros parâmetros como a viscosidade e a tensão superficial, o qual foi corroborado por Fabre (2003).

Assim, a equação da velocidade de translação da bolha alongada proposta por Nicklin et al. (1962) é dada pela equação:

$$U_{TB} = C_0 J + C_\infty \sqrt{gD}, \quad (2.9)$$

onde C_0 e C_∞ são parâmetros adimensionais que dependem de parâmetros físicos do escoamento.

Para uma tubulação horizontal, Benjamin (1968) desenvolveu um modelo matemático do escoamento em golfadas, descrevendo a geração das golfadas a partir do escoamento estratificado. Este modelo foi validado com os resultados experimentais obtidos por Zukoski (1966). Posteriormente, Weber (1981) apresentou uma correlação para a constante C_∞ da Equação (2.9), obtida a partir da hipótese de que a velocidade de deslizamento para o escoamento em golfadas, com líquido escoando, aproxima-se da velocidade de uma bolha no mesmo tubo com líquido estacionário. Isto pode ser expresso mediante a equação:

$$C_\infty = 0,54 - 1,76 \text{Eo}^{-0,56}, \quad (2.10)$$

onde Eo é o número de Eötvös, dada pela equação seguinte:

$$\text{Eo} = \frac{(\rho_L - \rho_G) g D^2}{\sigma_{LG}} \quad (2.11)$$

onde σ_{LG} é a tensão superficial na interface líquido-gás.

Posteriormente, Bendiksen (1984) desenvolveu um estudo experimental em uma tubulação inclinável de -90 até 90° , mostrando que existe uma transição na forma das bolhas, a qual depende do número de Froude da mistura crítico, que identificou aproximadamente em 3,5. Também estimou o valor de C_0 da Equação (2.9), mediante a expressão seguinte:

$$C_0 = \begin{cases} 1,0 & ; Fr < 3,5 \\ 1,2 & ; Fr > 3,5 \end{cases} \quad (2.12)$$

Por sua vez, Nydal et al. (1992) estimaram um valor para C_0 entre 1,2 e 1,3. Eles fizeram uma série de hipóteses para explicar a diferença dos valores obtidos nos seus experimentos e os valores obtidos por Bendiksen (1984). Entre as hipóteses feitas afirmaram que a presença de bolhas dispersas no pistão pode modificar o perfil de velocidades para um mesmo número de Reynolds.

2.1.2. Frequência de passagem da célula unitária

A frequência de passagem da célula unitária, f , é definida como o inverso do tempo de passagem da célula unitária pela seção de medição. A importância da sua predição radica nos problemas operacionais que podem causar os gradientes de vazão no escoamento em golfadas. Para esse fim, diversas abordagens têm sido propostas, sendo apresentadas correlações empíricas, assim como modelos teóricos e semi-teóricos.

Gregory e Scott (1969) desenvolveram um estudo experimental para o escoamento de água e dióxido de carbono em uma tubulação de 19 mm de diâmetro interno (DI). Eles apresentaram uma correlação para a frequência da passagem das células unitárias em função da velocidade da mistura dada pela seguinte relação:

$$f = 0,0226 \left[\frac{19,75}{J} + J \right]^{1,2} \quad (2.13)$$

Alguns anos mais tarde, Heywood e Richardson (1979) desenvolveram um estudo baseado no estudo de Gregory e Scott (1969), apresentando uma correlação

empírica similar, desenvolvida experimentalmente para o escoamento de água e ar em numa tubulação de 42 mm de diâmetro, dada por:

$$f = 0,0364 \frac{J_L}{J} \left[\frac{2,02}{D} + \frac{J^2}{gD} \right]^{1,06}. \quad (2.14)$$

Nos últimos anos, foi apresentada outra correlação para a frequência utilizando parâmetros diferentes das correlações anteriores, como a proposta por Shea et al. (2004), que considera a distância desde o misturador até a seção de medição, L_T ,

$$f = \frac{0,47 J_L^{0,75}}{D^{1,2} L_T^{0,55}}. \quad (2.15)$$

Um modelo teórico para obter a frequência em diferentes condições do escoamento foi apresentado por Taitel e Dukler (1977), que propuseram um modelo que analisa a formação das ondas a partir do escoamento estratificado na entrada da seção de mistura, desenvolvendo as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento. Utilizando uma metodologia similar, Tronconi (1990) desenvolveu um modelo a partir da análise da formação e propagação de ondas a partir do padrão estratificado.

Por outro lado, Fossa et al. (2003) apresentaram uma correlação para o número de Strouhal, St , utilizado algumas vezes ao invés da frequência a célula unitária. Este número adimensional foi sugerido por Azzopardi (1997) como uma função de J_L/J . Assim, a correlação apresentada por Fossa et al. (2003) é dada por

$$St = \frac{fD}{J_G} = \frac{0,044 \left(J_L/J \right)}{1 - 1,71 \left(J_L/J \right) + 0,70 \left(J_L/J \right)^2} \quad (2.16)$$

Por sua vez, Wang et al. (2007) desenvolveram um estudo similar ao de Fossa et al. (2003) e propuseram uma correlação para o número de Strouhal, dada por

$$St = \frac{0,05 \left(J_L/J \right)}{1 - 1,675 \left(J_L/J \right) + 0,768 \left(J_L/J \right)^2} \quad (2.17)$$

2.1.3. Comprimento do pistão

Existe pouca informação para estimar o comprimento do pistão líquido, devido à complexidade do escoamento na traseira das bolhas alongadas. No entanto, foram desenvolvidos alguns modelos para estimar o comprimento do pistão em função da coalescência das bolhas alongadas. Um dos principais modelos para analisar a coalescência das bolhas foi desenvolvido por Dukler e Hubbard (1975), que indicaram que o comprimento do pistão em uma tubulação horizontal fica na faixa de 12 até 20 vezes o diâmetro do tubo. Isto foi corroborado, posteriormente, por Nicholson et al. (1978) e Nydal et al. (1992).

Posteriormente, Barnea e Taitel (1993) desenvolveram um modelo considerando um comprimento mínimo para atingir a estabilidade dos pistões. Eles observaram que o comprimento médio do pistão fica aproximadamente entre 1,5 até 3 vezes o comprimento mínimo de estabilidade.

Um resumo dos resultados obtidos por diferentes autores para calcular o comprimento do pistão de líquido do escoamento bifásico em golfadas é mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Comprimentos médios do pistão de líquido do escoamento em um duto horizontal. Adaptado de Carpintero (2009)

L_s	Fluidos	D	Autores
12D – 30D	Água - ar	1,5"	Dukler e Hubbard (1975)
30D	Água – óleo leve	25,8 mm; 51.2 mm	Nicholson et al. (1978)
30D	Água – óleo leve	25,8 mm; 51.2 mm	Gregory et al. (1978)
15D – 20D; 12D – 16D	Água - ar	53 mm; 90 mm	Nydal et al. (1992)

2.2. Estudos experimentais sobre o escoamento em golfadas

Buscaram-se estudos experimentais do escoamento em golfadas com objetivos similares aos deste trabalho. Assim, são apresentados alguns estudos sobre os parâmetros característicos do escoamento em golfadas.

Um dos principais trabalhos utilizados como referência nos estudos do escoamento líquido-gás em golfadas é o de Bendiksen (1984), que estudou o escoamento de água e ar em uma tubulação inclinável de -90 a 90° e com diâmetros internos (DI) de tubulação de 1,92; 2,42 e 5 cm. Ele desenvolveu uma instrumentação baseada nas propriedades refrativas da água e do ar em relação à luz infravermelha. Também analisou o efeito da inclinação da tubulação nos parâmetros característicos do escoamento intermitente. Adicionalmente, obteve uma correlação para a velocidade do escoamento utilizando o método dos mínimos quadrados.

Posteriormente, Andreussi et al. (1993) desenvolveram um estudo para o escoamento horizontal e inclinado de água e ar, em tubos de 50 e 90 mm DI. Foi utilizado um sensor que mede a capacitância elétrica, desenvolvido por Andreussi et al. (1988), para obter a fração de vazio no pistão, as quais foram comparadas com correlações encontradas na literatura.

Nydal et al. (1992) desenvolveram um estudo para o escoamento água-ar em tubos horizontais de 53 e 90 mm DI, com velocidades superficiais de $0,5 - 20$ m/s para o gás e $0,6 - 3,5$ m/s para o líquido. Eles utilizaram o sensor capacitivo desenvolvido por Andreussi et al. (1988) e obtiveram os valores médios do comprimento da bolha alongada, fração de líquido no pistão e velocidade de translação da bolha alongada, assim como as suas respectivas distribuições estatísticas e desvios padrão.

Fossa et al. (2003) utilizaram um sensor de impedância elétrica de anéis para medir a série temporal de fração de vazio do escoamento horizontal em golfadas de água e ar. Eles realizaram uma análise estatística da frequência, os comprimentos característicos e a fração de vazio, o que foi verificado pelas imagens obtidas com uma câmera digital. Eles desenvolveram o seu estudo em tubulações de 40 e 60 mm DI, com faixas de velocidades superficiais de $0,3 - 4,0$ m/s para o gás e

0,6 – 3,0 m/s para o líquido. Os resultados obtidos foram comparados com correlações encontradas na literatura, e concluíram que os resultados obtidos por eles são aceitáveis. Adicionalmente, utilizaram números adimensionais para obter uma correlação para o cálculo da frequência da passagem das células unitárias.

Shemer (2003) desenvolveu um estudo analisando a natureza transiente do escoamento em golfadas, propondo uma metodologia estatística para a sua descrição. O autor utilizou tubulações de 0,024 m ID e um sensor de fibra óptica, para medir localmente a fase correspondente. Também utilizou a visualização pela técnica do PIV (velocimetria por imagens de partículas) para fazer medidas locais da velocidade do líquido. Finalmente, analisou o comportamento das funções de distribuição de probabilidade (PDF) do comprimento do pistão.

Wang et al. (2007) realizaram testes para o escoamento intermitente de água e ar em uma tubulação horizontal de 50 mm DI. Foram medidos: a velocidade das bolhas alongadas, a frequência da célula unitária e o comprimento das bolhas alongadas. Seguidamente, eles apresentaram correlações para esses parâmetros. Também observaram que a velocidade das bolhas alongadas não depende somente do número de Froude, mas, para altas velocidades superficiais da mistura, também depende do comprimento da linha bifásica. Finalmente, concluíram que, conforme cresce a velocidade superficial do líquido, o comprimento das bolhas permanece quase inalterado, enquanto a frequência de passagem da célula unitária aumenta.

Hernandez (2007) desenvolveu um estudo em tubulações de 34 e 67 mm DI, inclináveis de 0° até 90° e com o escoamento de água e ar. Foi desenvolvido um sensor capacitivo para identificar os padrões correspondentes a uma faixa de velocidades superficiais de 0,15 a 8,9 m/s de ar e 0,04 a 0,7 m/s de água. A partir da obtenção das séries temporais de fração de líquido, calculou a distribuição da velocidade da bolha alongada, fração de líquido no pistão e comprimento da bolha alongada. Ele comparou os valores médios desses parâmetros com diversas correlações encontradas na literatura. Este é um trabalho extensivo que serviu como referência primária do presente estudo.

Posteriormente, Carpintero (2009) desenvolveu um estudo utilizando água e ar em uma tubulação horizontal de 54 mm DI. As medições foram feitas nas seções a

223D e 268D a partir da entrada do misturador. Os dados foram adquiridos com o sensor de malha de eletrodos, obtendo-se a frequência da célula unitária, assim como o comprimento e velocidade da bolha alongada. Paralelamente, ele utilizou o velocímetro por imagens de partículas (PIV) para obter o perfil de velocidades do líquido e a velocidade das bolhas dispersas no pistão.

Dos Reis e Goldstein (2010) desenvolveram um estudo do escoamento bifásico água-ar em uma tubulação horizontal de 34 mm DI e de 5 m de comprimento desde o misturador, considerando 13 pontos de medição com velocidades superficiais de 1,371 a 5,926 m/s para o gás e 0,198 a 0,797 m/s para o líquido. Eles utilizaram um sensor baseado na medida da capacitância elétrica para obter uma série temporal da fração de vazio, a função densidade de probabilidade (PDF) e a densidade espectral de potência (PSD) para caracterizar e identificar os diversos padrões de escoamento.

Posteriormente, Da Silva et al. (2011) desenvolveram um trabalho em condições similares às que foram desenvolvidas no presente estudo: um tubo de 25,8 mm DI e 9 m de linha multifásica. Eles tinham como objetivo caracterizar alguns tipos de escoamento (incluindo o padrão de golfadas) utilizando o sensor de malha de eletrodos (WMS). Neste trabalho, foi utilizada uma metodologia proposta por Da Silva (2008) para obter a fração de vazio a partir da série temporal da tensão elétrica. Eles testaram escoamentos com velocidades superficiais de 0,2 a 2 m/s para o gás e de 0,1 até 4 m/s para o líquido. Os resultados da fração de vazio na bolha, frequência da célula unitária e fração de líquido no pistão foram comparados com correlações empíricas propostas em outros trabalhos. O presente estudo foi desenvolvido utilizando a metodologia proposta por Da Silva et al. (2011) para o escoamento em golfadas.

2.3. Síntese do capítulo

Em resumo, nos trabalhos encontrados na literatura foi observado que:

- A maior parte dos estudos têm desenvolvido diferentes metodologias e técnicas de medição para a extração dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas. No entanto, essas correlações são válidas para uma

faixa limitada à ordem nas quais foram medidas e são elaboradas levando em conta poucos parâmetros do escoamento.

- A metodologia utilizada por cada autor muitas vezes não fica clara. A maior parte dos trabalhos não apresentam informações detalhadas sobre a metodologia utilizada para o processamento dos dados e para a extração dos parâmetros característicos, sendo que, em muitos casos, os parâmetros obtidos podem variar consideravelmente em função do algoritmo de processamento.
- Foi verificada a discrepância entre algumas correlações para calcular os parâmetros característicos do escoamento em golfadas.
- A maior parte das análises com os resultados experimentais foram realizadas utilizando os parâmetros médios do escoamento, desconsiderando as distribuições estatísticas correspondentes.

A respeito dos pontos citados acima e visando contribuir para o estado da arte sobre o assunto, as atividades realizadas no presente estudo foram concentradas para:

- Estabelecer uma grade de teste o suficientemente ampla para abranger diferentes configurações dentro do padrão do escoamento em golfadas, com a finalidade de estabelecer correlações empíricas válidas para uma ampla faixa de vazões de líquido e gás.
- Desenvolver uma metodologia adequada para a aquisição e processamento dos dados, assim como para a extração dos parâmetros característicos.
- Validar as correlações já existentes nos trabalhos apresentados acima com as medidas feitas no presente estudo.
- Fixar uma metodologia para a análise dos resultados obtidos, representados em distribuições de probabilidade, observando a influência dos parâmetros de entrada no comportamento da função normal ou log-normal resultante.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

No presente capítulo será apresentada a metodologia experimental necessária para o desenvolvimento do presente estudo. Primeiramente, é apresentada a bancada experimental utilizada, assim como os sensores de vazão e pressão utilizados e a metodologia para fixar os parâmetros de entrada. Em seguida, é descrito brevemente o sensor de malha de eletrodos e os princípios básicos do seu funcionamento. Também se descreve o procedimento utilizado para a aquisição e processamento dos dados obtidos com o sensor utilizado.

3.1. Circuito experimental

Para a realização das medidas experimentais, foram utilizadas as instalações do Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT), da UTFPR, adaptado especificamente para atingir os objetivos do presente estudo. O circuito do LACIT consta de duas linhas de alimentação, para líquido e gás, e uma linha bifásica horizontal de teste de 9 m de comprimento. Conta com um sistema de monitoramento para o escoamento bifásico de água e ar, controlando as propriedades de interesse na entrada de cada linha monofásica, assim como na linha bifásica. O esquema representativo da bancada é mostrado na Figura 3.1.

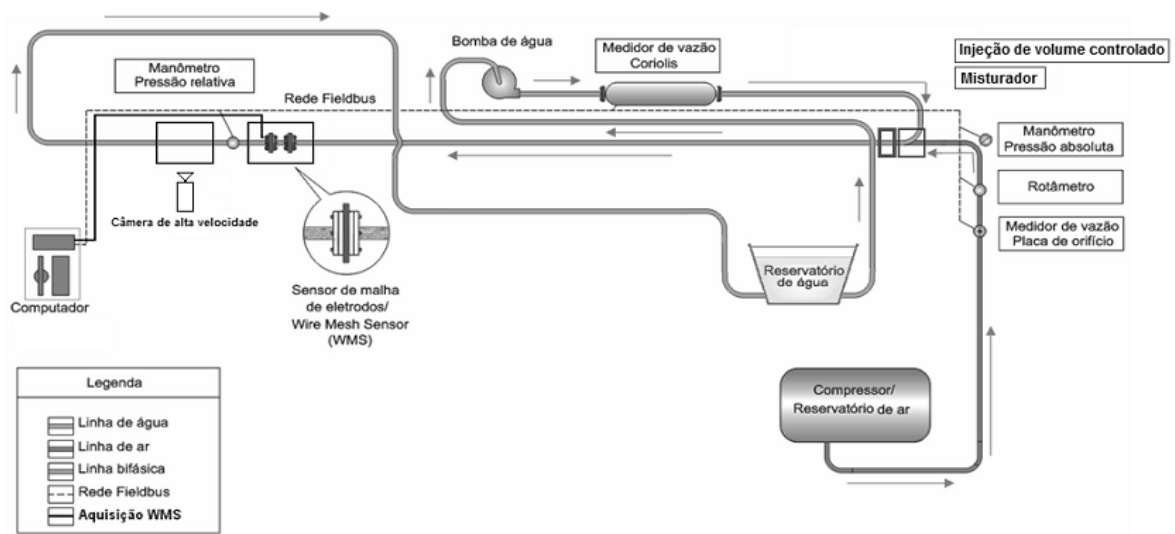


Figura 3.1. Esquema da bancada experimental do LACIT.

Basicamente, a bancada experimental mostrada na Figura 3.1 é composta por:

- Uma linha contínua de líquido impulsionada por uma bomba centrífuga que garante o escoamento. Após a bomba, a vazão mássica do líquido é monitorada por um medidor do tipo Coriolis. Finalmente, é utilizado um reservatório para garantir a continuidade do circuito e o fornecimento de líquido à bomba.
- Uma linha de gás, que é proveniente de reservatórios de 500 e 100 litros. Os reservatórios garantem a estabilidade da vazão de gás, sendo pressurizados por um compressor alternado. Ao deixar os reservatórios, o ar comprimido escoar por um rotâmetro e um sensor de pressão e temperatura. O rotâmetro e os sensores são necessários para calcular a vazão real do gás.
- Uma linha bifásica, que tem seu início em um misturador gás líquido e consiste de uma tubulação horizontal com 9,2 m de comprimento e 25,8 mm DI. Perto do final da linha bifásica, foi colocado um par de WMS gêmeos para obtenção dos parâmetros característicos do escoamento intermitente. Também foi instalada uma câmera de alta velocidade para validação dos dados do WMS. Finalmente, foi utilizado um sensor de pressão e temperatura para cálculo das velocidades superficiais na seção de teste.

3.1.1. Linha de líquido

O reservatório do líquido tem uma capacidade de 350 litros e deve fornecer a quantidade suficiente de líquido na linha durante os testes. A bomba centrífuga, necessária para impulsar o líquido circulante na linha, é da marca Fabo, modelo BCIE602/7822, com valores máximos de 20 m.c.a. de pressão, 15000 l/h de vazão e frequência de rotação do eixo de 60 Hz. A bomba é controlada por um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW08.

Para medir a vazão de líquido na linha monofásica, foram utilizados dois sensores tipo Coriolis, um da marca Micromotion, modelo F050S11, para vazões de até 1,5 l/s, e outro da marca Krohne, modelo Optimass 7300C, para vazões superiores a 1 l/s. Os medidores de vazão são conectados ao sistema supervisório através de uma rede industrial do tipo *Fieldbus Foundation*.

3.1.2. Linha de gás

O compressor alternativo utilizado para a impulsão do ar é da marca PEG, com dois pistões em V, deslocamento teórico de $10 \text{ pés}^3/\text{min}$, volume do reservatório de 100 litros e uma pressão máxima de 150 psig. Dado que o compressor apresenta oscilações na pressão próprias do seu funcionamento, dois vasos de pressão de 500 e 100 litros de capacidade foram colocados em série, nessa ordem, com a finalidade de estabilizar o escoamento de ar e manter a vazão constante.

A vazão de gás foi monitorada utilizando quatro rotâmetros da marca Rheotest Haake GMBH com diferentes escalas, cobrindo uma grande faixa de vazões.

3.1.3. Linha bifásica

Ambas as linhas de líquido e gás são unidas por um misturador projetado especificamente para que a água não ingresse na linha de gás e para assegurar que a vazão de ar seja mais estável na linha bifásica, que consiste em uma tubulação horizontal de acrílico transparente com 3 mm de espessura, 9,2 m de comprimento e 25,8 mm DI. A tubulação foi posicionada sobre suportes plásticos de altura ajustável a fim de garantir a sua horizontalidade. A inclinação foi ajustada por meio do uso de um nível em várias seções da tubulação. Com um tubo capilar de água, assegurou-se que a seção do misturador e o final da linha estavam no mesmo nível. Para realizar as uniões entre seções da tubulação foram utilizadas luvas flexíveis e abraçadeiras.

Os testes foram realizados com o sensor de malha de eletrodos (WMS), descrito na seção 3.2 e com uma câmera de alta velocidade para verificar os dados obtidos pelo WMS. A seção de testes foi determinada com a finalidade de garantir o desenvolvimento do escoamento bifásico. Assim, a câmera foi colocada a 7,3 m do misturador, enquanto o WMS foi instalado 20 cm depois da câmera. A seção de filmagem consiste na câmera de alta velocidade, descrita na seção 3.1.4, uma caixa de acrílico transparente com dimensões $200 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ cobrindo o tubo, com a finalidade de reduzir os efeitos refrativos da luz, assim como uma fonte luminosa adequadamente instalada para contrastar as fronteiras das bolhas do resto do escoamento. Por sua vez, a seção de medição do WMS é dada por dois sensores gêmeos instalados em série, com uma separação de 37,5 mm, descritos na seção 3.2 e

mostrado no esquema da Figura 3.2. A eletrônica que controla o WMS ocupa um espaço de $500 \times 300 \times 300$ mm e foi instalada no final da linha bifásica.

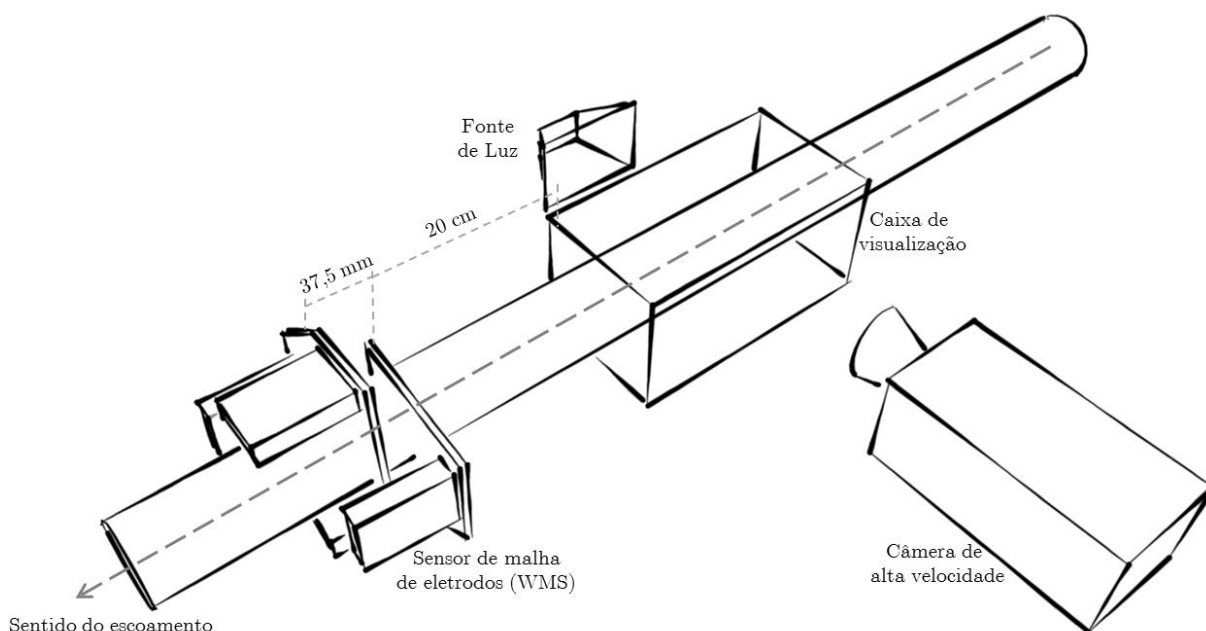


Figura 3.2. Esquema de instalação do WMS e da câmera de alta velocidade.

Na seção intermediária entre a câmera e o WMS foi instalado sensor de pressão relativa e temperatura similar ao instalado na linha do gás, marca Rosemount, modelo 3051TG, de até 150 psig, a fim de calcular as vazões na seção de teste.

Adicionalmente, foi necessário utilizar externamente um barômetro, dado que o cálculo da velocidade superficial do gás é feito com a pressão absoluta. O barômetro é da marca *Greisinger*, modelo GMH3160-12.

3.1.4. Câmera de alta velocidade

A câmera utilizada para verificar os dados adquiridos pelo WMS é da marca IDT, modelo *MotionPro X3*, que atinge os 1000 *frames/segundo* com uma resolução de 1280×1024 pixels, tempo de exposição mínimo de $1 \mu s$, 4 GB de memória de armazenamento e dimensões de $162 \times 95 \times 95$ mm sem a lente.

O foco e o domínio abrangido pela câmera devem ser ajustados, procurando o contraste da interface líquido-gás, e deixar o resto do escoamento com uma cor

uniforme. A área abrangida pela câmera foi como sendo 6,25 cm de comprimento do tubo, com uma resolução de 500×204 pixels.

No programa da câmera, o *Motion Studio*, foi introduzido o tempo de exposição, assim como a taxa de aquisição das imagens. O tempo de aquisição é determinado com a finalidade que a frente de uma mesma bolha seja registrada pelo menos duas vezes na seção de filmagem da câmera. Para isso foi calculada a velocidade da correlação de Bendiksen (1984), a qual é mostrada no programa de aquisição.

Utilizando essa velocidade, a distância de alcance da câmera e uma constante para calcular a taxa necessária para que a bolha apareça quatro vezes na câmera, é calculada a taxa necessária mediante a relação

$$\text{Taxa de aquisição} \approx 4 \times \frac{\text{Velocidade da bolha (Bendiksen)}}{\text{Distância de alcance da câmera}}. \quad (3.1)$$

O processamento das imagens é feito utilizando-se um algoritmo implementado em *Matlab*, desenvolvido por Amaral et al. (2013), que identifica a frente da bolha e, posteriormente, sua traseira, para finalmente calcular os parâmetros característicos do escoamento em golfadas, para a verificação dos dados do WMS.

3.2. O sensor de malha de eletrodos (WMS)

No estudo do escoamento em golfadas, diversas técnicas têm sido utilizadas para medir os seus parâmetros característicos, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens. Para escolher um determinado sensor, devem ser considerados fatores importantes como as resoluções espacial e temporal, o custo do equipamento e as limitações de cada tipo de sensor com relação às condições em que serão utilizadas. Da Silva (2008) compilou um estado da arte dos sensores para o escoamento bifásico e fez uma comparação entre os diferentes tipos de sensores. Da Silva (2008) considerou que o sensor de malha de eletrodos (WMS) possui uma boa relação entre custo e resoluções temporal e espacial. Além disso, não apresenta limitações consideráveis para o desenvolvimento do presente estudo.

O WMS proposto por Prasser et al. (1998) foi utilizado no escoamento líquido-gás, sendo um sensor baseado na medida da condutividade elétrica local da mistura. Alguns anos mais tarde, Da Silva et al. (2007) continuou o desenvolvimento do WMS, propondo um WMS baseado em medidas da capacitância elétrica.

No presente estudo, foi utilizado um WMS similar ao desenvolvido por Da Silva (2008), que consiste em dois arranjos paralelos de 12 eletrodos, cada eletrodo com uma espessura de 0,012 mm e separados por 2,1 mm um de outro. Ambos os arranjos são perpendiculares entre si e estão separados por 1,5 mm, formando uma grade de 12×12 fios. Um dos arranjos é excitado eletricamente, funcionando como emissor, enquanto o outro funciona como receptor. O sinal resultante é dependente da impedância elétrica do fluido presente na folga de 1,5 mm entre cada nó emissor-receptor. O esquema da configuração dos fios do WMS é mostrado esquematicamente na Figura 3.3.

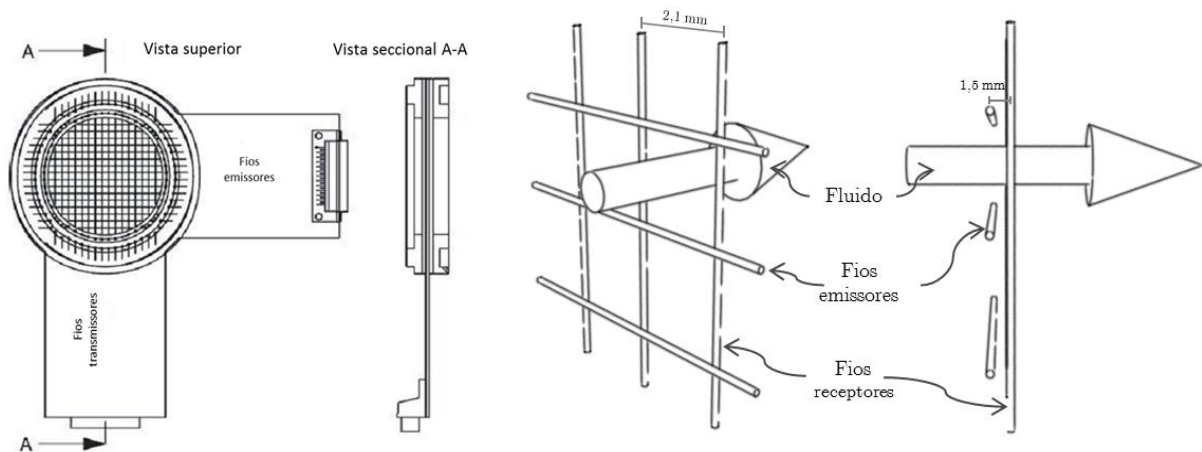


Figura 3.3. Vistas e esquema da configuração dos fios do WMS.

A partir da tensão elétrica obtida dos fios receptores pode ser obtida a fração de vazio correspondente a cada ponto de cruzamento. Para isso foi utilizado o algoritmo de processamento proposto por Da Silva (2008) e descrito no Apêndice B.

No entanto, observa-se que, além da fração de vazio, um dos parâmetros principais do escoamento em golfadas é a velocidade da bolha alongada, o qual não se pode obter com um único WMS. Para esse fim, são colocados dois WMS em série,

como mostrado na Figura 3.4, posicionados a uma distância de 37,5 mm um do outro, obtendo cada um deles a sua própria série temporal de fração de vazio.

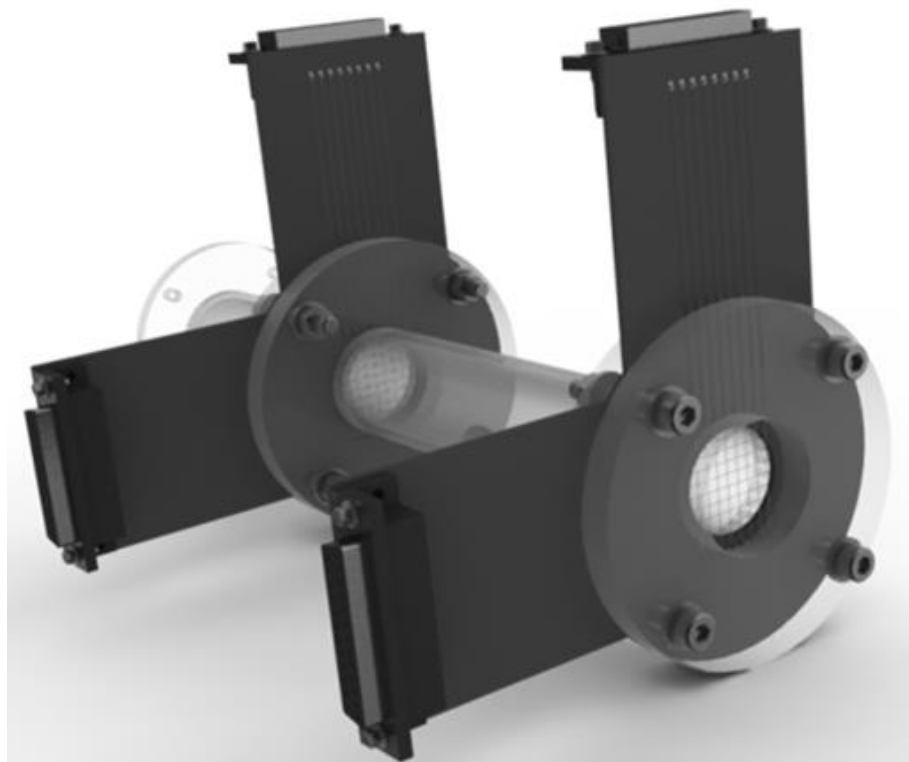


Figura 3.4. Esquema de dois WMS gêmeos para a medição da velocidade e dos comprimentos característicos do escoamento em golfadas.

A velocidade da bolha alongada é obtida aplicando-se um algoritmo de processamento entre os sinais de cada sensor. O algoritmo desenvolvido no presente estudo procura identificar uma mesma bolha em cada uma das séries.

Para uma melhor observação dos dados obtidos pelo WMS, Dos Santos (2011) desenvolveu um programa para extrair os dados obtidos. O programa apresentado por Dos Santos (2011) consta de um algoritmo de identificação da bolha, onde além de apresentar os resultados detalhados de fração de vazio para cada nó, também calcula os parâmetros do escoamento, como velocidade, frequência, vazão do gás, assim como comprimentos característicos, os quais são calculados a partir da velocidade da bolha.

3.3. Procedimento das medições

Para atingir os objetivos do presente estudo, primeiramente foi estabelecido o procedimento de cálculo da vazão do gás no rotâmetro. Posteriormente foram calculadas as velocidades superficiais de líquido e gás, que servem como parâmetros de entrada. Seguidamente, foram estabelecidos os pontos de medição do presente estudo, levando em conta as limitações da bancada experimental utilizada.

Os sensores de pressão e temperatura, assim como o sensor de vazão mássica do líquido, são ligados a uma rede *Foundation Fieldbus* e acessados por um microcomputador equipado com uma placa de aquisição de barramento PCI, da marca *National Instruments*.

Os testes foram realizados fixando o valor de J_L e mudando gradativamente o valor de J_G . Cabe ressaltar que durante a realização dos experimentos, foi aguardada a estabilização das vazões de gás e de líquido.

Durante a realização dos testes, após ligar os sensores e o programa de aquisição de dados, foi realizado o seguinte procedimento para cada um dos pontos medidos:

- 1) Verificação do estado da limpeza e secador do WMS. Isto é feito sempre antes de toda medição, devido a que, embora o circuito seja um circuito contínuo e sejam utilizados mecanismos de limpeza, o contínuo escoamento de água pode trazer impurezas que ficam entre os fios do WMS.
- 2) Verificação do correto funcionamento e da comunicação dos sensores de vazão mássico e dos sensores de pressão e temperatura. Isto é normalmente feito por inspeção visual em cada sensor e verificando a medida no programa de aquisição de dados.
- 3) Verificar a correta disposição das válvulas nas linhas de gás ou líquido. Isto é uma medida de segurança dos rotâmetros e sensores de pressão, que podem sofrer danos nos picos do início do escoamento do gás.
- 4) Verificar a pressão de armazenamento dos reservatórios do gás, para garantir o fornecimento constante, procurando mantê-los a uma pressão de 8 bar. Como medida de segurança, o sistema liga automaticamente o compressor quando a pressão dos reservatórios diminui até 4 bar.

- 5) Verificar o correto funcionamento do WMS e da câmera, assim como das interfaces individuais respectivas.
- 6) Calibrar o WMS para tubo vazio, V_L , necessário como medida de referência, e que foi descrito na seção 3.2.
- 7) Verificar o estado de submersão da bomba e purgá-la (pois a presença de partículas de ar dentro do impulsor origina o fenômeno de cavitação).
- 8) Calibrar o WMS para tubo totalmente preenchido do líquido, analogamente ao ponto (4) desta seção.
- 9) Introduzir os valores de J_L e J_G , do teste específico a ser realizado, no programa de aquisição de dados.
- 10) Verificar se o J_G correspondente é atingido, o qual deve estar entre 20 e 85 SKT da escala do rotâmetro.
- 11) Verificar a estabilização dos valores de J_L e J_G indicados, pois sempre que são introduzidos valores novos das velocidades superficiais o sistema requer um tempo para a sua estabilização, que pode ser de alguns minutos.
- 12) Realizar novamente os passos (4) e (5)
- 13) Iniciar os testes simultaneamente, observando a estabilidade das vazões na seção de teste e o correto funcionamento dos sensores e da câmera.
- 14) Salvar e verificar os dados obtidos pelos programas de aquisição, WMS e câmera.

3.4. Processamento dos dados

Após obter a série temporal da fração de vazio, como descrito no Apêndice B,, os dados devem ser processados para obter os parâmetros característicos da seção 2.1. Com este objetivo, foi desenvolvido um algoritmo no programa *Matlab*, baseado primeiramente na transformação do sinal da fração de vazio em um sinal binário. Posteriormente, são obtidos os parâmetros do escoamento em golfas mediante a definição de cada um deles, estabelecendo o conceito de célula unitária no sinal binário. Finalmente, é feito o tratamento estatístico do sinal, para estabelecer as características estatísticas dos parâmetros.

3.4.1. Tratamento da série temporal de fração de vazio

A série temporal de fração de vazio depende das características do escoamento. Pode-se ter o caso de um pistão não-aerado, para baixas vazões, e um pistão aerado, no caso de altas vazões. A Figura 3.5 mostra uma série temporal característica que, no caso mostrado, corresponde a um pistão aerado.

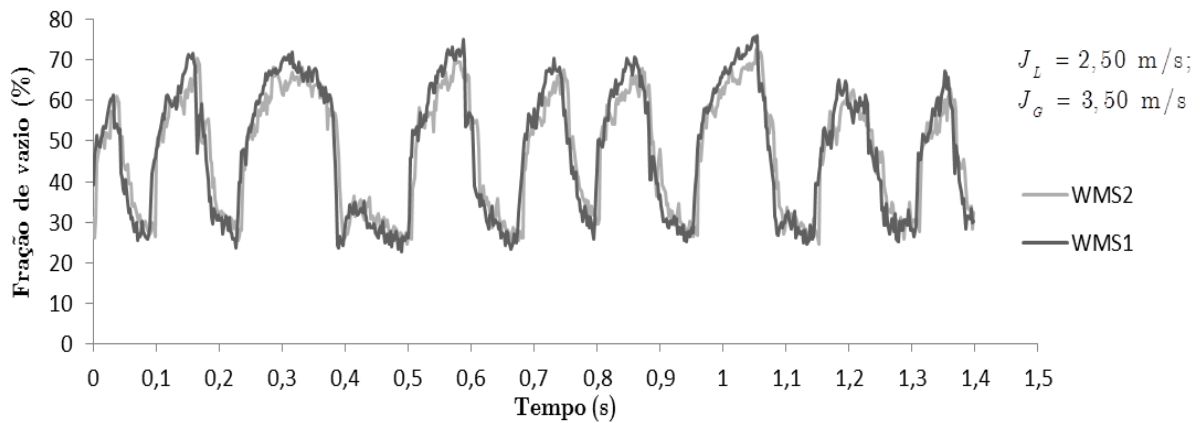


Figura 3.5. Série temporal característica para o escoamento intermitente com pistão aerado,.

Para analisar o escoamento em golfadas através da série temporal, foi desenvolvido um algoritmo mais geral que pudesse tratar ambos os casos com a manipulação de parâmetros internos para o processamento.

Primeiramente, foi utilizada uma função binária, $u(\alpha, t)$, associada a um fator de corte (FC), para identificar se um ponto da série temporal pertence à região da bolha alongada ou à região do pistão. A função binária é análoga à função indicadora de fase proposta por Bertola (2003), e cuja função é definida similarmente à função escalão unitária, dada por

$$u(\alpha, t) = \begin{cases} 0 & ; \text{ se } \alpha < \text{FC (Região do pistão)} \\ 1 & ; \text{ se } \alpha > \text{FC (Região da bolha)} \end{cases} \quad (3.2)$$

O FC varia entre a mínima e a máxima fração de vazio de uma série temporal. Esse fator é específico para cada série e deverá se analisar a informação resultante correspondente a vários FC. Gómez (2010) analisou a dependência funcional do FC

com relação ao número de bolhas para cada valor de FC, considerando que esse FC tem um único valor para ambos WMS no mesmo ponto.

No presente estudo foi desenvolvido um algoritmo para o processamento do sinal correspondente, o qual é descrito no Apêndice C. O algoritmo utilizado levou em consideração o ruído elétrico que pode interferir no sinal do WMS e outros fatores externos da medição.

3.4.2. Obtenção dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas

Na medição feita no presente estudo, um dos dados de entrada do WMS é a taxa de aquisição, a qual foi fixada em 500 *frames* por segundo, seguindo a recomendação feita por Dos Santos (2011). O tempo de passagem é dado pelos períodos respectivos, T_B para a bolha e T_S para o pistão, os quais são definidos por

$$T_B = \frac{\text{Número de } frames \text{ durante a passagem da bolha}}{\text{Taxa de aquisição (Hz)}} \quad (3.3)$$

$$T_S = \frac{\text{Número de } frames \text{ durante a passagem do pistão}}{\text{Taxa de aquisição (Hz)}} \quad (3.4)$$

Por outro lado, com o processamento da série temporal de fração de vazio e com o cálculo da função binária correspondente, definida na equação (3.2), são identificadas cada uma das bolhas e o seu subsequente pistão. Assim, as frações de vazio podem ser obtidas em cada região, calculando-se a média das regiões correspondentes em função do seu período, as quais são dadas por

$$\alpha_B = \frac{1}{T_B} \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (3.5)$$

$$\alpha_S = \frac{1}{T_S} \sum_{i=1}^m \alpha_i \quad (3.6)$$

onde n é o número de *frames* correspondentes ao passagem da bolha, enquanto que m é o número de *frames* do pistão correspondente.

Além do anterior, a frequência da célula unitária, f , é definida como a inversa do tempo de passagem da célula unitária. Assim,

$$f = \frac{1}{T_B + T_S} \quad (3.7)$$

Como mencionado na seção 3.2, foram utilizados um par de sensores gêmeos para obter a velocidade da bolha alongada, U_{TB} . O procedimento a seguir é o mesmo do que o descrito na seção 3.4.1, a fim de obter a função binária para cada um dos sensores, os quais foram instalados com uma separação entre si, d_{WMS} , de 37,5 mm.

O esquema da obtenção da velocidade da i -ésima bolha alongada é mostrada na Figura 3.6, onde se podem observar os sinais binários de ambos os sensores gêmeos. A defasagem entre ambos os sinais na identificação de uma mesma bolha é medida na diferença de tempo, na frente da bolha, dado por Δt_B . Além disso, existe uma defasagem no começo do pistão, dado por Δt_s , mas, nesse caso, a modelagem baseia-se na hipótese de Fabre (2003), que propõe que toda a célula unitária escoar com a velocidade da frente da bolha, e, portanto, somente é necessário obter a velocidade da frente da bolha para calcular os comprimentos característicos. Observa-se que na Figura 3.6, B_i representa a i -ésima bolha, enquanto P_i representa o i -ésimo pistão.

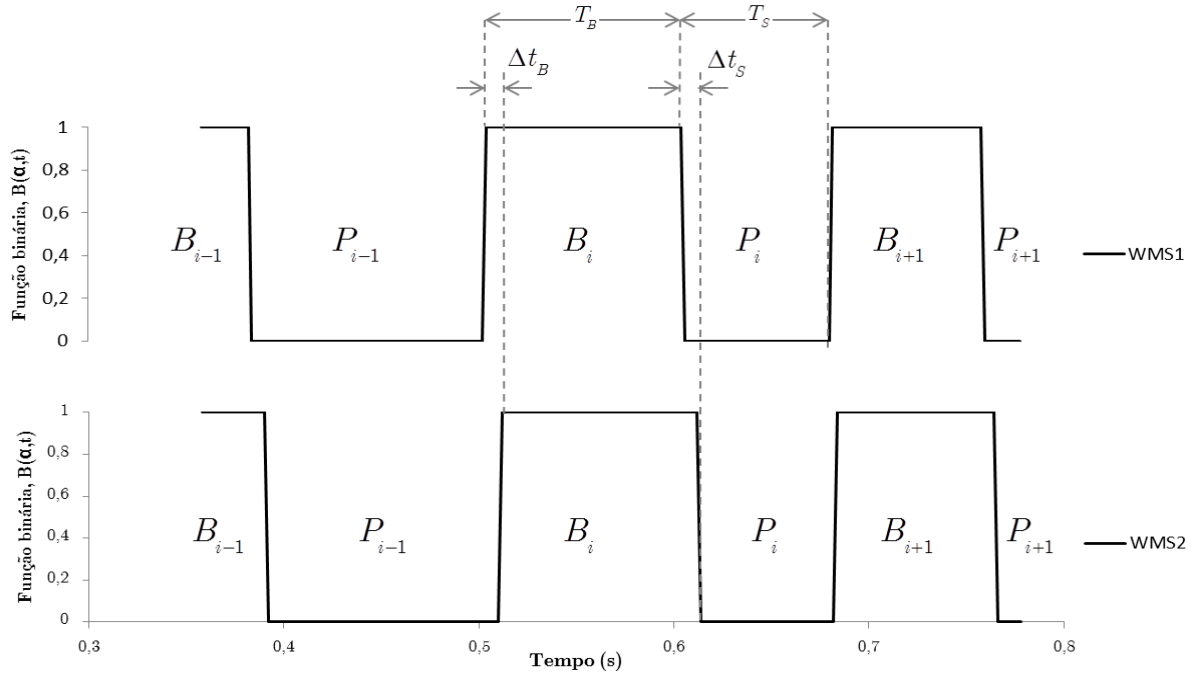


Figura 3.6. Esquema de obtenção da velocidade da bolha alongada

Da Figura 3.6 pode-se observar que a velocidade da bolha alongada pode ser calculada mediante a relação da distância entre os sensores, d_{WMS} , e a defasagem entre as frentes da bolha identificadas em cada sensor, Δt_B , como

$$U_{TB} = \frac{d_{WMS}}{\Delta t_B}. \quad (3.8)$$

Conhecendo a velocidade da bolha alongada, é possível obter, também, os comprimentos da bolha, L_B , e do pistão, L_S , os quais são dados por

$$L_B = U_{TB} \times T_B \quad (3.9)$$

$$L_S = U_{TB} \times T_S \quad (3.10)$$

Pode-se observar que os períodos utilizados foram os do primeiro sensor, com a finalidade de minimizar os efeitos da intrusão do WMS.

3.4.3. Repetitividade das medidas

Cada um dos pontos da grade de testes foi repetido três vezes, com a finalidade de garantir a repetitividade do experimento. A comparação foi feita utilizando a distribuição de probabilidade da fração de vazio obtida, como mostrado na Figura 3.7. Observando qualitativamente, verifica-se uma diferença nas probabilidades de frações de vazio menores a 0,10, a qual pode ser causada por algum ruído elétrico que possa porventura ter afetado as medições, embora a bancada experimental esteja aterrada eletricamente. Isto afeta diretamente na medida da fração de vazio no pistão, cujos valores devem ser verificados.

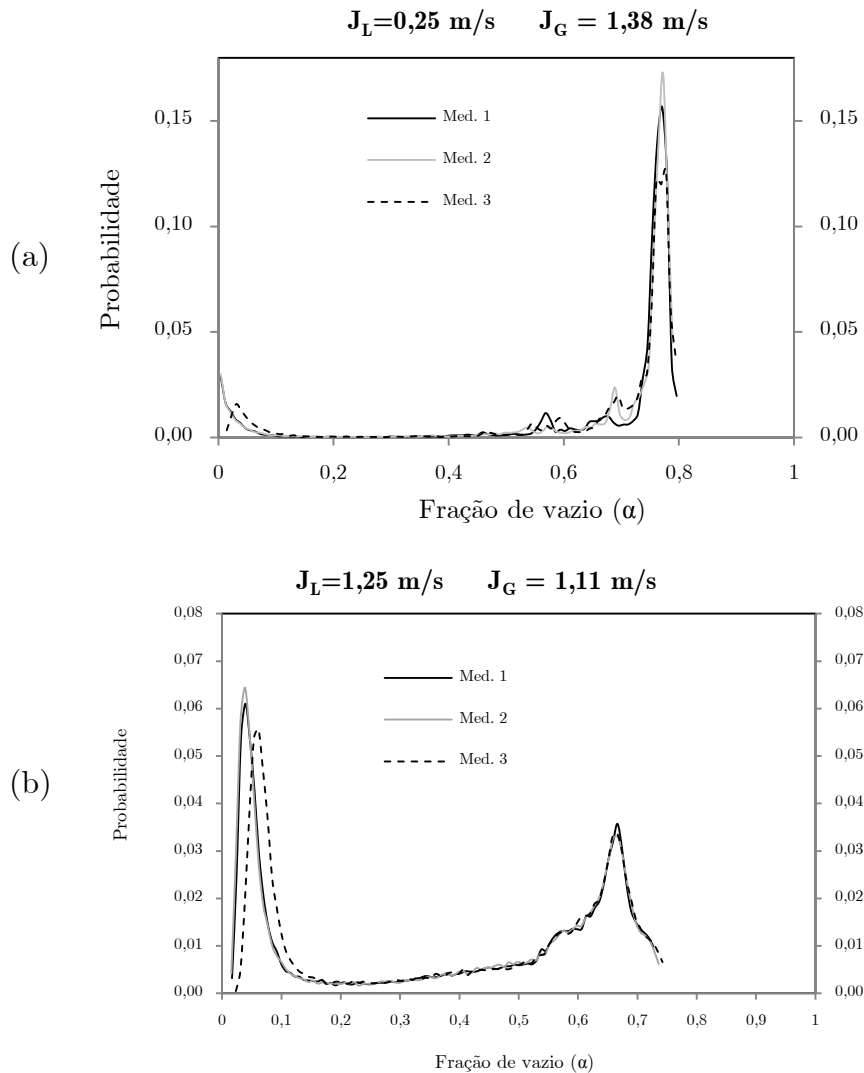


Figura 3.7. Verificação da repetitividade das três medidas realizadas para dois pontos da grade de testes do presente estudo.

3.4.4. Verificação dos valores médios

Antes de serem caracterizados estatisticamente, os parâmetros médios obtidos com o WMS devem ser verificados. Para esse fim, foram processadas as imagens obtidas com a câmera de alta velocidade, sendo obtidas as velocidades da bolha alongada para cada um dos pontos medidos. Para isso, foi utilizado o algoritmo proposto por Alves (2013). Então, foram comparadas as velocidades obtidas pelo WMS e pela câmera, resultando no gráfico mostrado na Figura 3.8, observando-se uma boa concordância entre ambas.

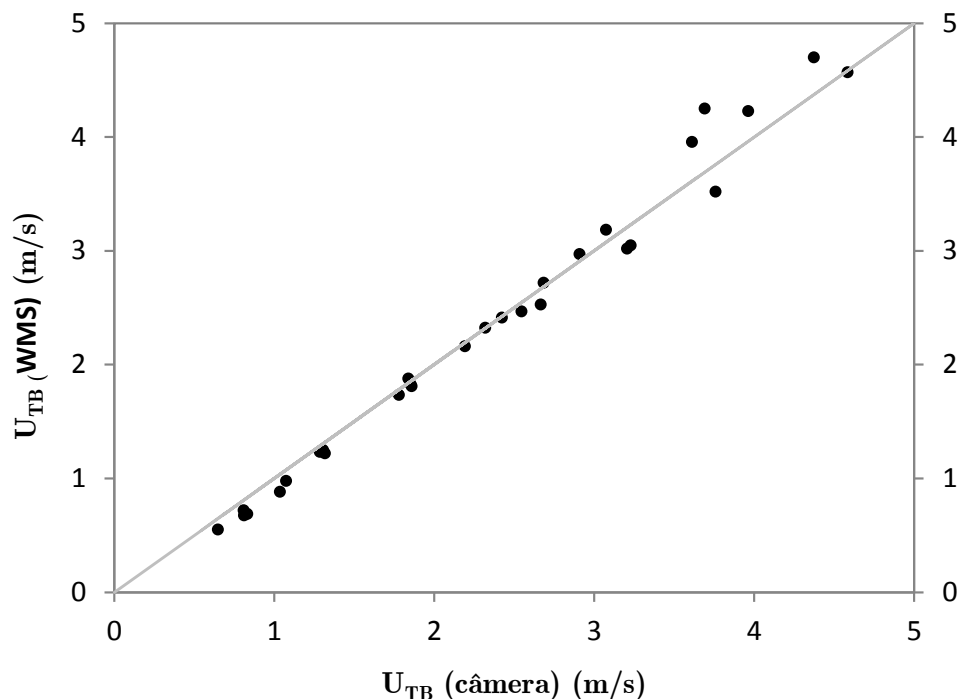


Figura 3.8. Comparação da velocidade da bolha alongada, obtida pela câmera de alta velocidade e pelo WMS.

3.4.5. Caracterização estatística do escoamento em golfadas

Após obter os parâmetros característicos para cada célula unitária, observa-se que os valores não são constantes ao longo do tempo, e variam em uma faixa determinada. Essa faixa pode ser caracterizada mediante histogramas do número relativo de ocorrência de um valor determinado dentro de todos os testes.

Em alguns casos, a distribuição pode se desenvolver em uma estreita faixa como, por exemplo, no caso da velocidade. Não obstante, em outros casos, a faixa pode ser bastante ampla, como ocorre com os comprimentos característicos.

Para analisar essas distribuições, é necessário utilizar conceitos estatísticos relativos a um dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas, que pode ser generalizado mediante uma função $x(t)$.

A função densidade de probabilidade (PDF), dada pela função $p(x)$, representa a probabilidade, Pr , de ocorrência de $x(t)$ no intervalo limitado por x^* e $x^* + \Delta x$, sendo definida como

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\text{Pr}[x^* < x(t) \leq x^* + \Delta x]}{\Delta x} \quad (3.11)$$

Assim, a probabilidade de ocorrência de $x(t)$ em uma faixa de x até $x + \Delta x$ em um intervalo de tempo T pode ser determinada assumindo-se que T é suficientemente grande para que as propriedades estatísticas sejam representativas da série temporal. Então, a quantidade de vezes que acontece o fenômeno dentro do intervalo T entre x e $x + \Delta x$ é dado por T_x , portanto,

$$\text{Pr}[x < x(t) \leq x + \Delta x] = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{T_x}{T} \right). \quad (3.12)$$

Combinando as equações (3.11) e (3.12) tem-se que

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0; T \rightarrow \infty} \left(\frac{T_x}{\Delta x T} \right) \quad (3.13)$$

Outro conceito importante é o da média de dados agrupados de uma variável $x(t)$, com símbolo \bar{x} e dada por

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i p(x_i). \quad (3.14)$$

onde n é o número de intervalos de classe utilizados e $p(x)$ é a probabilidade de ocorrência de x_i . Além da média, outro conceito muito utilizado é o desvio padrão, definido como

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.15)$$

Por outro lado, alguns autores têm observado que as distribuições de probabilidade dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas podem ser aproximadas com distribuições comumente utilizadas na análise estatística, sendo as mais utilizadas a distribuição normal e a log-normal.

A distribuição normal ou distribuição gaussiana de um parâmetro característico x é definida mediante uma função $\phi(x)$ dada por

$$\phi_{\text{normal}}(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2} \right] \quad (3.16)$$

Por sua vez, a distribuição log-normal de um parâmetro x é definida mediante a função $\phi(x)$, a qual é trocada pela variável $y = \ln(x)$ e seus valores da média, \bar{y} , e desvio padrão, σ_y . Então, a distribuição log-normal é dada por

$$\phi_{\text{log-normal}}(y) = \frac{1}{x_i \sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(y_i - \bar{y})^2}{2\sigma_y^2} \right] \quad (3.17)$$

A respeito das distribuições de probabilidade, Brill et al. (1981) e, posteriormente, Saether et al. (1990) observaram que o comprimento da bolha pode ser bem aproximado com a distribuição log-normal. Alguns anos mais tarde, Nydal et al. (1992) indicou que a velocidade da bolha aproxima-se de uma distribuição normal, enquanto que a fração de vazio no pistão é frequentemente log-normal.

Na Figura 3.9 pode-se observar uma distribuição de probabilidades característica para o comprimento da bolha, assim como as distribuições de probabilidade normal e log-normal.

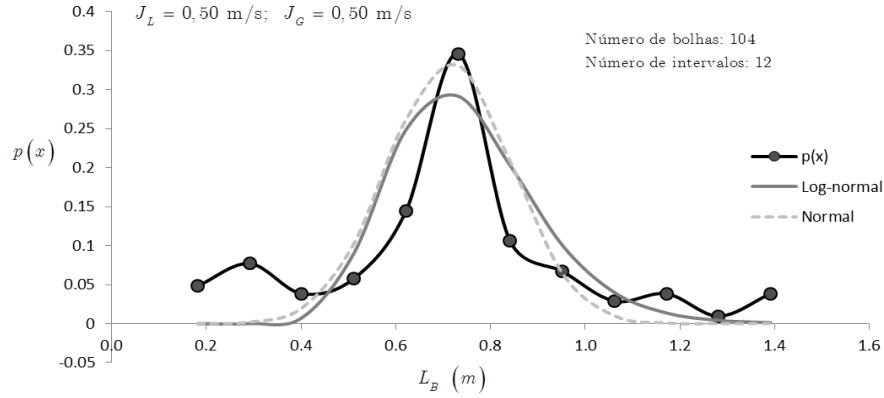


Figura 3.9. PDF característica do comprimento da bolha e distribuições de probabilidade mais utilizadas.

Por outro lado, ao processar todos os pontos medidos, foi necessário estabelecer correlações entre as variáveis. Um dos métodos mais utilizados para esse fim é o método dos mínimos quadrados, que será utilizado para correlacionar duas funções, x e y . O método dos mínimos quadrados foi desenvolvido basicamente para uma correlação linear da forma

$$y = ax + b \tag{3.18}$$

onde a e b são constantes, que são descritas no Apêndice D e dadas por

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \tag{3.19}$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \tag{3.20}$$

Cabe ressaltar que para correlações de ordem superior ou logarítmicas, o método dos mínimos quadrados é similar àquele usado para uma correlação linear.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho. Na primeira parte é apresentada a grade de testes definida para os experimentos. Em seguida, é apresentado e analisado o comportamento de parâmetros característicos do escoamento em golfadas: velocidade da bolha alongada, frequência, comprimento da bolha, comprimento do pistão e fração de vazio na região da bolha. Na última seção, é realizada uma análise das relações obtidas para cada um dos parâmetros do escoamento em golfadas.

4.1. Grade de Testes

Observou-se, na literatura, que várias correlações foram estabelecidas em função da velocidade da mistura, J . Assim, foram definidos pontos de medição em regiões de velocidades de mistura constantes, levando-se em conta as limitações da bancada experimental utilizada. Os testes experimentais foram realizados para J_L variando de 0,1 m/s a 3,0 m/s e J_G variando de 0,15 m/s a 5,0 m/s. A grade testes está esquematizada graficamente na Figura 4.1 utilizando o mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976). Adicionalmente, na Tabela 4.1 são mostrados os valores das velocidades superficiais testadas experimentalmente.

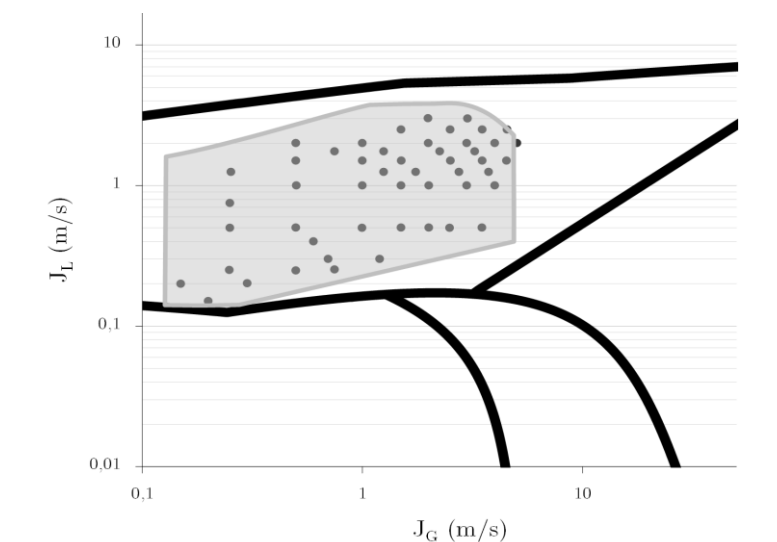


Figura 4.1. Grade de testes dentro da faixa de operação da bancada experimental do LACIT no mapa de Taitel e Dukler (1976).

Tabela 4.1. Grade de testes do presente estudo.

Ponto	J_L (m/s)	J_G (m/s)	Ponto	J_L (m/s)	J_G (m/s)	Ponto	J_L (m/s)	J_G (m/s)
P01	0,15	0,2	P17	0,5	1,6	P33	1,5	2,7
P02	0,2	0,2	P18	0,5	2	P34	1,5	3,3
P03	0,25	0,2	P19	1	0,5	P35	1,5	3,6
P04	0,25	0,3	P20	1	0,9	P36	1,75	0,7
P05	0,25	0,6	P21	1	1,3	P37	1,75	1,2
P06	0,25	1	P22	1	2	P38	1,75	2
P07	0,25	1,4	P23	1	2,59	P39	2	0,6
P08	0,25	1,7	P24	1	3,6	P40	2	1
P09	0,3	0,2	P25	1,25	1,1	P41	2	1,9
P10	0,3	0,5	P26	1,25	1,9	P42	2	2,6
P11	0,3	1	P27	1,25	2,4	P43	2	3,1
P12	0,4	0,5	P28	1,25	3	P44	2	3,7
P13	0,5	0,2	P29	1,5	0,5	P45	2,5	1,6
P14	0,5	0,4	P30	1,5	0,9	P46	2,5	2,5
P15	0,5	0,9	P31	1,5	1,3	P47	2,5	2,8
P16	0,5	1,3	P32	1,5	2,2			

4.2. Parâmetros característicos do escoamento em golfadas

Nesta seção são apresentadas as distribuições da densidade de probabilidade de ocorrência dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas, assim como a análise do comportamento dos valores médios para cada um dos desses parâmetros, sendo que, em alguns casos, os resultados obtidos no presente estudo são comparados com correlações disponíveis na literatura.

4.2.1. Velocidade da bolha alongada

Como observado por Nydal et al. (1992), a velocidade pode ser caracterizada mediante uma distribuição normal, sendo isso mais evidente para baixas vazões. Algumas das distribuições de probabilidade obtidas para a velocidade de translação da bolha alongada, U_{TB} , são mostradas na Figura 4.2.

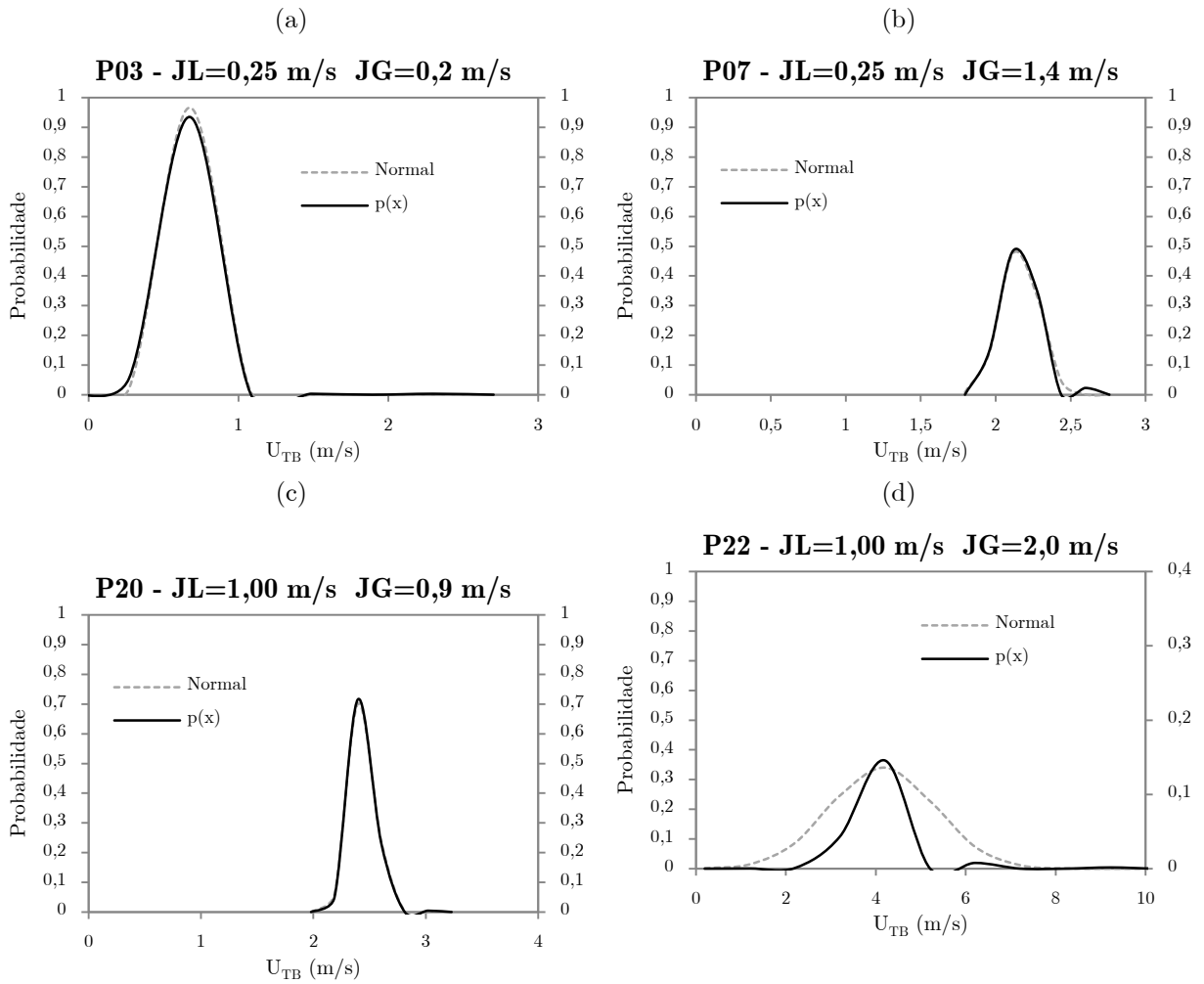


Figura 4.2. Distribuições de probabilidades para a velocidade da bolha alongada.

Os valores médios e desvios padrão de U_{TB} dos pontos observados na Figura 4.2 são mostrados na Tabela 4.2. Observa-se que para uma mesma velocidade superficial de líquido ($J_L=0,25$ m/s), U_{TB} aumenta quando é acrescentado J_G . Isto também é observado para um J_L de 1,0 m/s. Isto é coerente uma vez que a velocidade da bolha aumenta com o aumento da velocidade da mistura (J).

Tabela 4.2. Dados para velocidade média de translação da bolha

Ponto	J_L (m/s)	J_G (m/s)	U_{TB} (m/s)	$\sigma_{U_{TB}}$ (m/s)	J (m/s)
P03	0,25	0,20	0,67	0,16	0,45
P07	0,25	1,40	2,16	0,18	1,65
P20	1,00	0,90	2,41	0,17	1,90
P22	1,00	2,00	3,95	1,26	3,00

Para estabelecer uma relação entre a velocidade de translação da bolha alongada e as vazões de líquido ou gás, é utilizada a abordagem feita por Nicklin et al. (1962), dado pela equação (2.9) e rescrita por conveniência como:

$$\frac{U_{TB}}{\sqrt{gD}} = C_0 Fr_J + C_\infty \quad (4.1)$$

onde o coeficiente C_∞ é obtido mediante a equação (2.10). Utilizando o valor de U_{TB} obtido dos experimentos, é calculado o coeficiente C_0 , cuja relação em função de J é mostrado na Figura 4.3(a). Para $Fr_J < 3,5$ observa-se que C_0 varia entre 1,05 e 1,25, enquanto que para $Fr_J \geq 3,5$, o coeficiente está na faixa de 1,1 a 1,2 com uma média de 1,19. Estes valores estão de acordo com os resultados apresentados por Nydal et al. (1992) para escoamento turbulento. Cabe mencionar que os pontos medidos nesse trabalho têm números de Reynolds maiores a 2000.

Na Figura 4.3(b) são apresentados os dados experimentais obtidos para a velocidade da bolha alongada em função do número de Froude da mistura. A equação e dada por:

$$\frac{U_{TB}}{\sqrt{gD}} = 1,19 Fr_J + 0,4 \quad (4.2)$$

A partir da curva de tendência, pode ser observado que o valor de C_0 é igual a 1,19 e C_∞ é igual a 0,40 com o coeficiente de correlação de 0,99. Coeficientes que são similares aos obtidos por Nydal et al. (1992).

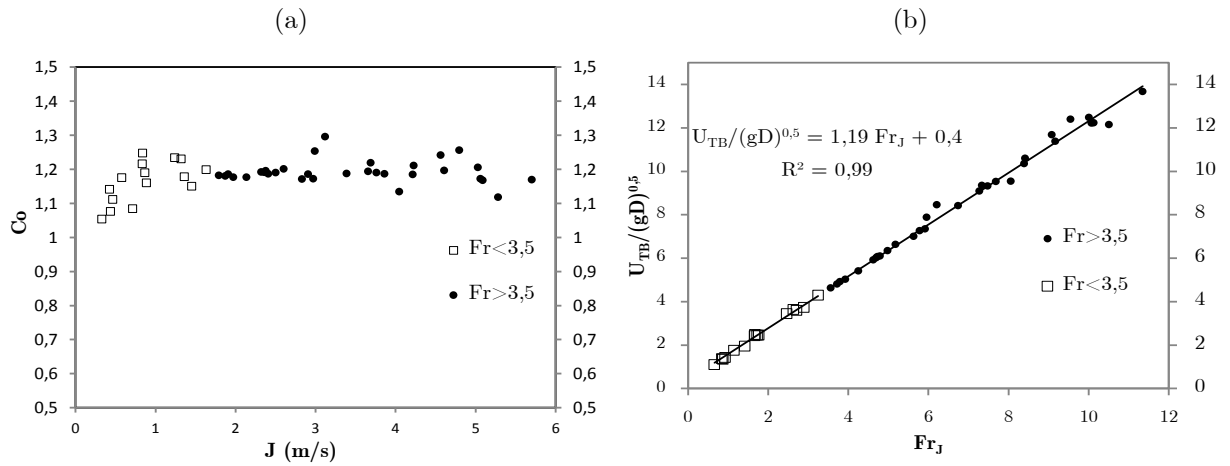


Figura 4.3. (a) Contribuição da velocidade de mistura na velocidade de translação da bolha alongada. (b) Relação linear para a velocidade da bolha alongada.

Por outro lado, o desvio padrão da velocidade de translação da bolha alongada, $\sigma_{U_{TB}}$, aumenta na medida em que aumentam as instabilidades no escoamento. Observou-se uma tendência parabólica em relação ao número de Froude da mistura, a qual é dada por

$$\frac{\sigma_{U_{TB}}}{\sqrt{gD}} = 0,0357 \times Fr_J^2 \tag{4.3}$$

A dispersão da equação (4.3) pode ser observada na Figura 4.4 e tem um coeficiente de correlação de 0,81

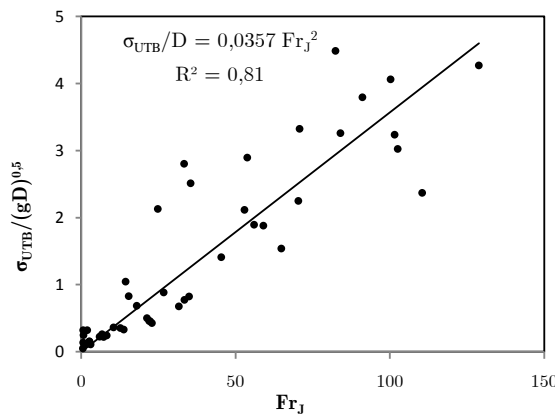


Figura 4.4. Desvio padrão da velocidade da bolha alongada em função do número de Froude da mistura.

4.2.2. Frequência da passagem da célula unitária

Dos dados obtidos, foi observado que a frequência da passagem da célula unitária comporta-se como uma função log-normal, como mostrado na Figura 4.5.

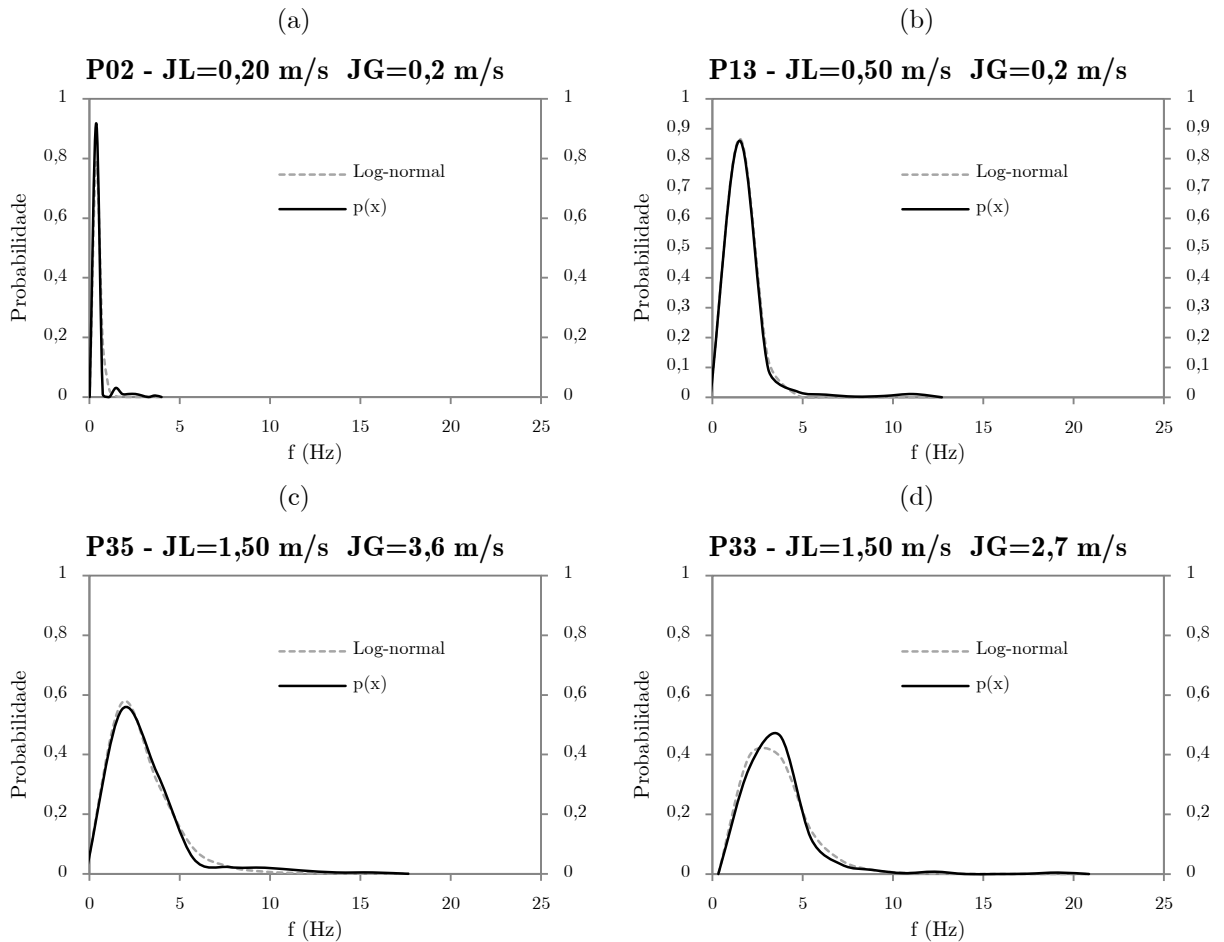


Figura 4.5. Distribuições de probabilidades para a frequência da célula unitária.

Os valores médios e desvios padrão de f dos pontos observados na Figura 4.5 são mostrados na Tabela 4.3. Observa-se que para um mesmo $J_G = 0,2$ m/s, a frequência acrescenta-se quando é aumentado o J_L . Para o outro caso, quando $J_L = 1,50$ m/s se mantém constante, nota-se que a frequência aumenta quando é diminuído o J_G .

Tabela 4.3. Dados para a frequência da passagem da célula unitária.

Ponto	JL (m/s)	JG (m/s)	f (Hz)	σ_f (Hz)	J (m/s)	JL/JG
P02	0,20	0,20	0,48	0,47	0,40	1,00
P13	0,50	0,20	1,87	1,37	0,70	2,50
P35	1,50	3,60	3,18	2,16	5,10	0,42
P33	1,50	2,70	3,77	2,17	4,20	0,56

Assim, observando as distribuições de probabilidade da frequência da célula unitária, foi encontrada uma equação em função da razão J_L/J_G . A dispersão mostrada na Figura 4.6(a) tem um coeficiente de correlação de 0,95 e está dada pela expressão

$$f = 0,08 \frac{J_L}{D} \left(\frac{J_L}{J_G} \right)^{0,45} \quad (4.4)$$

Na Figura 4.6(b), a equação (4.4) é comparada com os dados experimentais do presente estudo e dentro da faixa de $\pm 20\%$, mostrando uma boa concordância.

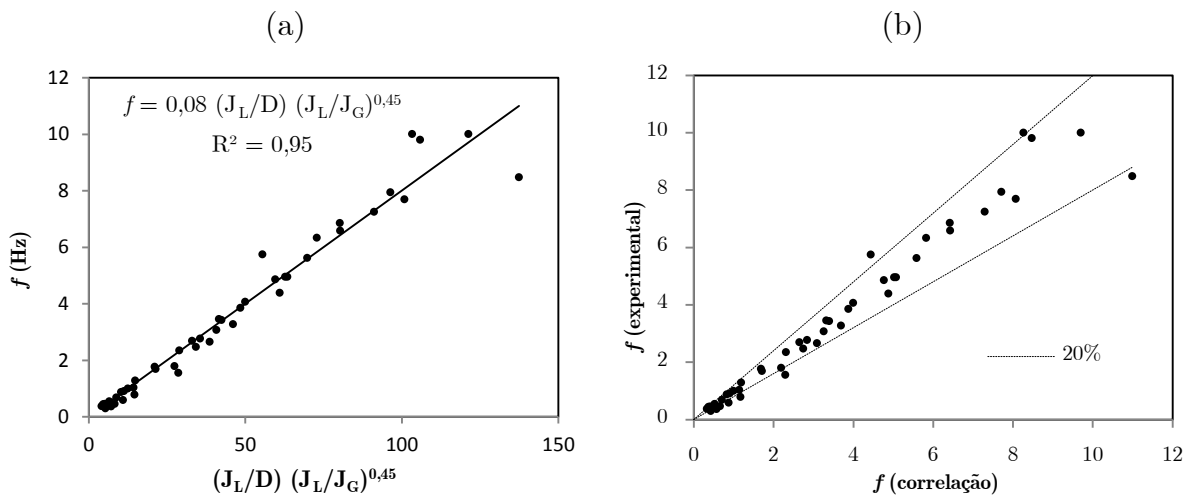


Figura 4.6. Correlação para a frequência da célula unitária da equação (4.4) e comparação com os dados experimentais obtidos no presente estudo.

Em alguns trabalhos, é utilizado o número de Strouhal ao invés da frequência, que pode ser expresso em função de J_L/J . Dos dados coletados no presente estudo,

cujos valores de J_L/J vão de 0,16 até 0,78, foi encontrada uma expressão com coeficiente de correlação de 0,98, e dada por

$$St = \exp\left(6,31 \frac{J_L}{J} - 5,75\right) \quad (4.5)$$

O gráfico da equação (4.5) é mostrado na Figura 4.7(a), sendo também mostrada, na Figura 4.7(b), uma comparação entre os valores obtidos pela correlação e os dados obtidos dos experimentos.

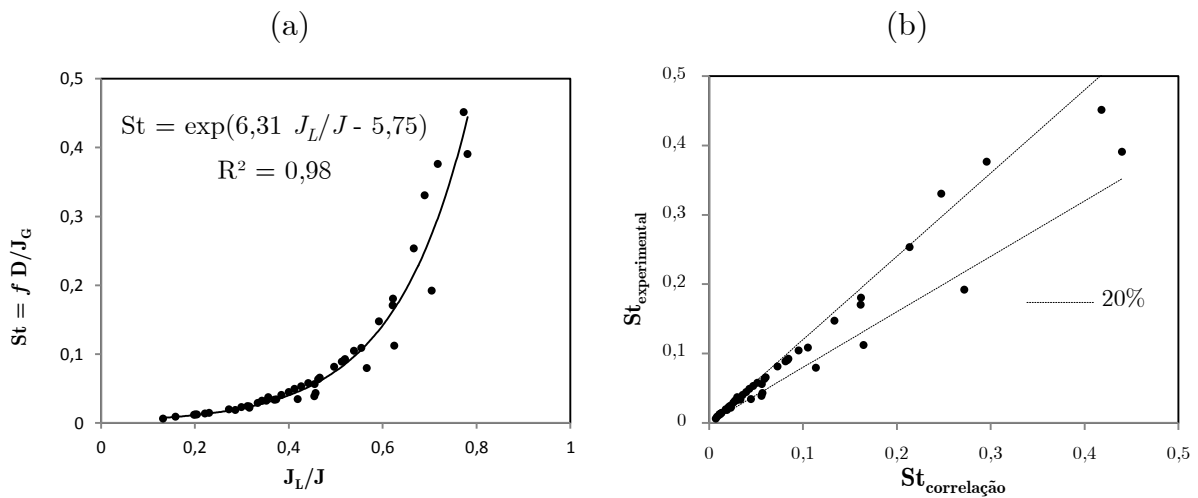


Figura 4.7. Correlação empírica para o número de Strouhal da equação (4.5) e comparação com os dados experimentais obtidos no presente estudo.

A relação obtida e apresentada na equação (4.5) foi comparada com a correlação de Fossa et al. (2003) e de Wang et al. (2007), observando-se uma melhor aproximação da equação proposta no presente estudo para altos valores do J_L/J quando comparados contra os dados experimentais, como mostrado na Figura 4.8.

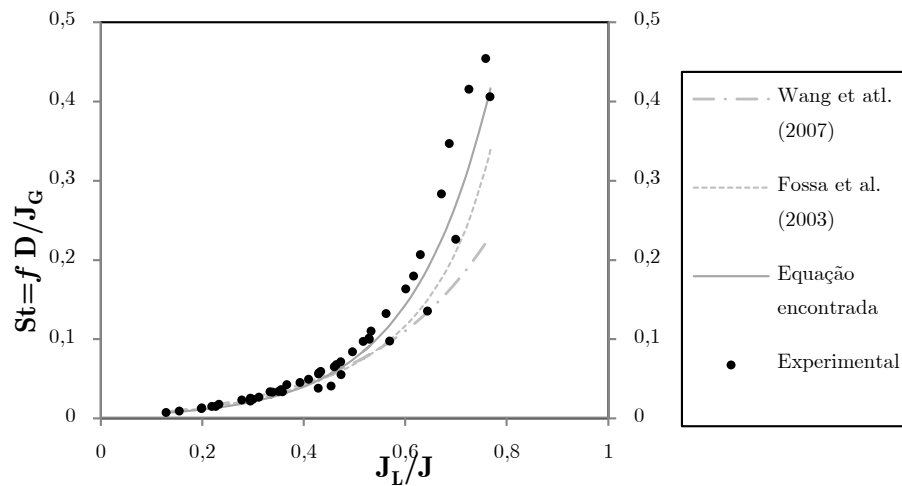


Figura 4.8. Comparação da correlação experimental proposta na equação (4.5) com a correlação de Fossa et al. (2003) e Wang et al. (2007).

Também foi obtida uma correlação para o desvio padrão da frequência. Para isso, foi necessário obter-se um valor da média da frequência, o qual deve ser calculado da equação (4.5). A correlação aproximada para o desvio padrão tem um coeficiente de correlação de 0,89, sendo mostrada na Figura 4.9 e dada pela expressão

$$\sigma_f = 0,502 f^{0,956} \tag{4.6}$$

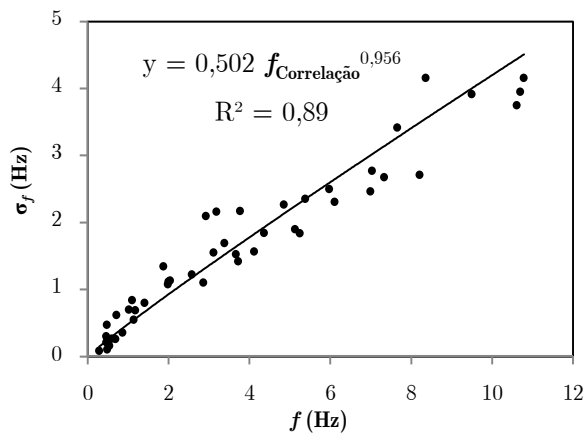


Figura 4.9. Correlação empírica para o desvio padrão da frequência utilizando a equação (4.5).

4.2.3. Comprimento da bolha alongada

Em relação ao comprimento das bolhas alongadas, foi observado que as distribuições de probabilidades podem ser aproximadas com a função normal, como mostrado na Figura 4.10. O comprimento das bolhas alongadas está relacionado

diretamente com a vazão do gás em relação à vazão da mistura. Então, pode ser utilizada a razão J_G/J . Assim, para $J_G/J = 0,33$, mostrado na Figura 4.10(a), o comprimento médio da bolha alongada é de 0,17 m e o desvio padrão de 0,06 m. Para $J_G/J = 0,49$, Figura 4.10(b), tem-se a média e o desvio padrão de 0,47 e 0,17 m, respectivamente. Continuando, para $J_G/J = 0,63$, Figura 4.10(c), a média é de 1,55 m e o desvio padrão de 0,49 m. Finalmente, para $J_G/J = 0,71$, Figura 4.10(d), a média e o desvio padrão são de 1,96 e 0,74 m, respectivamente. Portanto, observa-se que o comprimento da bolha alongada cresce quando aumenta a razão J_G/J .

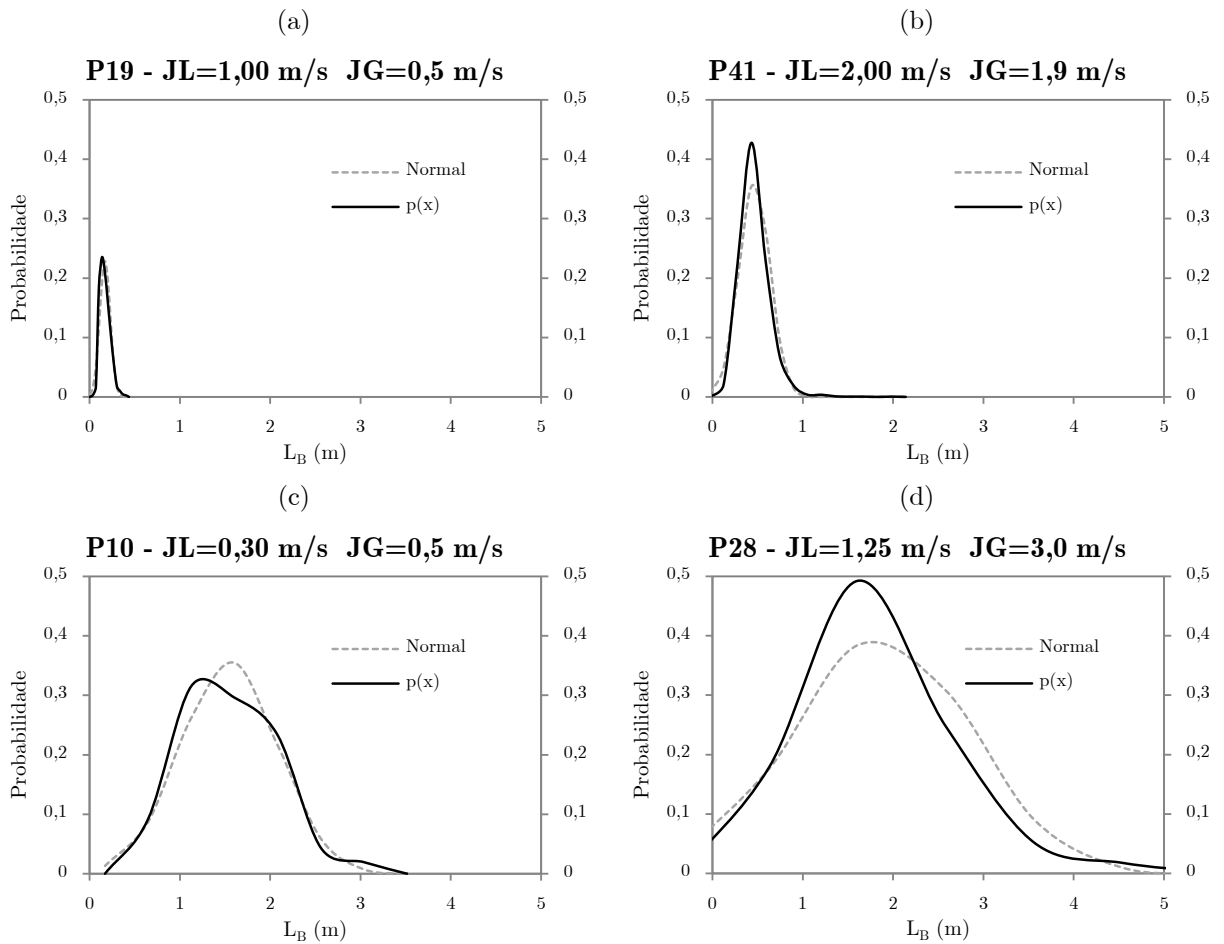


Figura 4.10 .Distribuições de probabilidades para o comprimento da bolha alongada.

Assim, é obtida uma relação entre o comprimento médio da bolha alongada, L_B , e a razão J_G/J . Com base nos dados do presente estudo, cujos valores de J_G/J ficam entre 0,21 e 0,87, é proposta uma relação com um coeficiente de correlação de 0,95, e cuja dispersão é mostrada na Figura 4.11(a), dada por

$$\frac{L_B}{D} = 1,34 \exp\left(5,68 \frac{J_G}{J}\right) \quad (4.7)$$

A equação acima foi comparada com os dados experimentais na faixa de $\pm 25\%$ tal como mostrado na Figura 4.11(b).

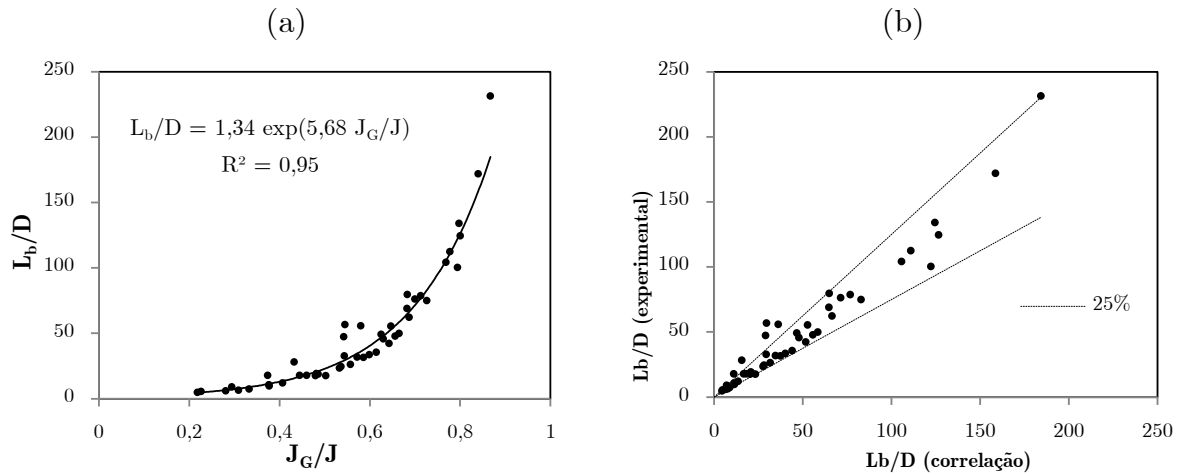


Figura 4.11. Correlação empírica para o comprimento adimensional da bolha alongada.

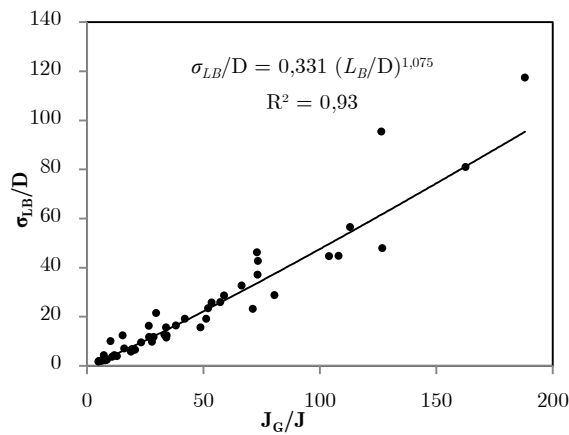


Figura 4.12. Correlação empírica para o desvio padrão do comprimento da bolha alongada utilizando a equação (4.8).

Por sua vez, o desvio padrão do comprimento da bolha alongada, σ_{L_B} , pode ser relacionado ao comprimento médio calculado na equação (4.7), mediante a correlação empírica mostrada na Figura 4.12 e dada pela expressão seguinte:

$$\frac{\sigma_{L_B}}{D} = 0,331 \left(\frac{L_B}{D}\right)^{1,075} \quad (4.8)$$

4.2.4. Comprimento do pistão

O comprimento do pistão, L_s , fica bem caracterizado com uma distribuição log-normal, como observado na Figura 4.13, e corroborando as observações feitas por Brill et al. (1981) e Saether et al. (1990). A partir das distribuições de probabilidade não se pôde deduzir qualquer equação em função das velocidades superficiais, mas pode-se notar que o desvio padrão e a média têm valores parecidos para diferentes velocidades superficiais.

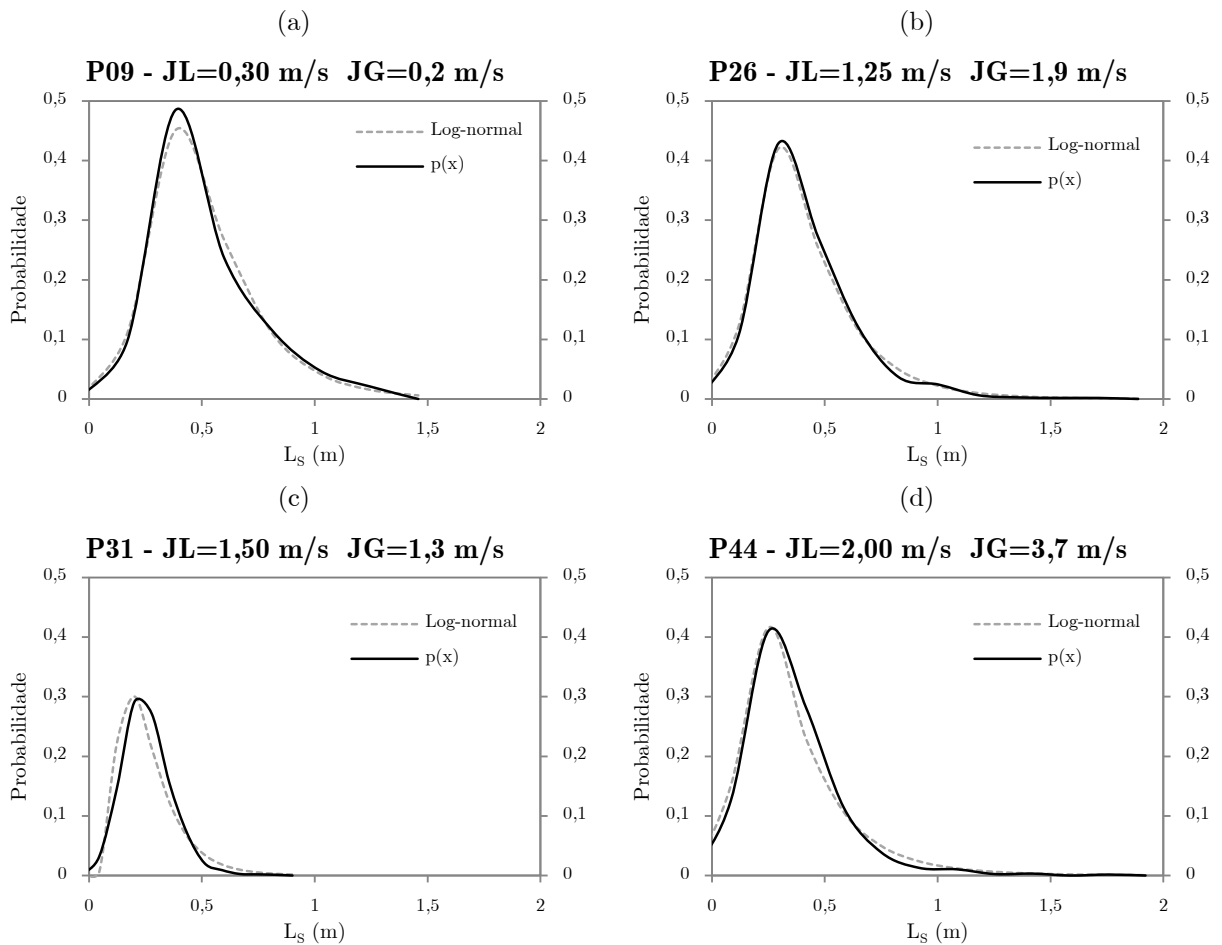


Figura 4.13. Distribuições de probabilidades para o comprimento do pistão.

No presente estudo buscou-se uma relação para determinar o comprimento do pistão líquido. Neste caso foi encontrada uma relação que é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{L_s}{D} = 2,67 \ln \left(\frac{4,84 \times 10^5}{Re_j St} \right), \quad (4.9)$$

onde Re_j representa ao número de Reynolds da mistura e St ao número de Strouhal, definidos anteriormente pelas equações (2.7) e (2.8) respectivamente. Observa-se na Figura 4.14(a) que o coeficiente de correlação da equação (4.9) é igual a 0,69.

A curva de tendência definida na equação (4.9) foi comparada com os dados experimentais obtidos, como observado na Figura 4.14(b). Observa-se que os valores calculados tem uma discrepância de $\pm 30\%$.

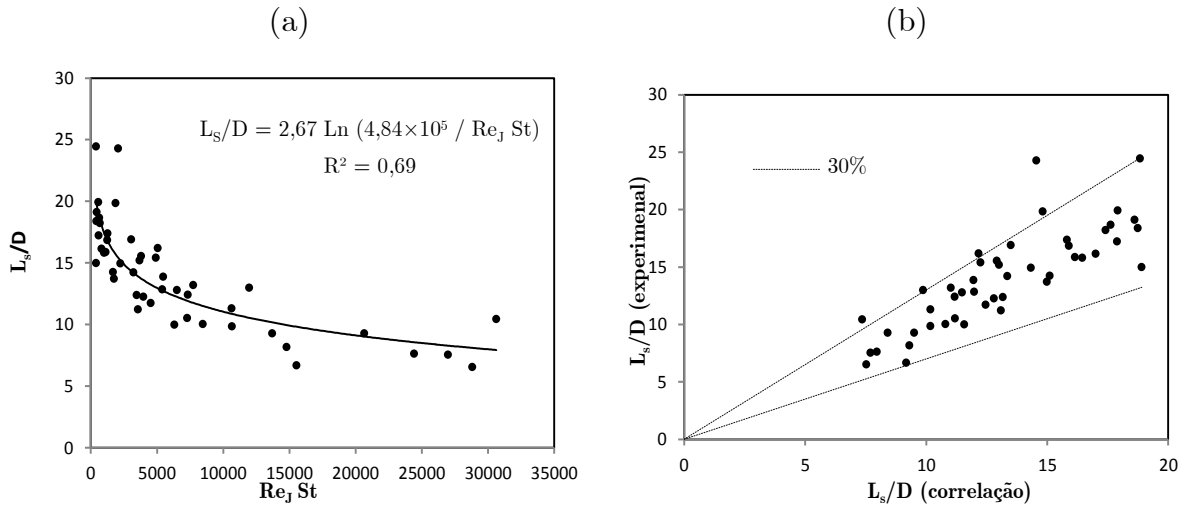


Figura 4.14. Correlação empírica da equação (4.9) para o comprimento adimensional do pistão

Por sua vez, o desvio padrão do comprimento do pistão aumenta com a razão J_G/J , devido à aeração do pistão, o qual torna mais instável a estrutura bolha-pistão. Assim, aproxima-se uma expressão com coeficiente de correlação 0,63, dada pela expressão seguinte:

$$\frac{\sigma_{L_s}}{D} = 2,152 \exp\left(1,89 \frac{J_G}{J}\right) \quad (4.10)$$

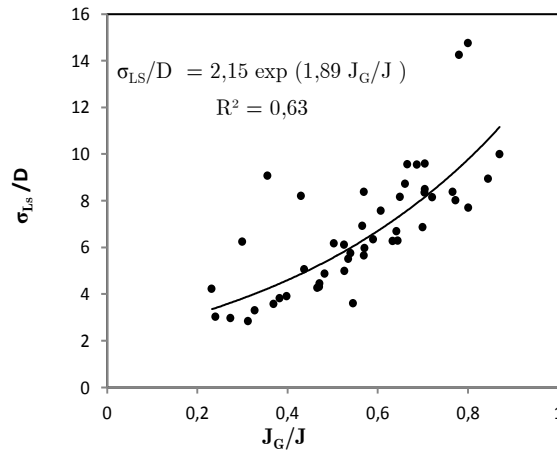


Figura 4.15. Correlação empírica para o desvio padrão do comprimento da bolha alongada utilizando a equação (4.10).

4.2.5. Fração de vazio na região da bolha

Observa-se nas distribuições de probabilidade mostrada na Figura 4.16, que a fração de vazio na bolha, α_B depende da quantidade de gás na mistura, que pode ser expresso como J_G/J . A distribuição estatística de α_B pode ser aproximado por uma função de probabilidade normal. Observa-se, também, que a partir das distribuições de probabilidade mostradas na Figura 4.16, não fica evidente uma tendência em função das velocidades superficiais do líquido e do gás.

No entanto, ao observar a tendência da fração de vazio média na região da bolha alongada, obteve-se uma equação em função da razão J_G/J , considerando que os dados do presente estudo estão na faixa de 0,21 até 0,86. Assim, tem-se um coeficiente de correlação de 0,83 e uma expressão dada por

$$\alpha_B = 0,748 \left(\frac{J_G}{J} \right)^{0,5} \quad (4.11)$$

A dispersão da equação (4.11) é mostrada na Figura 4.17(a), assim como a sua comparação com os valores experimentais obtidos, em uma faixa de $\pm 10\%$.

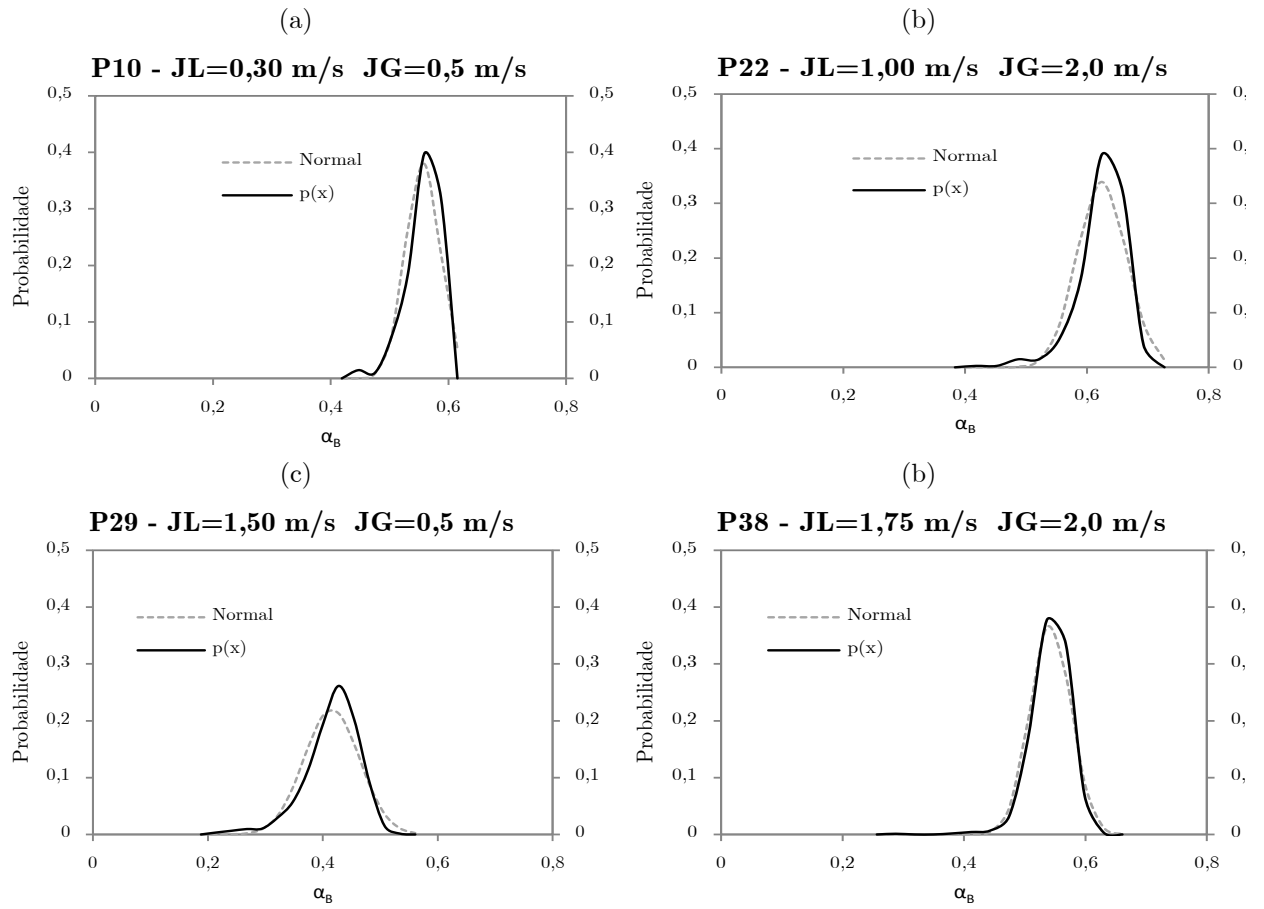


Figura 4.16. Distribuições de probabilidades para a fração de vazio na região da bolha alongada.

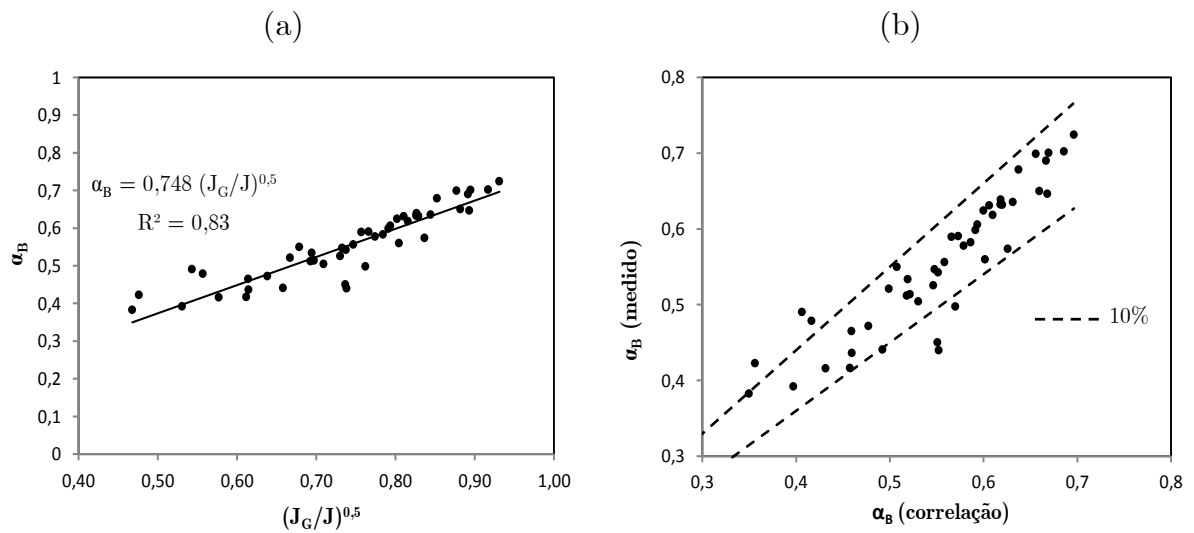


Figura 4.17. Correlação empírica da equação (4.11) para a fração de vazio.

Para um mesmo par de velocidades superficiais do líquido e do gás, observou-se que a altura de líquido e, portanto, a fração de vazio na bolha, σ_{α_B} , tem uma variação muito pequena. Portanto, o desvio padrão é bem pequeno, e em alguns casos pode ser confundido com algum ruído elétrico porventura presente no sensor. De acordo aos dados obtidos no presente estudo, propõe-se utilizar a média como valor constante para todos os pontos medidos.

$$\sigma_{\alpha_B} \approx 0,036 \quad (4.12)$$

A dispersão do padrão da fração de vazio na região da bolha alongada, σ_{α_B} , é mostrada na Figura 4.18.

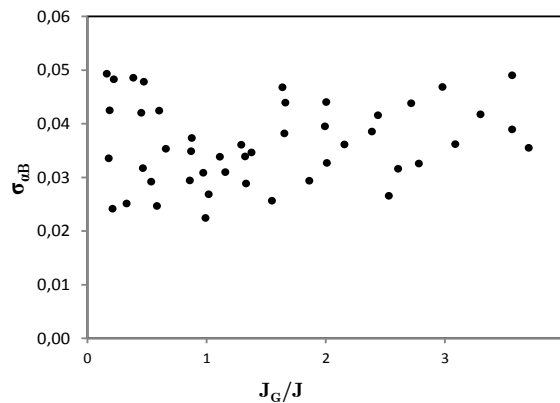


Figura 4.18. Dispersão do desvio padrão da fração de vazio na bolha.

4.3. Avaliação das relações obtidas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás.

Neste ponto, as relações definidas para calcular os parâmetros característicos do escoamento em golfadas são resumidas na Tabela 4.4. A partir destas relações são obtidas as PDFs, as quais são comparadas com as distribuições obtidas experimentalmente.

Os resultados obtidos após a elaboração das PDFs a partir das equações da Tabela 4.4 e comparados com as distribuições dos experimentos, são mostrados no Apêndice F.

Tabela 4.4. Resumo das relações obtidas para os parâmetros característicos do escoamento em golfadas.

Parâmetro característico	Equação para o valor médio	Equação para o desvio padrão	Tipo de função de probabilidade
Velocidade de translação da bolha alongada (U_{TB})	$\frac{U_{TB}}{\sqrt{gD}} = 1,18 Fr_J + 0,4$	$\sigma_{U_{TB}} = 0,0357 Fr_J^2$	Normal
Frequência de passagem da célula unitária (f)	$f = 0,08 \frac{J_L}{D} \left(\frac{J_L}{J_G} \right)^{0,45}$	$\sigma_f = 0,502 f^{0,956}$	Log-normal
Comprimento da bolha alongada (L_B)	$\frac{L_B}{D} = 1,34 \exp \left(5,68 \frac{J_G}{J} \right)$	$\frac{\sigma_{L_B}}{D} = 0,331 \left(\frac{L_B}{D} \right)^{1,075}$	Normal
Comprimento do pistão de líquido (L_S)	$\frac{L_S}{D} = 2,67 \ln \left(\frac{4,84 \times 10^5}{Re_J St} \right)$	$\frac{\sigma_{L_S}}{D} = 2,152 \exp \left(1,89 \frac{J_G}{J} \right)$	Log-normal
Fração de vazio na região da bolha alongada (α_B)	$\alpha_B = 0,748 \left(\frac{J_G}{J} \right)^{0,5}$	$\sigma_{\alpha_B} \approx 0,036$	Normal

A Figura 4.19 mostra a comparação entre a distribuição de probabilidade obtida experimentalmente e a função de probabilidade gerada, a partir das equações apresentadas na Tabela 4.4, para os parâmetros característicos do escoamento intermitente em golfadas. Neste caso é mostrado o resultado para velocidades superficiais de $J_L = 1,00$ m/s e $J_G = 0,9$ m/s.

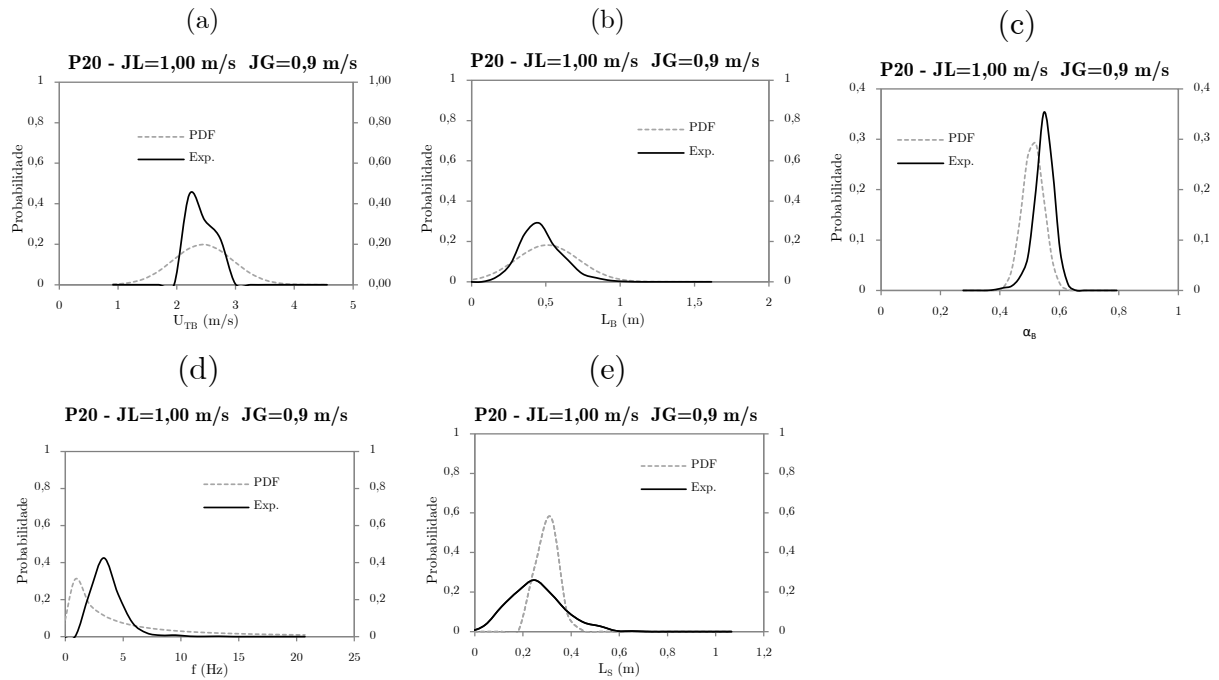


Figura 4.19. Comparação entre a distribuição de probabilidades experimental (Exp.) e a PDF gerada mediante equações, para $JL=1,00$ m/s e $JG=0,9$ m/s.

Na Figura 4.19., observa-se que a velocidade de translação da bolha alongada apresenta uma boa concordância entre a PDF gerada e a distribuição de probabilidades experimental. A PDF gerada tem uma amplitude maior do que a da curva experimental. Isto pode ocorrer devido a que a equação para o desvio padrão da velocidade o sobrestima. Por sua vez, a distribuição de probabilidades da frequência da célula unitária observa uma discrepância na moda da distribuição. Neste caso, a frequência é subestimada pela equação. Seguidamente, observa-se uma boa concordância na predição da distribuição de probabilidades da fração da bolha, tanto para a média quanto para o desvio padrão. Adicionalmente, a distribuição de probabilidades do comprimento da bolha alongada é bem predito, e a diferença entre as modas calculada e experimental pode ser desprezada. Finalmente, na distribuição do comprimento do pistão de líquido nota-se que a moda da distribuição coincide com a moda dos dados experimentais, mas o desvio padrão predito é menor do que experimental.

Outro exemplo é dado para um ponto com um valor alto de J_G/J . Neste caso, observa-se uma boa concordância para U_{TB} , f , α_B e L_B . No caso da distribuição para L_S , a diferença pode ser consequência do baixo coeficiente de correlação (0,69) apresentada pela equação (4.8).

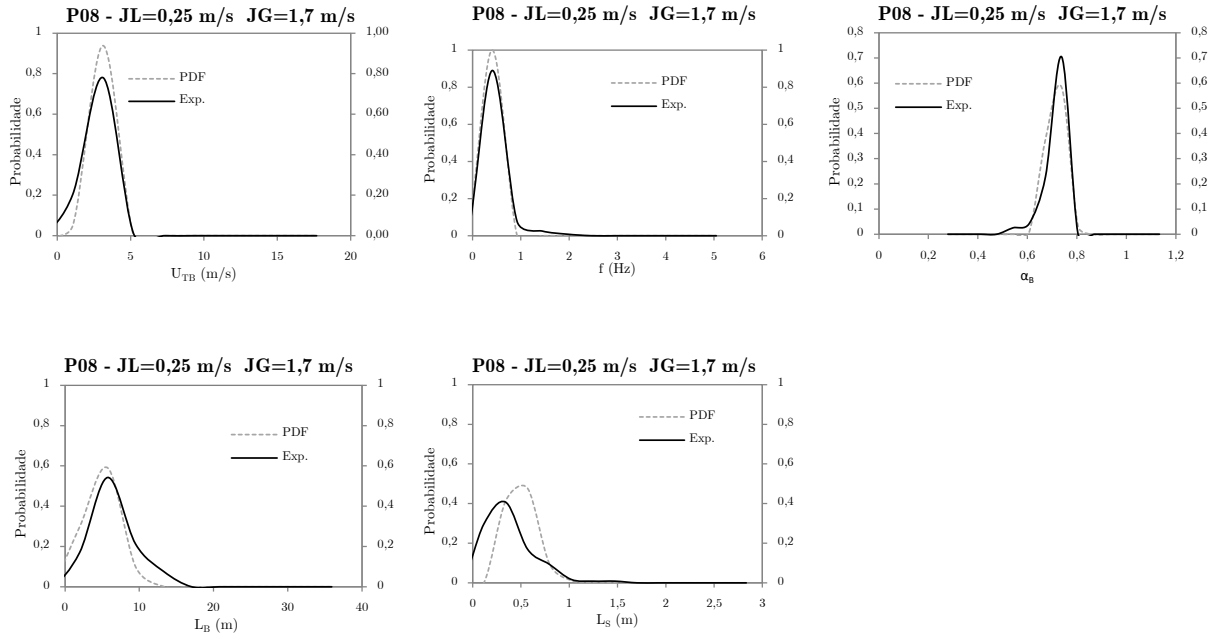


Figura 4.20. Comparação entre a distribuição de probabilidades experimental (Exp.) e a PDF gerada mediante equações, para $JL=0,25$ m/s e $JG=1,7$ m/s.

Um terceiro exemplo é mostrado na Figura 4.21, com um J_G/J relativamente pequeno. Nota-se que a distribuição de velocidades tem um desvio padrão maior do que do experimento, mas a média é corretamente calculada. No caso da frequência da célula unitária, a relação utilizada calcula um valor bem menor do que no experimento. No entanto, a PDF representa bem a distribuição de α_B e L_B . Finalmente, para o comprimento do pistão é observado um menor valor para a média e o desvio padrão.

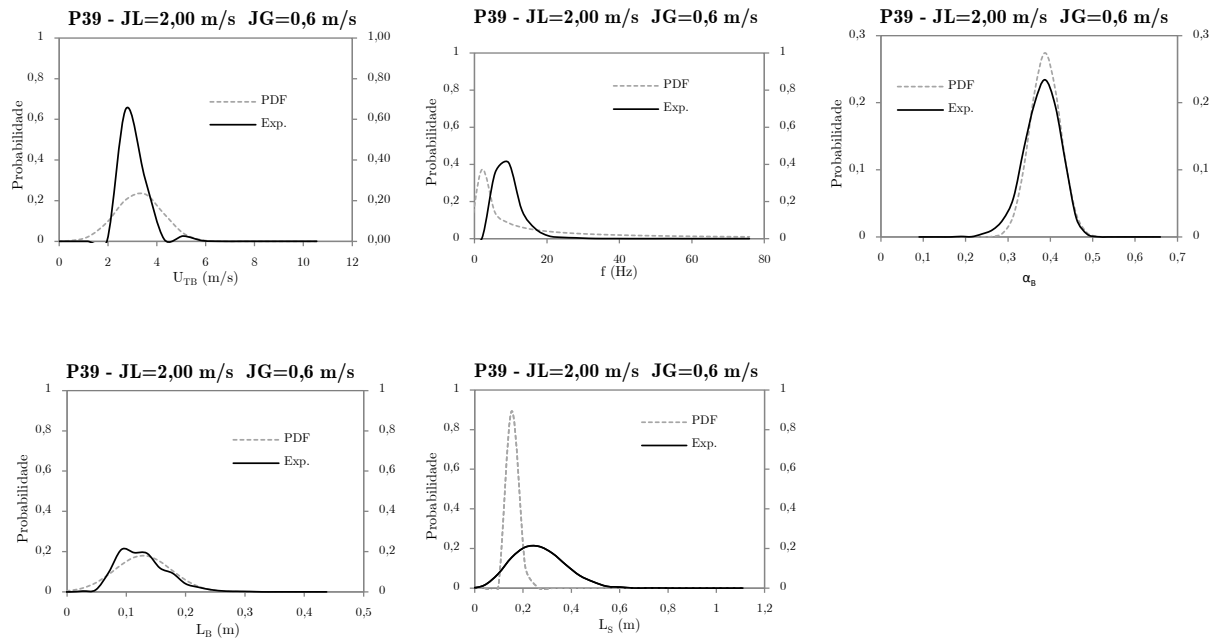


Figura 4.21. Comparação entre a distribuição de probabilidades experimental (Exp.) e a PDF gerada mediante equações, para $JL=0,25$ m/s e $JG=1,7$ m/s.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi estudado experimentalmente o escoamento intermitente líquido-gás em golfadas, com o objetivo de estabelecer correlações empíricas para calcular os parâmetros médios e desvios padrão da velocidade da bolha alongada, comprimento da bolha alongada, comprimento do pistão, frequência da passagem das células unitárias e fração de vazio da bolha alongada.

Foi estabelecida uma metodologia para atingir os objetivos propostos no presente estudo, estabelecendo uma grade de testes para 47 combinações de vazões de gás e de líquido. Também foi utilizado um sistema de aquisição e um sistema de processamento dos sinais adquiridos.

5.1. Conclusões

Com base nos resultados dos experimentos, foram feitas as seguintes observações em relação aos parâmetros característicos do escoamento intermitente:

- Utilizando a abordagem proposta por Nicklin et al. (1962) e também utilizada por Bendiksen (1984) e Fabre (2003), foi analisada a velocidade de translação da bolha alongada para a grade de testes adotada, com números de Reynolds da mistura maiores que 10000 e números de Froude entre 0,6 e 10. Notou-se que a distribuição de probabilidades da velocidade pode ser bem caracterizada pela PDF normal. Também observa-se que o coeficiente C_0 varia entre 1,05 e 1,2 para números de Froude menores que 3,5, apresentando concordância com os resultados obtidos por Bendiksen (1984). Para números de Froude da mistura maiores que 3,5, corroborou-se que o coeficiente C_0 tem um valor aproximado de 1,18, apresentando concordância com os resultados obtidos por Bendiksen (1984) e Nydal et al. (1992). Por sua vez, o desvio padrão da velocidade pode ser aproximado como uma função do número de Froude da mistura.
- A distribuição da frequência da célula unitária pode ser caracterizada como uma função log-normal. Por sua vez, o valor médio da frequência da célula unitária aumenta conforme aumenta a vazão de líquido, mas, para uma

mesma vazão de líquido, a frequência diminui quando aumenta a vazão de gás. Por esta razão, ao contrário do que foi verificado nos trabalhos de Gregory e Scott (1969) e Heywood e Richardson (1979), observou-se uma relação da frequência da célula unitária com a razão J_L/J_G . Também foi observada uma dependência entre o número de Strouhal e a razão J_L/J , cuja relação aproximada é da forma exponencial e mostra uma boa concordância com os resultados obtidos por Fossa et al. (2003) e Wang et al. (2007). Adicionalmente, o desvio padrão da frequência de passagem das bolhas alongadas pode ser relacionado com a frequência média. Ao serem verificadas as estimativas de frequência média e desvio padrão, observa-se que a predição aplica-se bem para altos valores de J_G/J .

- O comprimento da bolha alongada pode ser caracterizado por uma função normal, corroborando os resultados obtidos por Rodrigues (2006). O comprimento médio da bolha alongada apresenta uma relação com a razão J_G/J , já que uma maior contribuição do gás na vazão da mistura provoca um aumento no volume de bolhas alongadas e, por conseguinte, no comprimento. Adicionalmente, o desvio padrão das medidas do comprimento da bolha alongada podem ser expressos como funções da média de L_B .
- Por sua vez, a complexidade do comportamento do comprimento do pistão líquido dificulta a obtenção de relações com as velocidades superficiais. Também foram identificadas as distribuições de probabilidade de L_s como funções log-normal. Adicionalmente, foi aproximada uma correlação em função do produto do número de Reynolds da mistura e do número de Strouhal. O produto de Re_j e St pode ser entendido como a razão entre a inércia do movimento transiente e as forças viscosas, sendo que, quando as forças viscosas são maiores, o líquido tem a capacidade de formar pistões maiores, e, pelo contrário, quando as forças viscosas são superadas e as forças inerciais transientes são maiores, o líquido tende a formar pistões de menor comprimento. Adicionalmente, foi obtida uma relação entre o desvio padrão do comprimento do pistão e a razão J_G/J , uma vez que um maior conteúdo de gás origina mais instabilidades na traseira da bolha.

- A fração de vazio na bolha alongada pode ser caracterizada como uma função normal, sendo observado que α_B varia em uma estreita faixa de valores. Foi encontrada uma relação de α_B com a razão J_G/J , sendo observado que uma maior vazão de gás não só provoca pistões mais aerados, mas também aumenta a área ocupada pelo gás na seção da bolha. Não foi encontrada uma correlação para o desvio padrão de α_B , pelo qual optou-se por utilizar a média dos desvio padrões obtidos para todos os pontos da grade de testes.
- Finalmente, foram verificados os dados obtidos mediante a construção das PDFs, utilizando as equações apresentadas na seção dos resultados. Observou-se uma boa concordância com as distribuições obtidas experimentalmente.

5.2. Recomendações

Em relação a este estudo, são feitas algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Estabelecer uma grade de testes mais refinada, dado que uma maior abrangência de dados pode originar correlações mais confiáveis ou que possam servir para uma faixa mais ampla de vazões de gás e líquido.
- Desenvolver estudos experimentais para analisar o escoamento intermitente com diferentes mudanças de direção.
- Analisar o movimento das bolhas dispersas no pistão líquido, que é importante para o desenvolvimento de alguns modelos do escoamento em golfadas.
- Desenvolver trabalhos experimentais do escoamento intermitente com outros fluidos, dado que o escoamento de água e ar estudado neste trabalho é composto de fluidos newtonianos, diferentemente de outros fluidos, como gás natural e óleo.
- Analisar o desenvolvimento do escoamento intermitente utilizando várias estações de medição ao longo da linha bifásica e modelar a evolução dos parâmetros característicos do escoamento intermitente.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. F. **Estudo Experimental da Influência da Pressão no Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Golfadas em Dutos Horizontais**, 2013. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

AMARAL, C. E. F. DO; ALVES, R. F.; DA SILVA, M. J.; et al. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, 2013. Elsevier.

ANDREUSSI, P.; BENDIKSEN, K. H.; NYDAL, O. J. Void distribution in slug flow. **International journal of multiphase flow**, v. 19, n. 5, p. 817–828, 1993. Elsevier.

ANDREUSSI, P.; DI DONFRANCESCO, A.; MESSIA, M. An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two-phase flow. **International journal of multiphase flow**, v. 14, n. 6, p. 777–785, 1988. Elsevier.

AZZOPARDI, B. J. Drops in annular two-phase flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 23, n. 7, p. 1–53, 1997. Elsevier.

BARNEA, D.; TAITEL, Y. A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 19, n. 5, p. 829–838, 1993. Elsevier.

BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 10, n. 4, p. 467–483, 1984.

BENJAMIN, T. B. Gravity Currents and Related Phenomenon. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 31, n. 02, p. 209–248, 1968. Cambridge Univ Press. Disponível em: <http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0022112068000133>. .

BERTOLA, V. Experimental characterization of gas–liquid intermittent subregimes by phase density function measurements. **Experiments in fluids**, v. 34, n. 1, p. 122–129, 2003. Springer.

BRILL, J. P.; SCHMIDT, Z.; COBERLY, W. A.; et al. Analysis of Two-Phase Tests in Large-Diameter Flow Lines in Prudhoe Bay Field. **SPE Journal (Society of Petroleum Engineers)**, v. Volume 21., p. 16, 1981. Disponível em:

<<http://www.onepetro.org/mslib/app/Preview.do?paperNumber=00008305&societyCode=SPE>>. .

CARNEIRO, J. N. E.; FONSECA JR, R.; ORTEGA, A. J.; et al. Statistical characterization of two-phase slug flow in a horizontal pipe. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 33, n. SPE1, p. 251–258, 2011. SciELO Brasil.

CARPINTERO, E. **Experimental Investigation of Developing Plug and Slug Flows**, 2009. Technische Universität München. Disponível em: <<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20090825-738028-1-2>>. .

DAVIES, R. M.; TAYLOR, G. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 200, n. 1062, p. 375–390, 1950. The Royal Society.

DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes. **Industrial Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 14, n. 4, p. 337–347, 1975. American Chemical Society. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/i160056a011>>. .

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

FALCONE, G.; HEWITT, G. F.; ALIMONTI, C. **Multiphase Flow Metering: Principles and Applications**. Elsevier Science, 2009.

FOSSA, M.; GUGLIELMINI, G.; MARCHITTO, A. Intermittent flow parameters from void fraction analysis. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 14, n. 4, p. 161–168, 2003. Elsevier.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introduction to Fluid Mechanics**. Wiley, 2006.

GÓMEZ, L. G. **Estudo experimental de escoamentos líquido-gás intermitentes em tubulações inclinadas**, 2010. Universidade Estadual de Campinas.

GREGORY, D.; SCOTT, G. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow. **AIChE Journal**, v. 15, n. 6, p. 933–935, 1969. American Institute of Chemical Engineers. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690150623>>. .

GREGORY, G. A.; NICHOLSON, M. K.; AZIZ, K. Correlation of the liquid volume fraction in the slug for horizontal gas-liquid slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 4, n. 1, p. 33–39, 1978. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030193227890023X>>. .

GRIFFITH, P.; WALLIS, G. B. **Slug flow**. 1959.

HERNANDEZ, V. **Gas-liquid two-phase flow in inclined pipes** *Mining Engineering*, 2007. University of Nottingham. Disponível em: <<http://etheses.nottingham.ac.uk/1764/>>. .

HEYWOOD, N. I.; RICHARDSON, J. F. Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: Determination of liquid holdup by gamma-ray absorption. **Chemical Engineering Science**, v. 34, p. 17–30, 1979.

HOLMAN, J. P. *Experimental methods for engineers-7/E*. ,2001.

ISHII, M.; HIBIKI, T. **Thermo-fluid Dynamics of Two-Phase Flow**. Springer, 2006.

LEVY, S. **Two-Phase Flow in Complex Systems**. Wiley, 1999.

MANDHANE, J. M.; GREGORY, G. A.; AZIZ, K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 1, n. 4, p. 537–553, 1974. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V45-47YHYJ4-2J/2/0ec1b62afa191cbdc622bdb1694664c5>>. .

MARTIN, J. L.; MACCUTCHEON, S. C. **Hydrodynamics and transport for water quality modeling**. CRC Press, 1999.

NICHOLSON, M. K.; AZIZ, K.; GREGORY, G. A. Intermittent two phase flow in horizontal pipes: Predictive models. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 56, n. 6, p. 653–663, 1978. Disponível em:
<<http://doi.wiley.com/10.1002/cjce.5450560601>>. .

NICKLIN, D.; WILKES, J.; DAVIDSON, J. Two-phase flow in vertical tubes. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 40, n. a, p. 61–68, 1962. Institution of Chemical Engineers. Disponível em: <<http://archive.icheme.org/cgi-bin/somscid.cgi?type=header&record=814>>. .

NYDAL, O. J.; PINTUS, S.; ANDREUSSI, P. Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 18, n. 3, p. 439–453, 1992. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030193229290027E>>. .

PRASSER, H. M.; BOTTGER, A.; ZSCHAU, J. A New Electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. **Flow Measurement Instrumentation**, v. 9, p. 111–119, 1998.

DOS REIS, E.; GOLDSTEIN, L. Characterization of slug flows in horizontal piping by signal analysis from a capacitive probe. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 21, n. 3, p. 347–355, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955598610000518>>. Acesso em: 10/3/2012.

RODRIGUES, H. T. **Simulação do Escoamento Bifásico Líquido-Gás Intermitente em Golfadas utilizando o modelo de Seguimento Dinâmico de Pistões** Dissertação de Mestrado, 2006. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

SAETHER, G.; BENDIKSEN, K.; MÜLLER, J.; FRØLAND, E. The fractal statistics of liquid slug lengths. **International journal of multiphase flow**, v. 16, n. 6, p. 1117–1126, 1990. Elsevier.

DOS SANTOS, E. **Técnicas para extração de parâmetros de escoamentos bifásicos em regime intermitente utilizando o sensor wire-mesh**, 2011. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SHEA, R.; EIDSMOEN, H.; NORDSVEEN, M.; et al. Slug Frequency Prediction Method Comparison. In: N. Scandpower Petroleum Technology AS; N. Jan Nossen, Institute for Energy Technology (IFE) (Eds.); BHRG Multiphase Production Technology Proceedings. **Anais...**, 2004. Banff, Canada.

SHEMER, L. Hydrodynamic and statistical parameters of slug flow. **International journal of heat and fluid flow**, v. 24, n. 3, p. 334–344, 2003. Elsevier.

DA SILVA, M. J. Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging. (G. Gerlach, Ed.) **Elektrotechnik Und Informationstechnik**, v. 13, n. 2, p. 170, 2008. TUDpress. Disponível em:
<<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11315863>>. .

DA SILVA, M. J.; HAMPEL, U.; ARRUDA, L. V. R.; AMARAL, C. E. F. DO; MORALES, R. E. M. Experimental investigation of horizontal gas-liquid slug flow by means of wire-mesh sensor. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 33, n. SPE1, p. 234–242, 2011. SciELO Brasil.

DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. Capacitance wire-mesh sensor for fast measurement of phase fraction distributions. **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 7, p. 2245–2251, 2007. IOP PUBLISHING LTD. Disponível em:
<<http://stacks.iop.org/0957-0233/18/i=7/a=059?key=crossref.dc4ba5f6aa4df85e266d7c4e270e427a>>. .

TAITEL, Y.; BARNEA, D. Two-Phase Slug Flow. (J. P. Hartnett & J. Thomas F Irvine, Eds.) **Journal of Heat Transfer**, v. 20, p. 83–132, 1990. Elsevier. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/B7RNJ-4S818YM-4/2/ca74bb14da8b7a15844a29cab2bdbc8>>. .

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, v. 22, n. 1, p. 47–55, 1976. Wiley Online Library. Disponível em:
<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.690220105/abstract>>. .

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 3, n. 6, p. 585–596, 1977. Elsevier. Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0301932277900313>>. .

TRONCONI, E. Prediction of slug frequency in horizontal two-phase slug flow. **AI Ch. E. Journal (American Institute of Chemical Engineers);(United States)**, v. 36, n. 5, 1990.

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

WANG, X.; GUO, L.; ZHANG, X. An experimental study of the statistical parameters of gas–liquid two-phase slug flow in horizontal pipeline. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, n. 11, p. 2439–2443, 2007. Elsevier.

WEBER, M. E. Drift in intermittent two-phase flow in horizontal pipes. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 59, n. 3, p. 398–399, 1981. Wiley Online Library.

ZUKOSKI, E. E. Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 25, n. 04, p. 821–837, 1966. Cambridge Univ Press.

APÊNDICE A – CÁLCULO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS

Neste apêndice é descrito a metodologia para calcular as velocidades superficiais do gás e do líquido, que são parâmetros de entrada nos testes desenvolvidos no presente estudo.

A hipótese básica deste ponto é que a vazão mássica, tanto para líquido, \dot{m}_L , quanto para o gás, \dot{m}_G , mantêm-se constantes ao longo das seções de tubulação desde o sensor de vazão correspondente, sensor de vazão mássico ou rotâmetro, até a seção de teste. A velocidade superficial do líquido pode ser calculada com a vazão mássica na entrada e com a temperatura na seção de teste. Por sua vez, o cálculo da velocidade superficial de líquido é um processo que requer, em primeira instância, as pressões e temperaturas na saída do rotâmetro e na seção de teste e, posteriormente, de um fator de correção devido às condições de pressão medidas.

Como pode ser observado na Figura A. 1, na linha de líquido tem-se como dado a vazão mássica do líquido, \dot{m}_L , ao passo que na linha de gás, os dados que se tem são a vazão de gás nas condições de calibração do rotâmetro, $Q_{rot,cal}$, a pressão e temperatura na saída do rotâmetro, P_{rot} e T_{rot} , enquanto que na linha bifásica têm-se os dados de pressão e temperatura, P_{ts} e T_{ts} . Adicionalmente, um dado a ser utilizado é a área do tubo na seção de teste, A .

Para calcular as velocidades superficiais do líquido e do gás é necessário fazer um balanço de forças, mostradas na Figura A. 1, considerando as forças de flutuação, F_B , de arrasto, F_D , e de gravidade, F_W , para uma posição determinada do flutuador.

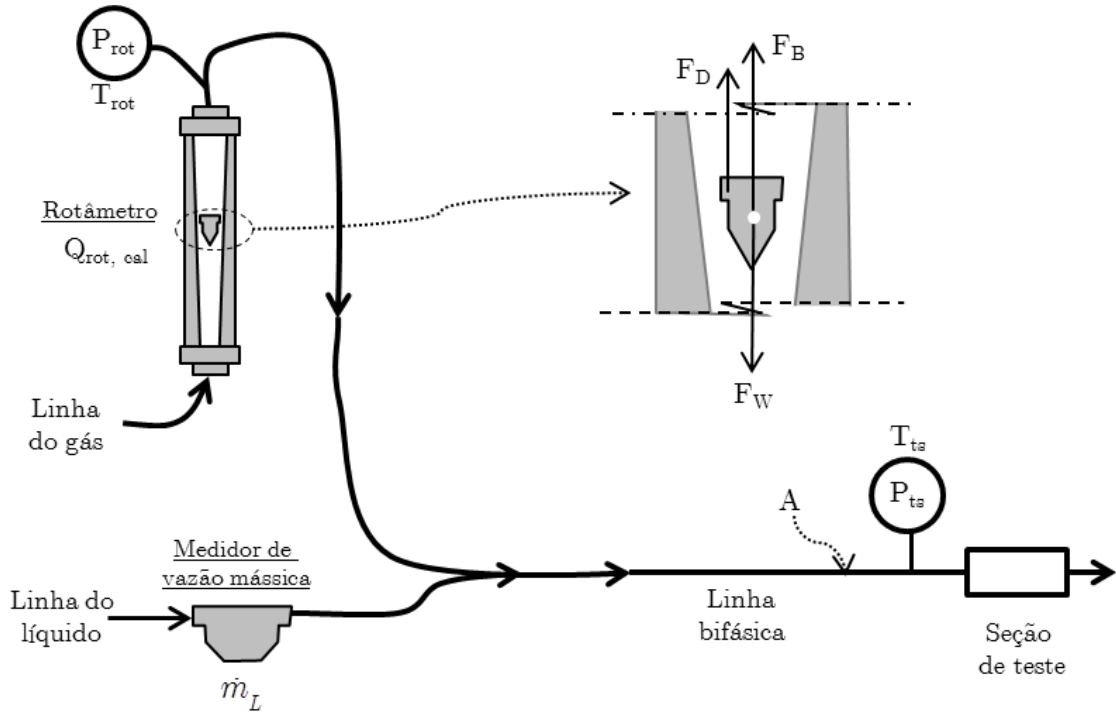


Figura A. 1. Esquema dos parâmetros disponíveis para a medição das velocidades superficiais do líquido e do gás na bancada experimental do presente estudo.

Na linha de líquido, a hipótese é que a vazão mássica no sensor de vazão mássico, $\dot{m}_{L,mm}$, é a mesma do que na seção de teste, $\dot{m}_{L,ts}$, e dada por

$$\dot{m}_{L,mm} = \dot{m}_{L,ts} \quad (A.1)$$

No entanto, a vazão mássica na seção de teste pode ser expressa em função de J_L ,

$$\dot{m}_{L,ts} = \rho_{L,ts} J_L A \quad (A.2)$$

A densidade do líquido na seção de teste, $\rho_{L,ts}$, pode ser calculada mediante a correlação proposta por Martin e MacCutcheon (1999) em função da temperatura medida na seção de teste, T_{ts} ,

$$\rho_{L,ts} = 1000 \left[1 - \frac{(T_{ts} + 15,7914)(T_{ts} - 277,1363)^2}{508929,2(T_{ts} - 205,02037)} \right] \quad (A.3)$$

Então, das equações (A.1) e (A.2), e utilizando-se a equação (A.3) para o cálculo da densidade, a velocidade superficial do líquido é dada por

$$J_L = \frac{\dot{m}_{L,ts}}{\rho_{L,ts} A} \quad (\text{A.4})$$

Por outro lado, para calcular a vazão do gás, foram utilizados rotâmetros com conexões pneumáticas de engate rápido montadas durante o experimento. O esquema do arranjo dos rotâmetros é mostrado na Figura A. 2, cujos modelos 96029, 96039, 96044 e 96049, correspondem a uma ordem de menor a maior vazão, respectivamente.

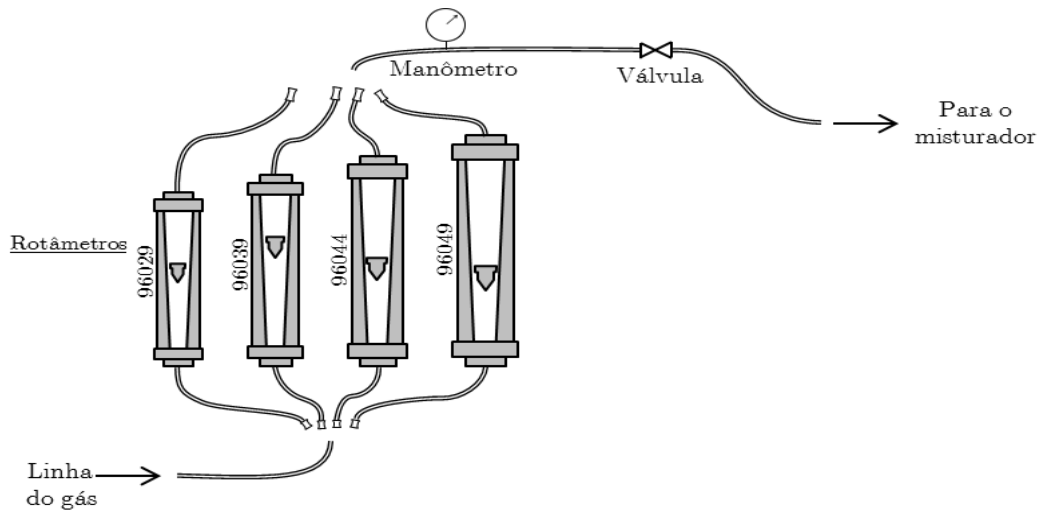


Figura A. 2. Esquema do arranjo dos rotâmetros utilizados no presente estudo.

Os rotâmetros usam a escala interna SKT, que vai desde 0 até 100 em cada um deles. A vazão medida é dada em função da calibração e, para calcular a vazão real do gás foi utilizado um sensor de pressão e temperatura na saída dos rotâmetros. O sensor de pressão e temperatura utilizado é da marca Rosemount, modelo 3051TG, que mede pressões relativas de até 150 psig.

Cada um dos rotâmetros conta com uma folha de calibração fornecida pelo fabricante. Desta folha de calibração pode ser aproximada a vazão em l/h para cada posição do flutuador, em SKT, mediante uma correlação linear para cada um dos rotâmetros utilizados, as quais são mostradas na .

Cabe ressaltar que essa vazão calculada a partir das curvas de calibração, é a vazão que corresponderia a uma determinada posição do flutuador e para as condições de pressão e temperatura com as quais foi calibrado. Portanto, ao ter uma pressão e uma temperatura particular na saída do rotâmetro, esta deverá ser corrigida.

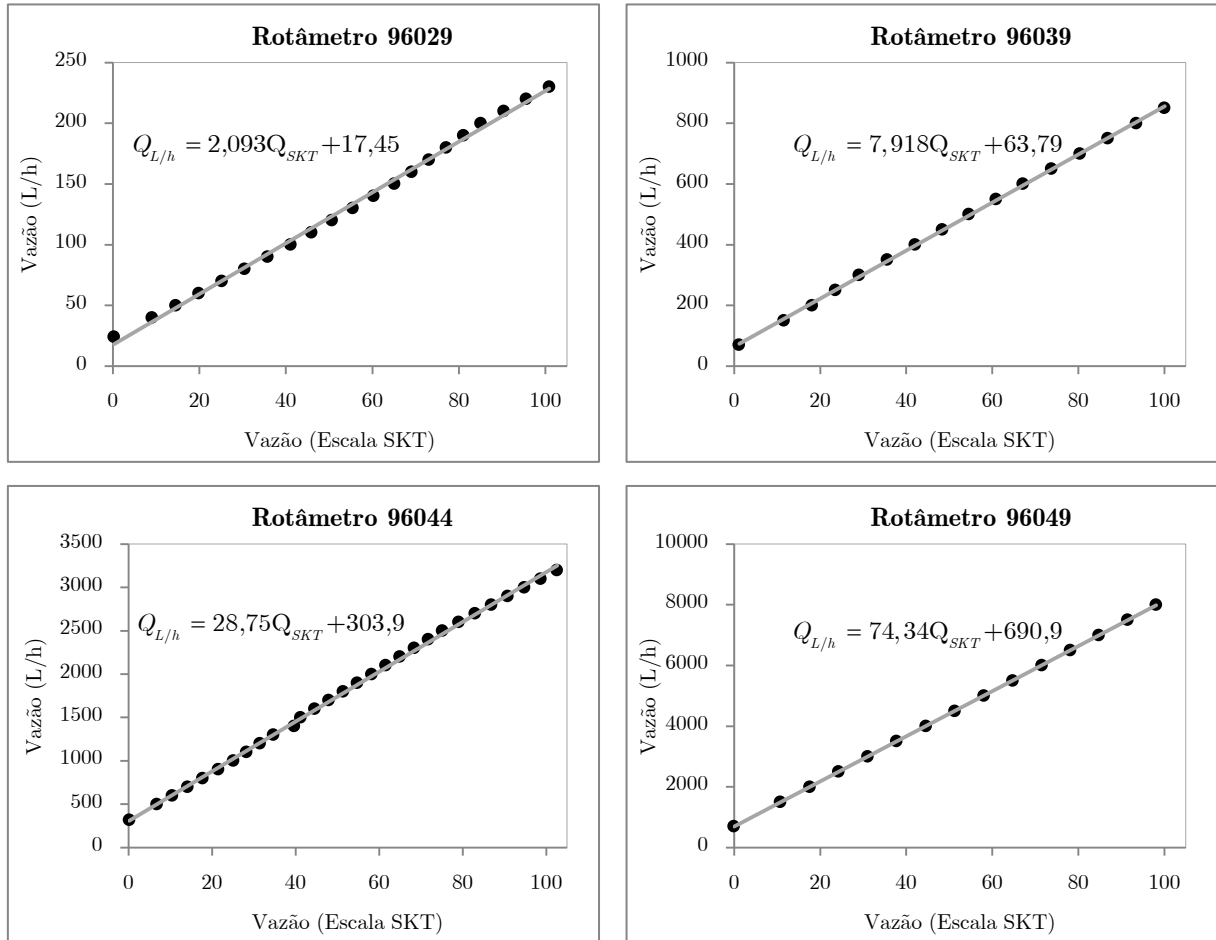


Figura A. 3. Curvas de calibração dos rotâmetros utilizados no presente estudo.

Aplicando o balanço de massa na linha de gás, $\dot{m}_{G,rot}$, e na seção de teste, $\dot{m}_{G,ts}$, mostrados na Figura A. 1, tem-se

$$\dot{m}_{G,rot} = \dot{m}_{G,ts} \cdot \quad (A.5)$$

A vazão mássica da seção de teste é dada por

$$\dot{m}_{G,ts} = \rho_{G,ts} J_G A \quad (A.6)$$

Por sua vez, o rotâmetro em uma posição determinada mostra a vazão do gás para as condições de calibração. Considerando-se que foi calibrado a determinadas condições de pressão, P_{cal} , e temperatura, T_{cal} , precisa-se fazer um balanço de forças como mostrado na Figura A. 1,

$$F_W = F_D + F_B. \quad (\text{A.7})$$

Desenvolvendo-se expressões individuais para as forças da equação (A.7), respectivamente, tem-se que

$$m_{flut}g = \frac{1}{2}C_d\rho_{G,rot}U_{G,rot}^2 + m_{G,flut}g, \quad (\text{A.8})$$

onde m_{flut} é a massa do flutuador, C_d é o coeficiente de arrasto, $\rho_{G,rot}$ é a densidade do gás no rotâmetro e que será medida na saída dele, $U_{G,rot}$ é a velocidade do gás que atravessa o flutuador, e finalmente $m_{G,flut}$ é a massa de gás que é deslocada pelo flutuador. Continuando o desenvolvimento da equação (A.8),

$$\forall_{flut}\rho_{flut}g = \frac{1}{2}C_d\rho_{G,rot}U_{G,rot}^2 + \forall_{flut}\rho_{G,rot}g. \quad (\text{A.9})$$

Rearranjando a equação (A.9),

$$\forall_{flut}g(\rho_{flut} - \rho_{G,rot}) = \frac{1}{2}C_d\rho_{G,rot}U_{G,rot}^2. \quad (\text{A.10})$$

Dado que $\rho_{flut} \gg \rho_{G,rot}$ e exprimindo-se a velocidade como a vazão dividida pela área de passagem do ar na posição do rotâmetro, $A_{G,rot}$,

$$\forall_{flut}\rho_{flut}g = \frac{1}{2}\frac{C_d\rho_{G,rot}Q_{G,rot}^2}{A_{G,rot}^2}. \quad (\text{A.11})$$

Rearranjando para $Q_{G,rot}$, tem-se que

$$Q_{G,rot}^2 = \frac{\overbrace{2\forall_{flut}g\rho_{flut}A_{G,rot}^2}^{\text{constante}}}{C_d} \frac{1}{\rho_{G,rot}} = C_1^2 \frac{1}{\rho_{G,rot}} \quad (\text{A.12})$$

onde C_1 é uma constante. Finalmente, tem-se uma equação para a vazão do gás no rotâmetro, dada em função da densidade medida e da constante C_1 ,

$$Q_{G,rot} = C_1 \sqrt{\frac{1}{\rho_{G,rot}}}. \quad (\text{A.13})$$

Aplicando-se a equação (A.13) para as condições de calibração, $Q_{G,cal}$ e $\rho_{G,cal}$, e para as condições de medição, $Q_{G,rot}$ e $\rho_{G,rot}$, e dividindo-se ambas as expressões, tem-se a equação para calcular a vazão real de gás no rotâmetro em função da vazão indicada pelo flutuador.

$$Q_{G,rot} = Q_{G,cal} \sqrt{\frac{\rho_{G,cal}}{\rho_{G,rot}}}. \quad (\text{A.14})$$

A densidade do gás foi calculada aplicando a hipótese do ar como gás ideal,

$$\rho_G = \frac{P_G}{RT_G}, \quad (\text{A.15})$$

onde P_G e T_G são a pressão e temperaturas determinadas, e R é a constante específica do gás, que para o ar é de 287 J/kg.K .

Após ter a vazão de gás real no rotâmetro, $Q_{G,rot}$, foi calculada a vazão mássica no rotâmetro,

$$\dot{m}_{G,rot} = \rho_{G,rot} Q_{G,rot}. \quad (\text{A.16})$$

Finalmente, aplicando as equações (A.6) e (A.16) em (A.5), tem-se uma expressão para J_G dada por

$$J_G = \frac{\rho_{G,rot} Q_{G,rot}}{\rho_{G,ts} A} \quad (\text{A.17})$$

onde as densidades são calculadas da equação (A.15) e a vazão de gás no rotâmetro é obtida das equações (A.14).

APÊNDICE B – OBTENÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIO

Neste apêndice é descrito o procedimento a seguir para a obtenção da fração de vazio a partir das tensões elétricas recebidas em cada ponto de cruzamento do WMS.

A partir da medida da capacitância elétrica em cada ponto de cruzamento, pode ser utilizado o algoritmo proposto por Da Silva (2008) para obter a série temporal dos dados. O esquema elétrico do cruzamento entre dois nós é mostrado na Figura B. 1, onde V_i representa a tensão elétrica alternada de excitação e C_x é a capacitância elétrica no cruzamento. Seguidamente, tem-se colocado um amplificador, onde C_f e R_f são a capacitância e resistência elétrica nesse amplificador, enquanto que V_o é o potencial na saída do amplificador. No entanto, para o sinal ser digitalizado, é necessário convertê-lo em corrente contínua, o que é feito mediante um detector logarítmico com saída de tensão elétrica contínua V_{log} para o seu posterior processamento e conseguinte obtenção da série temporal de fração de vazio.

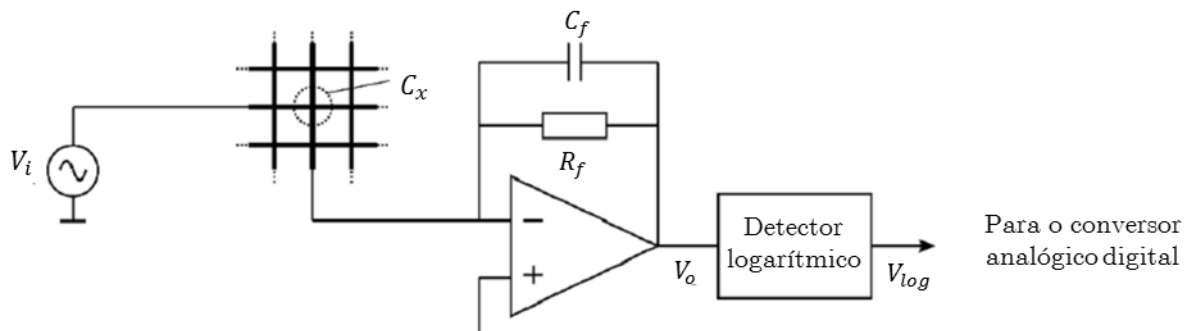


Figura B. 1. Esquema elétrico do cruzamento de dois eletrodos do WMS. Adaptado de Da Silva (2008).

A obtenção da fração de vazio se dá seguindo uma ordem. Primeiramente, é aplicada uma tensão alternada de excitação, na ordem dos 5 MHz, ao arranjo de fios emissores, os quais têm um campo elétrico específico de acordo com o fluido presente entre cada nó. O campo elétrico resultante é medido pelo arranjo de fios receptores. Essa impedância elétrica é repassada para um amplificador. A hipótese feita por Da Silva (2008) foi de que se trata de um amplificador ideal e a saída V_o é expressa mediante a função complexa dada por

$$V_o = -V_i \left(\frac{j\omega C_x R_f}{1 + j\omega C_f R_f} \right) \quad (\text{B.1})$$

onde ω é a frequência angular da tensão fornecida. Como a frequência angular é muito alta a respeito das outras variáveis, a equação pode ser simplificada para um circuito de predominância capacitiva, dado pela equação

$$V_o = -V_i \left(\frac{C_x}{C_f} \right) \quad (\text{B.2})$$

A tensão alternada de saída, V_o , é convertida para corrente contínua no detector logarítmico, cuja tensão de saída é dada em função da tensão na entrada do detector,

$$V_{\log} = V_a \ln \left(\frac{V_o}{V_b} \right) \quad (\text{B.3})$$

onde V_a e V_b são constantes do circuito integrado do detector. Também é sabido que a capacitância elétrica pode ser expressa como uma função linear da permissividade elétrica no ponto de medição, ε_x . Portanto, a Equação (B.3) pode ser expressa em função da permissividade elétrica do nó

$$V_{\log} = a \ln(\varepsilon_x) + b \quad (\text{B.4})$$

onde a e b são constantes que dependem do circuito e da geometria do sensor, as quais são determinadas mediante medições de referência. Essas medições de referência são feitas com a resposta dada para tubo vazio, V_L , e para a tubulação cheia d'água, V_H , as quais são tomadas durante um tempo e, posteriormente, calculado o valor médio no tempo. Aplicando estes valores de referência na equação (B.4), podem ser calculados os valores das constantes a e b . Posteriormente, como indicado por Da Silva (2008), é possível calcular a fração de vazio em um ponto e instante determinado, α_x , em função das permissividades elétricas medidas, ε_x , e calculadas, ε_H e ε_L , como

$$\alpha_x = \frac{\varepsilon_H - \varepsilon_x}{\varepsilon_H - \varepsilon_L} \quad (\text{B.5})$$

Após calcular a fração de vazio em um ponto da malha de eletrodos, é necessário obter valores para cada região da tubulação correspondente aos nós do WMS. Isso é feito aplicando-se o valor de um nó determinado a uma área contígua, A_x , na seção de medição, a qual é, para os nós interiores da malha utilizada no presente estudo, de um quadrado de $2,1 \times 2,1 \text{ mm}^2$ com centro no ponto de cruzamento. No entanto, para os nós de fronteira próximos das paredes da tubulação, é aproximada uma área correspondente.

Seguidamente, a fração de vazio média correspondente à seção de medição é calculada pela equação

$$\alpha(x, t) = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_x A_x \quad (\text{B.6})$$

onde n é o número de nós em uma fileira determinada. Ao aplicar a equação (B.6) ao longo do tempo de medição com a frequência de aquisição de 500 Hz, a qual foi testada e recomendada por Dos Santos (2011), obtém-se a série temporal da fração de vazio.

APÊNDICE C – PROCESSAMENTO DA SÉRIE TEMPORAL DE FRAÇÃO DE VAZIO

Neste apêndice é descrita a metodologia para o processamento do sinal obtido pelo WMS, utilizando o conceito de fator de corte para identificar bolhas alongadas e pistões líquidos.

Um exemplo da transformação da fração de vazio, utilizando a função binária da equação (3.2), é mostrado na Figura C. 1, onde 1 representa a região da bolha e 0 representa o pistão de líquido. O ponto medido corresponde a um J_L de 0,5 m/s e J_G de 0,5 m/s. No processamento foi utilizado um FC de 25% de fração de vazio, resultando na função binária mostrada. No entanto, devem ser feitas algumas considerações para obter corretamente o esquema de bolhas e pistões desejado.

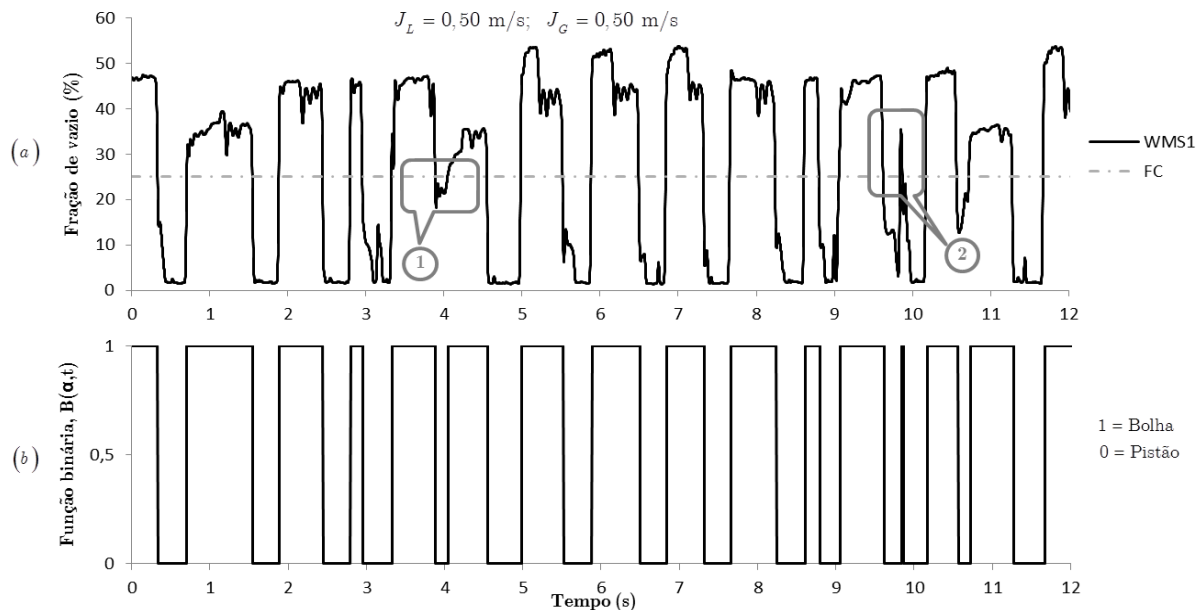


Figura C. 1. Transformação da série temporal de fração de vazio (a) na função binária (b).

Na Figura C. 1a, observa-se que quando a bolha é muito comprida, uma onda de pressão no líquido atravessa o meio da bolha. Na série temporal isso é observado como uma queda do valor da fração de vazio, como foi observada na região indicada com (1) na Figura C. 1a, mas continua sendo a mesma bolha. A primeira alternativa de solução seria reduzir o FC, mas foi observado que isso traz consigo outros

problemas que são observados na região (2) da Figura C. 1a, dado que consideraria algumas bolhas do pistão como bolhas alongadas.

Portanto, uma solução alternativa foi proposta, utilizando um segundo fator de corte, que pode ser descrito como

$$\text{Se } \bar{\alpha}_{S_i} > FC2 \Rightarrow B_i = B_i \cup P_i \cup B_{i+1} \tag{C.1}$$

onde B_i e P_i são as região que formam a i -ésima célula unitária, contados a partir do início da série temporal, enquanto que B_{i+1} e P_{i+1} formam a subsequente célula unitária. Por sua vez, a fração de vazio média é dada por

$$\bar{\alpha}_S = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_{S,j} \tag{C.2}$$

onde n é o número de *frames* em uma região do pistão. Então, se a fração de vazio média do pistão P_i for maior do que o segundo fator de corte (FC2), o pistão e as duas bolhas contíguas passam a formar uma bolha só, como mostrado na Figura C. 2.

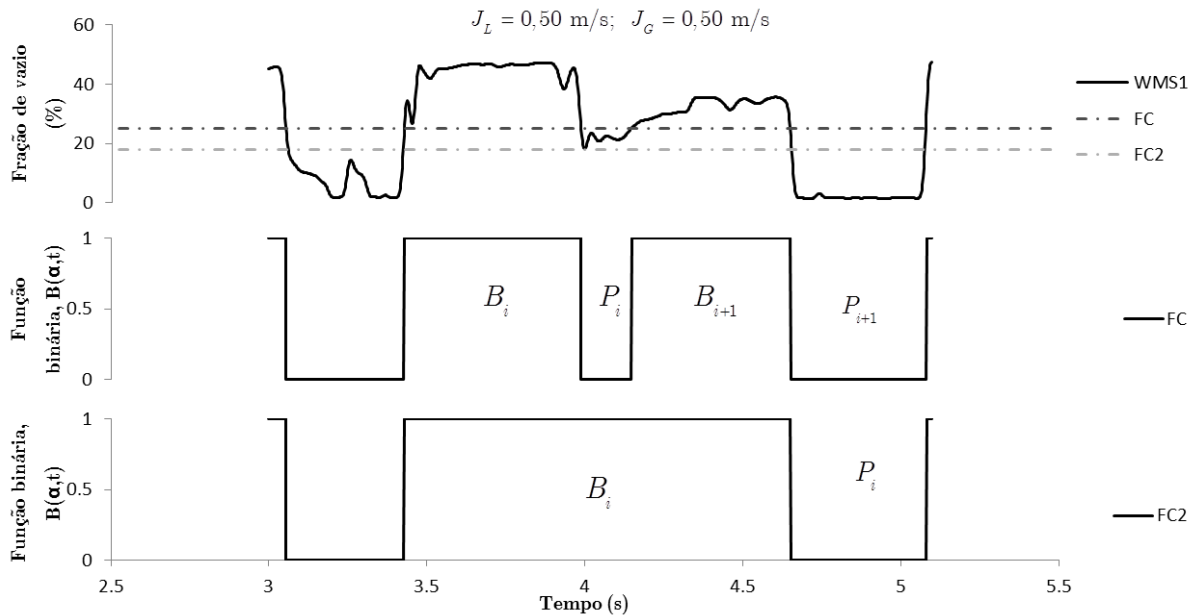


Figura C. 2. Filtro da série temporal fração de vazio para detectar ondas de pressão no pistão líquido debaixo de algumas bolhas compridas.

O segundo problema observado na Figura C. 2.e identificado como a região (2), pode ser explicado como a existência de uma pequena ou algumas bolhas pequenas no pistão, que não podem ser consideradas como bolhas alongadas, embora a fração de vazio atinja valores consideráveis. Este critério aplica-se calculando, primeiramente, toda a série temporal de fração de vazio. Após ter uma quantidade determinada de bolhas e pistões, calcula-se a média do tempo de passagem de cada bolha, \bar{t}_B , dado por

$$\bar{t}_B = \frac{\text{Tempo total de passagem de todas as bolhas}}{\text{Número de bolhas}}. \quad (C.3)$$

Logo depois, é utilizado outro fator de corte, FC3, com respeito ao tempo mínimo que deve ter uma bolha para ser considerada golfada, dado por

$$\text{Se } t_{B,i} < FC3 \times \bar{t}_B \Rightarrow P_{i-1} = P_{i-1} \cup B_i \cup P_i \quad (C.4)$$

onde $t_{B,i}$ é o tempo de passagem da i -ésima bolha pelo WMS. O esquema do efeito do FC3, que geralmente é fixada em torno de 0,1, é mostrado na Figura C. 3.

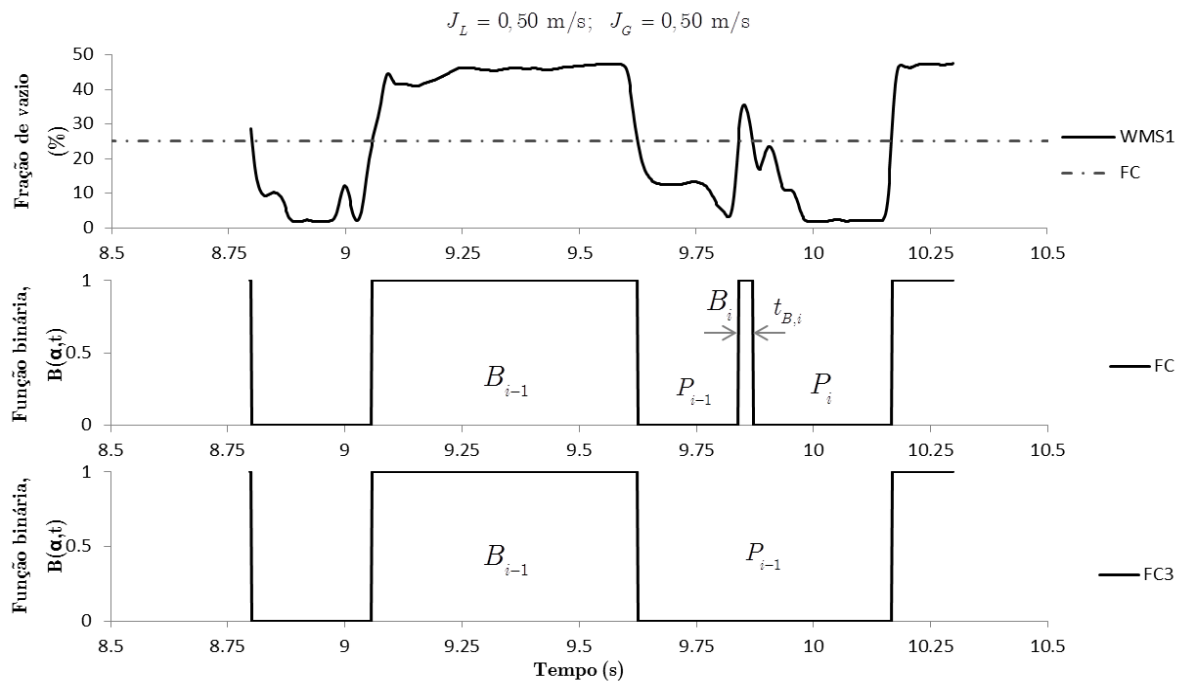


Figura C. 3. Filtro da série temporal fração de vazio para distinguir bolhas alongadas das bolhas dispersas no pistão.

Agora, a obtenção do fator de corte desejado é feita observando simultaneamente o comportamento do número de bolhas detectado, a mediana da velocidade da bolha alongada e o desvio padrão da velocidade.

Um exemplo da análise da escolha do fator de corte é mostrado na Figura C. 4. Primeiramente é observada a faixa onde permanece constante do número de bolhas, que no exemplo fica entre 0,35 e 0,55. Logo depois, é calculada a velocidade média de toda a série temporal mediante uma correlação cruzada, que no exemplo é de 4,69 m/s. Então, na gráfica da mediana da velocidade é procurado um valor que seja igual ou aproximadamente igual da velocidade da correlação e que, ao mesmo tempo, mantenha-se numa faixa constante. No exemplo, essa faixa fica entre 0,2 e 0,4 e um FC2 de 1. Portanto, a faixa fica reduzida a um FC entre 0,35 e 0,4. Finalmente, é escolhido um fator de corte que tenha o menor desvio padrão nessa faixa, que no caso é de 0,40 de FC com um desvio padrão de 1,2 m/s.

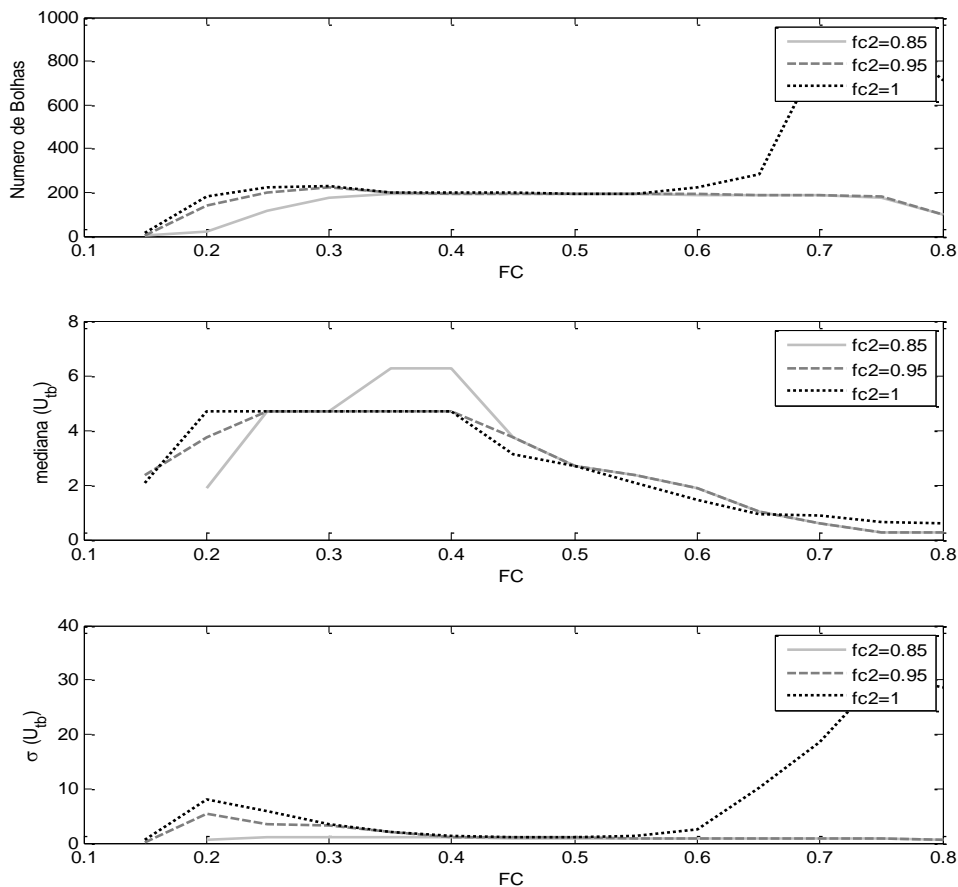


Figura C. 4. Exemplo da análise do fator de corte a ser utilizado em cada ponto de medição.

APÊNDICE D – MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

Neste apêndice são mostradas as principais relações para obter as relações entre os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás.

Assim, utilizando a notação apresentada por Holman (2001), para duas funções, x e y , que se deseja correlacionar, considera-se a função mais simples possível, a função linear das duas variáveis x e y , da forma

$$y = ax + b, \quad (\text{D.1})$$

sendo a e b constantes.

Cabe ressaltar que a análise feita para função linear pode ser estendida para estabelecer outras correlações mais complexas. Assim, no caso da função linear da equação (D.1), é definida a variância da função, dada por

$$\text{var}(y) = \sum_{i=1}^n [y_i - y(x_i)]^2, \quad (\text{D.2})$$

como uma medida do desvio de uma variável, y , em relação a sua média, \bar{y} , ou de um valor predito por uma correlação, onde n é o número de observações.

A correlação será mais bem comportada se a variância tiver um valor mínimo, o qual pode ser identificado quando as derivadas da função com respeito a a e b , da equação (D.1), são mínimas. Derivando, primeiramente, com respeito a a

$$\frac{\partial}{\partial a} \left\{ \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 \right\} = 0, \quad (\text{D.3})$$

tem-se que

$$-2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0, \quad (\text{D.4})$$

o qual resulta em

$$\sum_{i=1}^n y_i = a + b \sum_{i=1}^n x_i . \quad (\text{D.5})$$

Analogamente para a derivada com respeito a b , tem-se que

$$\frac{\partial}{\partial b} \left\{ \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 \right\} = 0 \quad (\text{D.6})$$

$$-2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a - bx_i) = 0 \quad (\text{D.7})$$

resultando em

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 . \quad (\text{D.8})$$

Agora, as equações (D.5) e 4.1 podem ser reescritas como

$$\bar{y} = a + b\bar{x} \quad (\text{D.9})$$

$$\bar{x}\bar{y} = a\bar{x} + b\bar{x}^2 \quad (\text{D.10})$$

para, assim, obter uma função que passe pelo ponto (\bar{x}, \bar{y}) . Isto é resolvido a partir das equações (D.5) e 4.1, resultando em

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (\text{D.11})$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (\text{D.12})$$

Por outro lado, a correlação linear resultante, pode estar correta ou não, para isso foram utilizados alguns conceitos estatísticos para a posterior verificação. O mais

importante deles é o coeficiente de correlação de Pearson, R . Este coeficiente é relacionado com a covariância, definida como uma medida da dependência de duas variáveis, x e y . Assim, a covariância é definida probabilisticamente como

$$\text{cov}(xy) = p[(x - x')(y - y')] \quad (\text{D.13})$$

onde x' e y' são os valores da reta predita na correlação. O conceito do coeficiente de correlação de uma população, ρ_{xy} , é definido em função da covariância e das variâncias de cada variável independente, mediante a definição

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(xy)}{\sqrt{\text{var}(x)\text{var}(y)}} \quad (\text{D.14})$$

onde as variâncias individuais de cada variável são dadas por

$$\text{var}(x) = p[(x - x')^2] \quad (\text{D.15})$$

$$\text{var}(y) = p[(y - y')^2] \quad (\text{D.16})$$

Dado que as amostras que resultam do tratamento dos dados são finitas é impossível obter o coeficiente de correlação da população. Então, é definido, analogamente, o coeficiente de correlação de uma amostra, R ,

$$R = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\sigma_x \sigma_y}} \quad (\text{D.17})$$

ou, expresso de outra maneira,

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{D.18})$$

APÊNDICE E – ANÁLISE DE INCERTEZAS NA MEDIÇÃO

Neste apêndice são estimadas as incertezas presentes na medição presentes no processo de medição do presente estudo, cujo objetivo é calcular a incerteza na medição das velocidades superficiais do líquido e do gás, seguindo a metodologia utilizada por Fox et al. (2006).

Em geral, uma variável R_n pode ser expressa como $R_n = R_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$, cujo efeito sobre a medição de uma medição x_i é dada por

$$\delta R_{n,i} = \frac{\partial R_n}{\partial x_i} \delta x_i, \quad (\text{E.1})$$

entanto que a variação relativa de R_n é dada por

$$\frac{\delta R_i}{R} = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\delta x_i}{x_i} \quad (\text{E.2})$$

Da equação (E.2) é possível estimar a incerteza no resultado devido às variações em x_i . Assim, é definida a incerteza relativa mediante a equação

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} u_{x_i} \quad (\text{E.3})$$

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

$$u_R = \pm \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{E.4})$$

As incertezas relativas das variáveis envolvidas na medição das velocidades superficiais do líquido e do gás serão avaliadas de acordo com a equação E.3.

Primeiramente, é necessário definir quais são as incertezas relativas dos instrumentos de medição de vazão, pressão, temperatura e na medição do diâmetro. Os valores utilizados são apresentados na Tabela E. 1.

Tabela E. 1. Incerteza relativa dos instrumentos utilizados

Variável	Incerteza relativa
D	$\pm 0,10\%$
P_{rot}	$\pm 0,05\%$
P_{ts}	$\pm 0,05\%$
T_{rot}	$\pm 0,25\%$
T_{ts}	$\pm 0,25\%$
Q_L	$\pm 0,20\%$
$Q_{G,rot}$	$\pm 2,00\%$

A incerteza no diâmetro interno da tubulação, D , é estimada como a metade da menor divisão da escala do instrumento que os mediu, no caso um paquímetro, que apresenta resolução de 0,05 mm. Para obter a incerteza relativa foi dividido esse valor pelos respectivos diâmetros.

A incerteza no valor de Q_L é garantida por certificado do instrumento que mede a vazão de líquido.

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

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

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

Os valores obtidos são utilizados nas equações seguintes:

$$J_G = \frac{P_{rot}}{P_{ts}} \cdot \frac{\left(Q_{G,rot} \sqrt{\frac{P_{cal}}{(P_{tot} + P_{atm})} \cdot \frac{(T_{ts} + 273,15)}{(T_{cal} + 273,15)}}} \right)}{\left(\frac{\pi D^2}{4} \right)}, \text{ e} \quad (\text{E.5})$$

$$J_L = \frac{Q_L}{\left(\frac{\pi D^2}{4} \right)}, \quad (\text{E.6})$$

onde $P_{cal} = 101325 Pa$ e $T_{cal} = 25^\circ C$.

Finalmente, são calculadas as incertezas de medição das velocidades superficiais na linha de teste, as quais são mostradas na Tabela E. 2

Tabela E. 2. Incerteza na medição das velocidade superficiais.

Variável	Incerteza relativa
J_L	$\pm 0,28\%$
J_G	$\pm 2,01\%$

APÊNDICE F – FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA OS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO INTERMITENTE

Neste apêndice são mostradas as distribuições estatísticas construídas em função das equações apresentadas no Capítulo 4 e das distribuições experimentais para cada ponto da grade de testes, com a finalidade de avaliar as predições feitas.

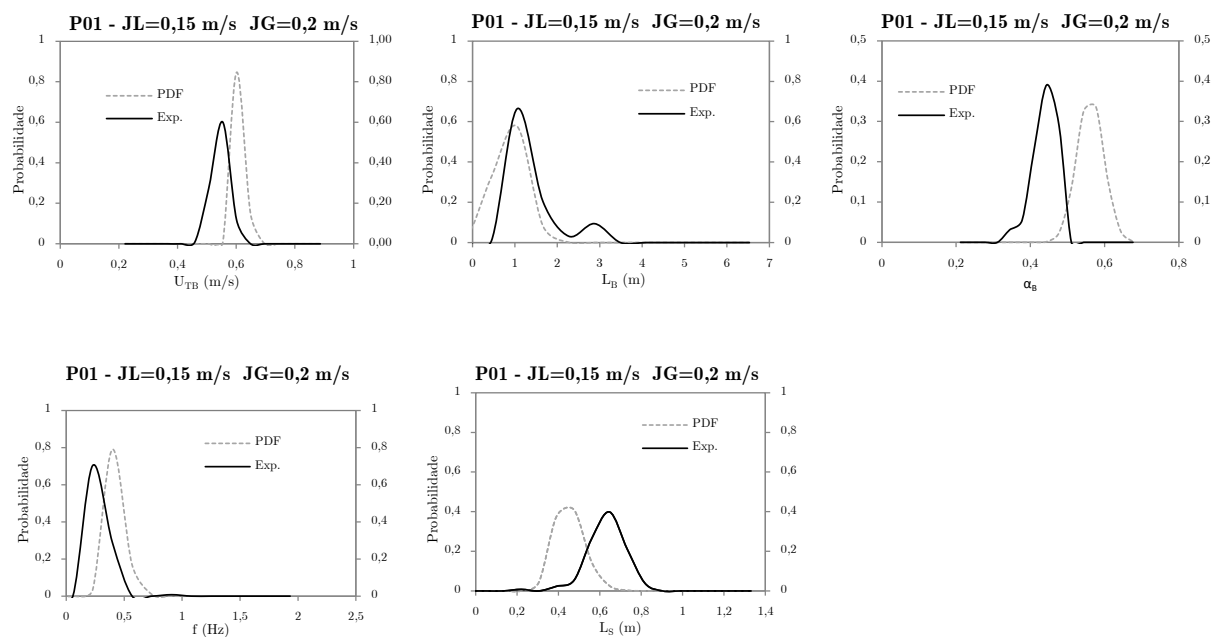


Figura F. 1. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 01.

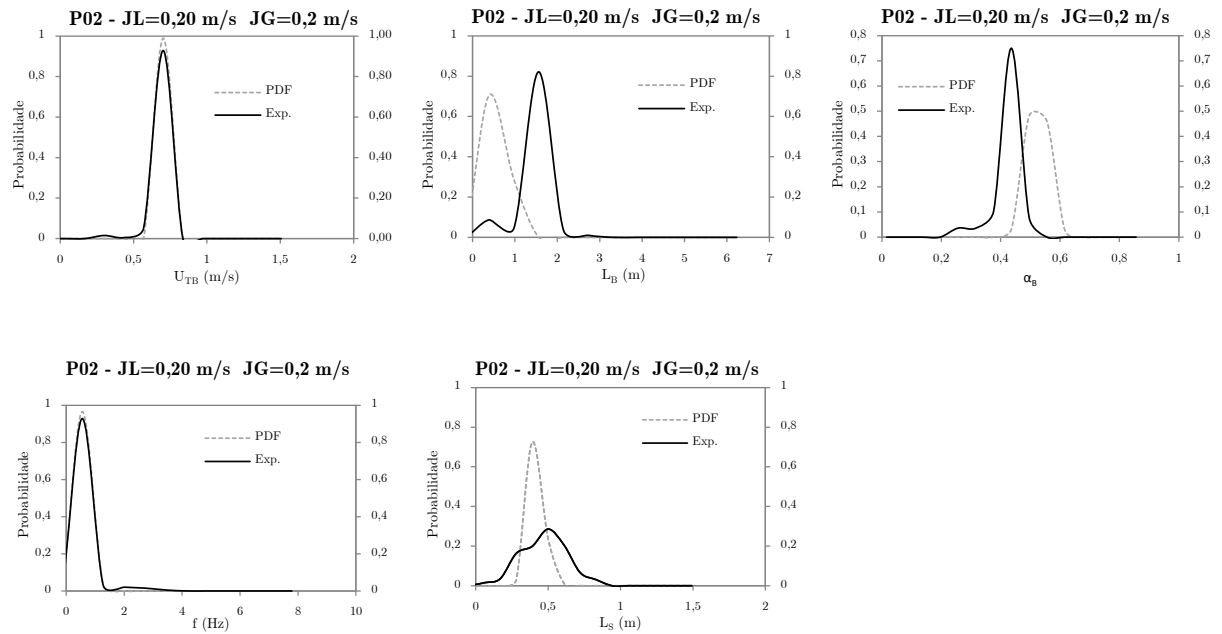


Figura F. 2. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 02.

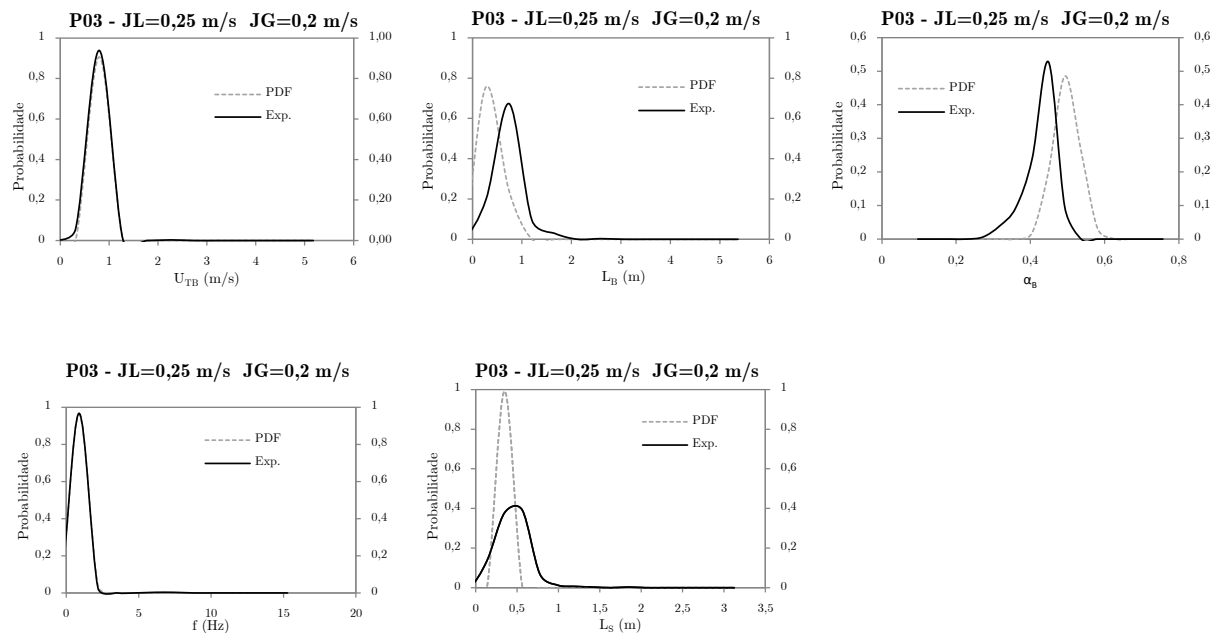


Figura F. 3. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 03.

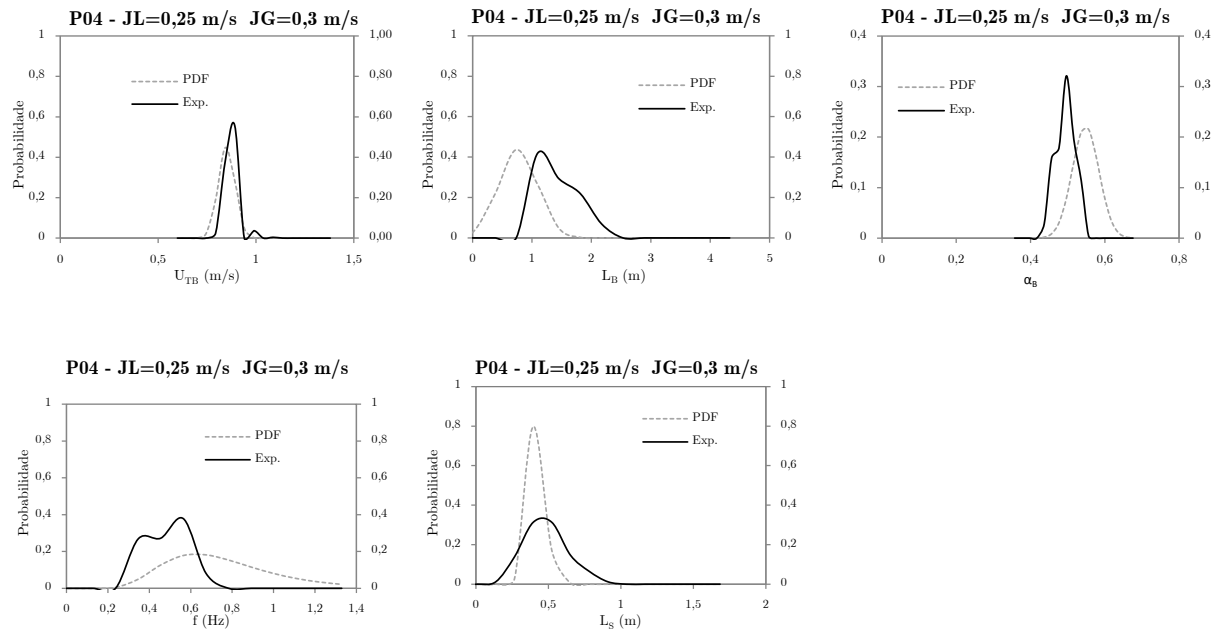


Figura F. 4. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 04.

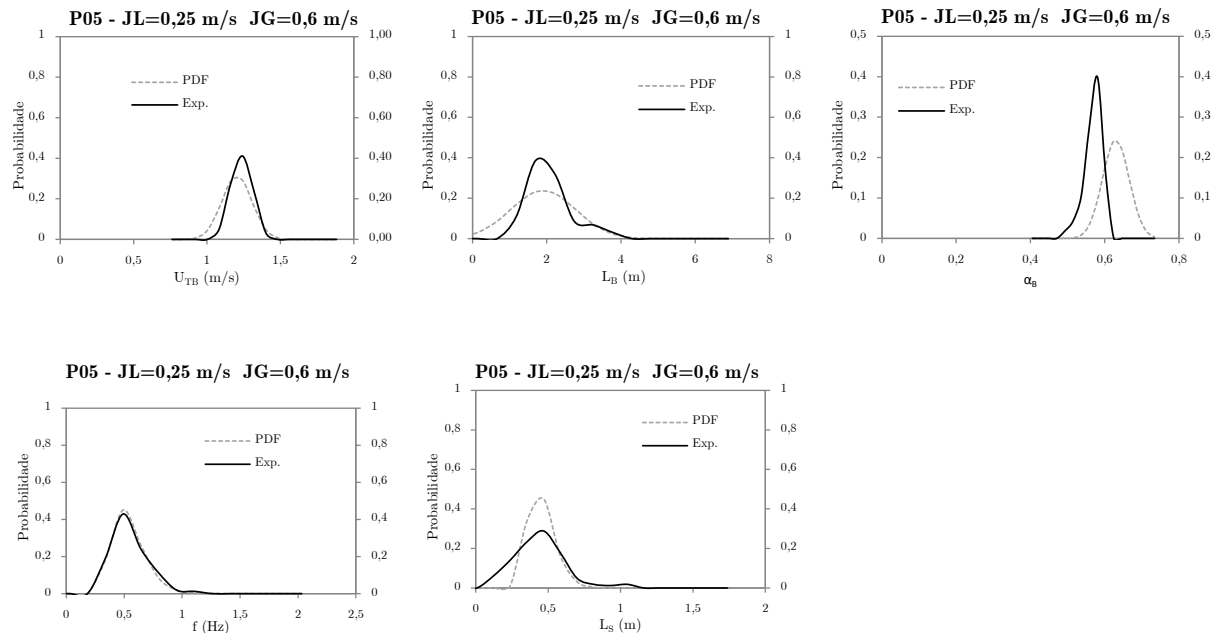


Figura F. 5. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 05.

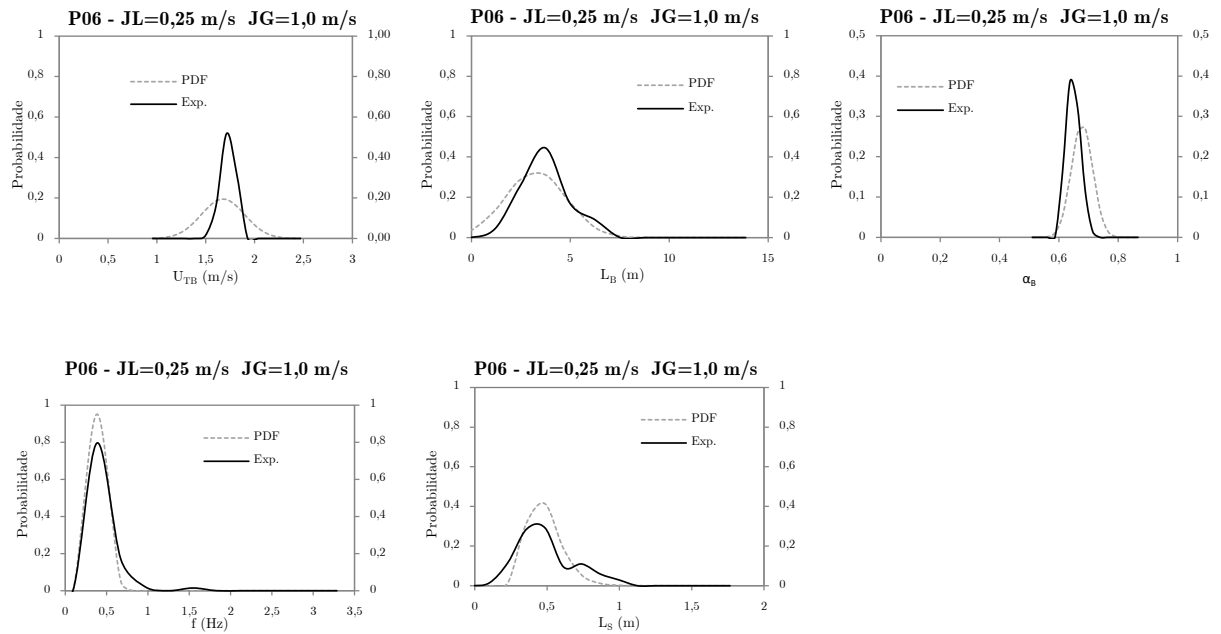


Figura F. 6. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 06.

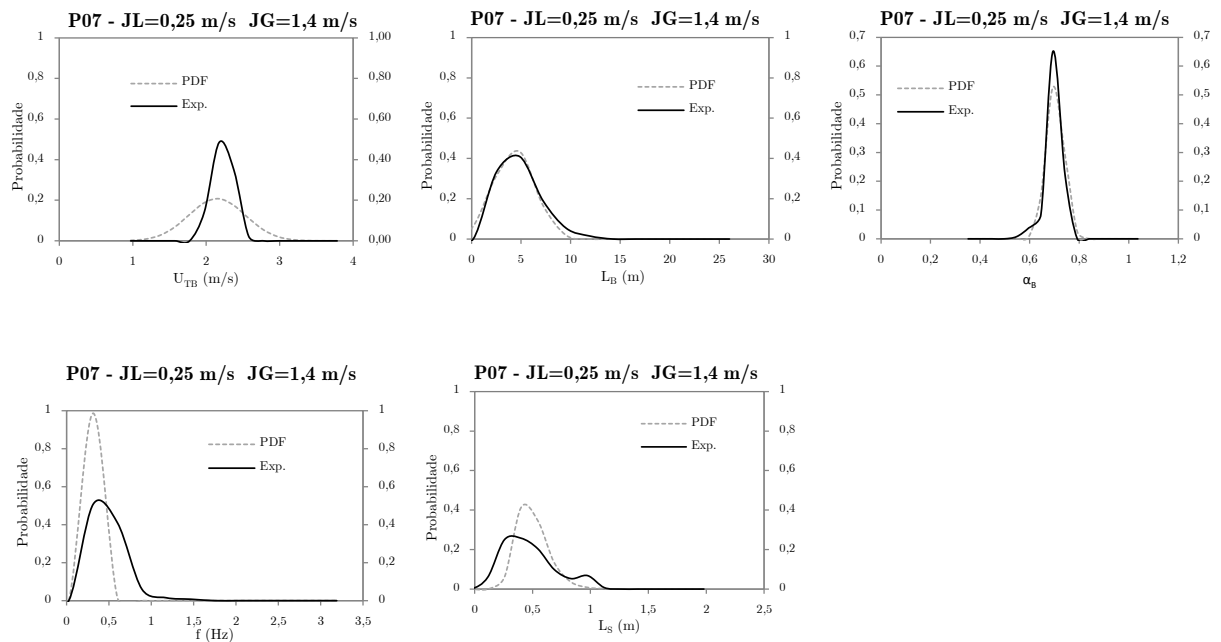


Figura F. 7. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 07.

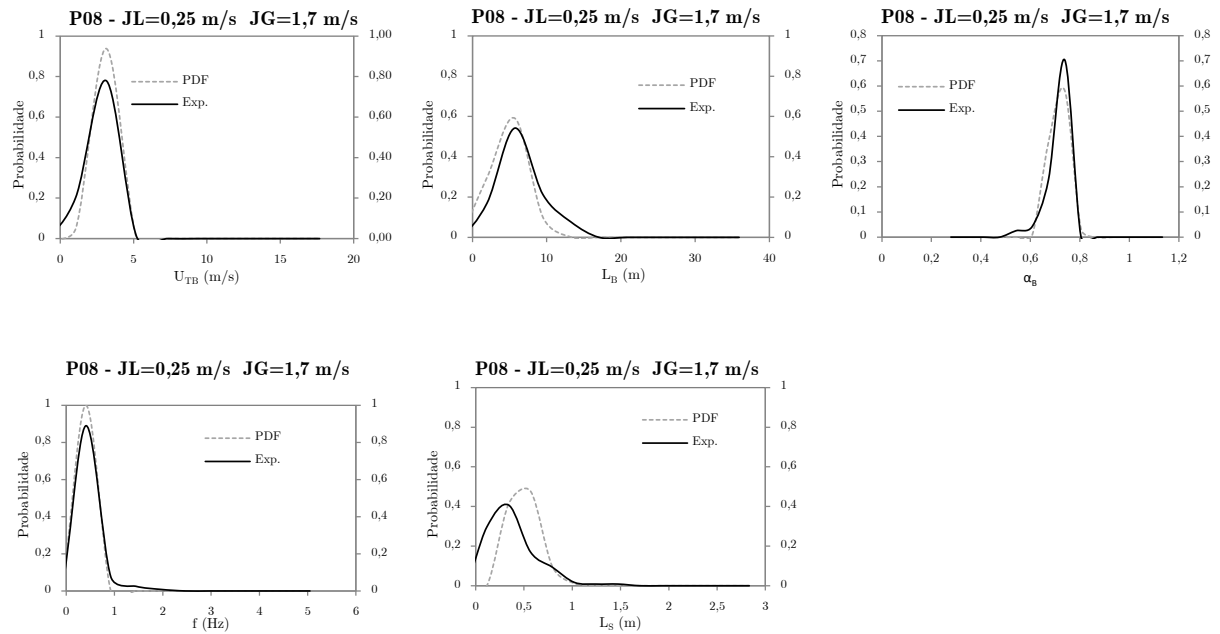


Figura F. 8. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 08.

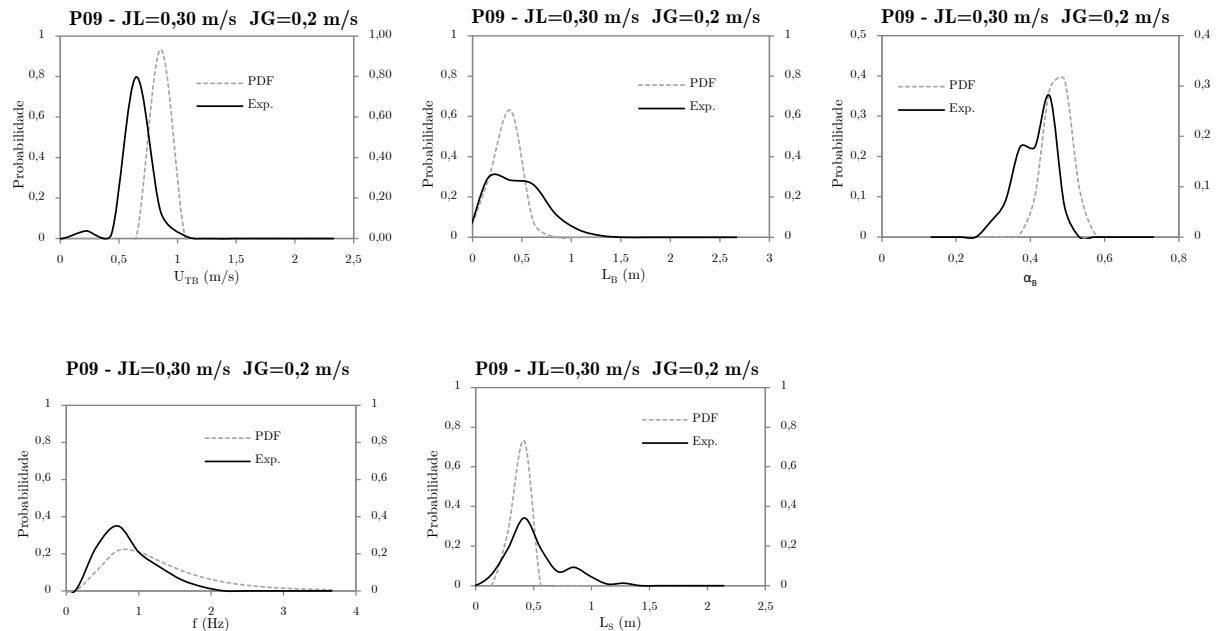


Figura F. 9. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 09.

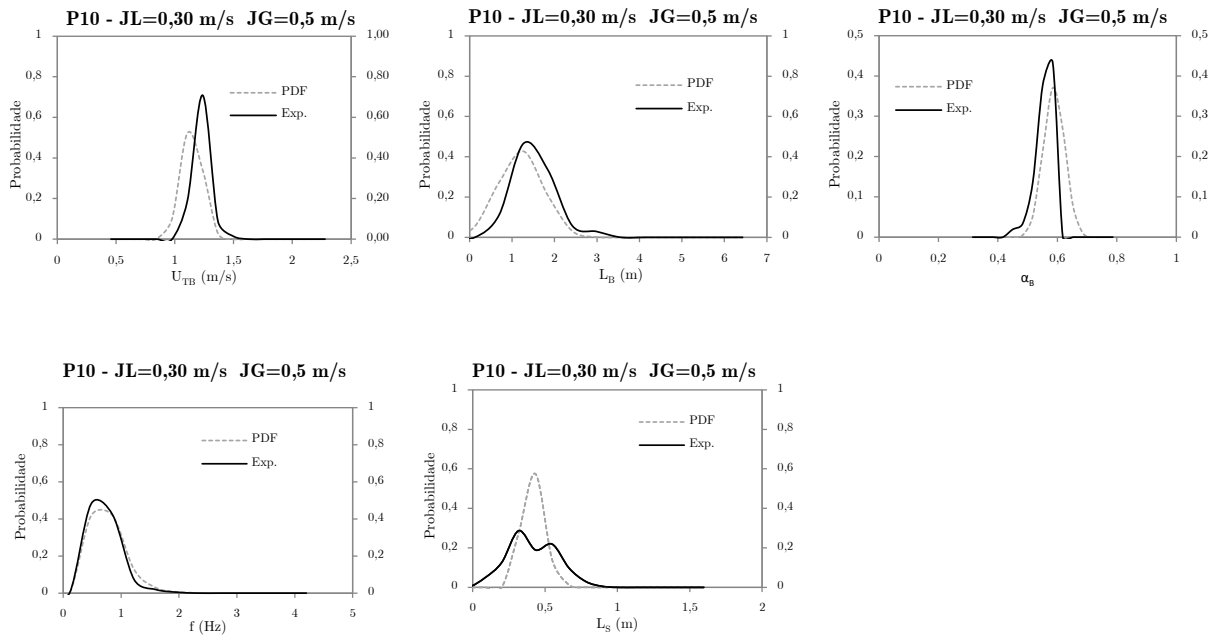


Figura F. 10. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 10.

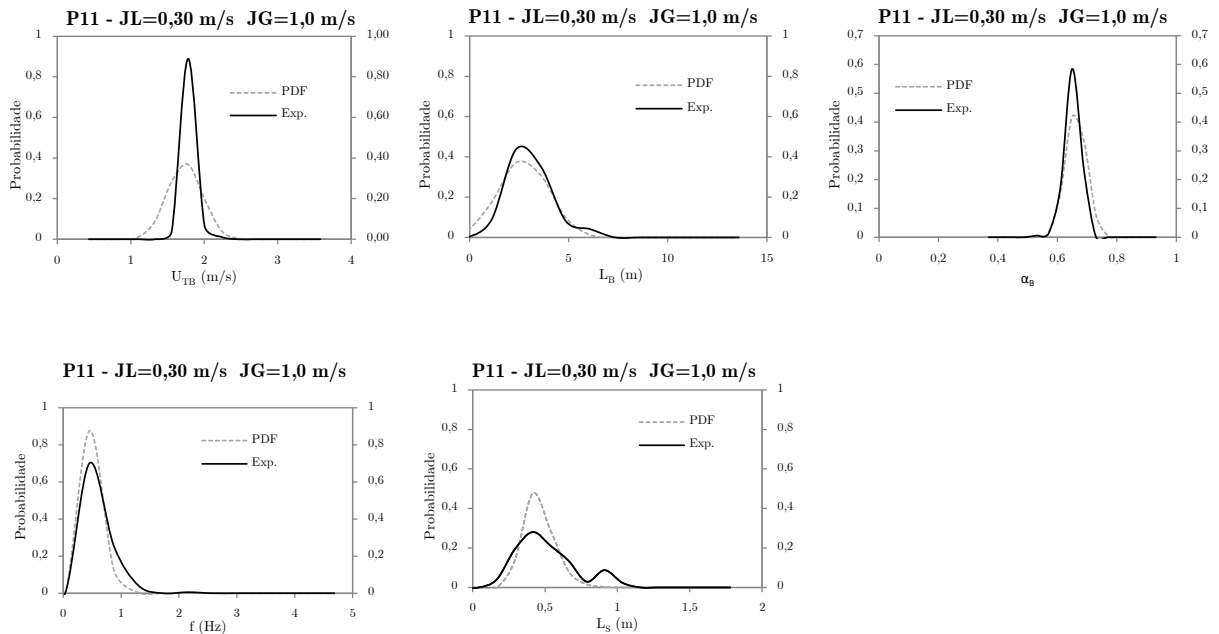


Figura F. 11. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 11.

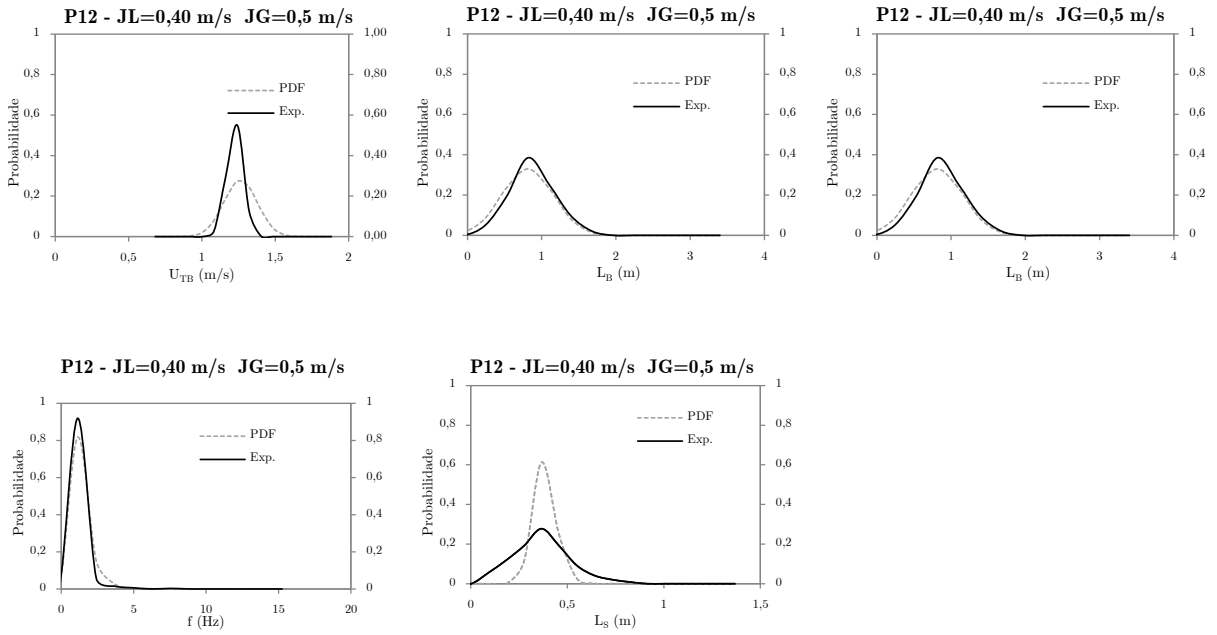


Figura F. 12. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 12.

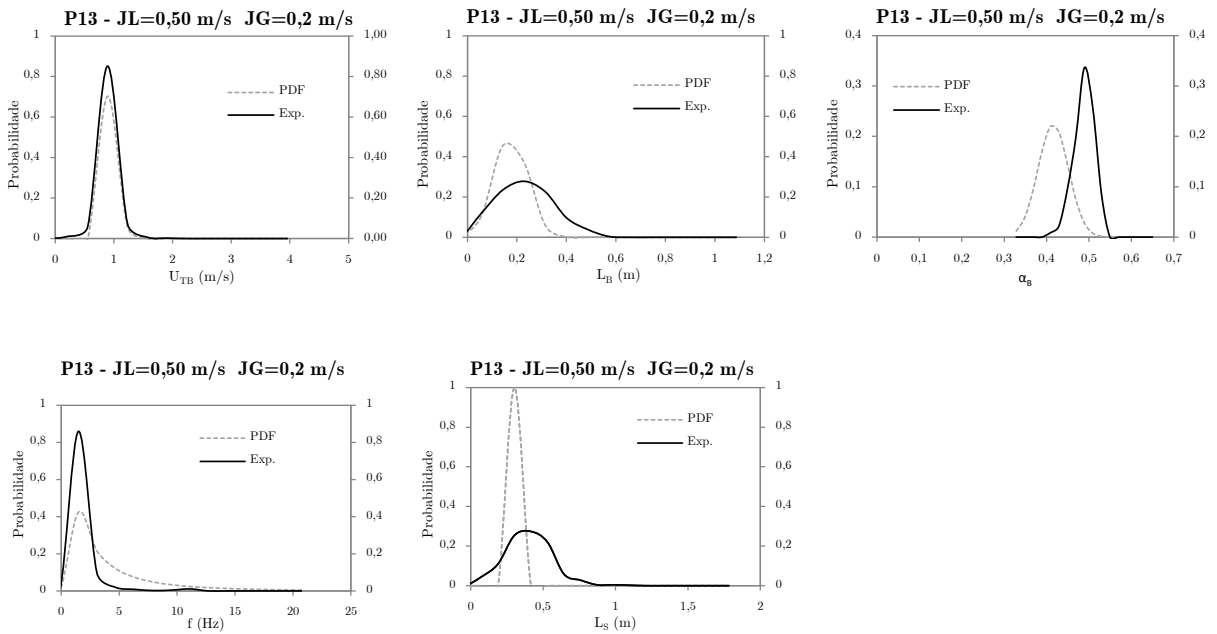


Figura F. 13. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 13.

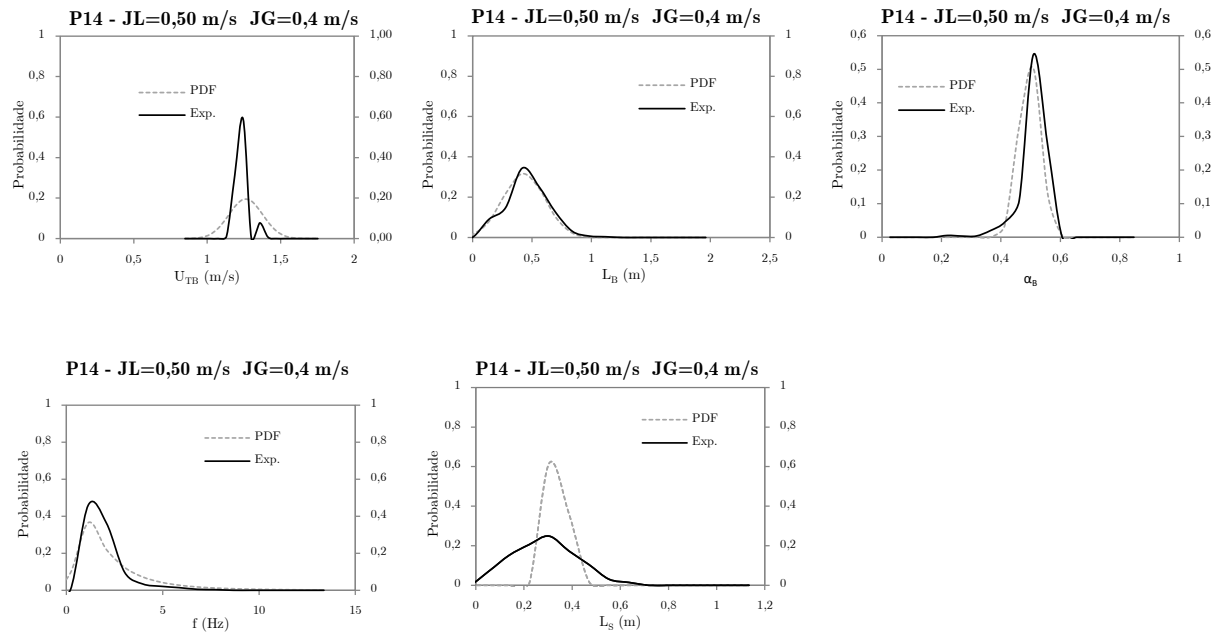


Figura F. 14. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 14.

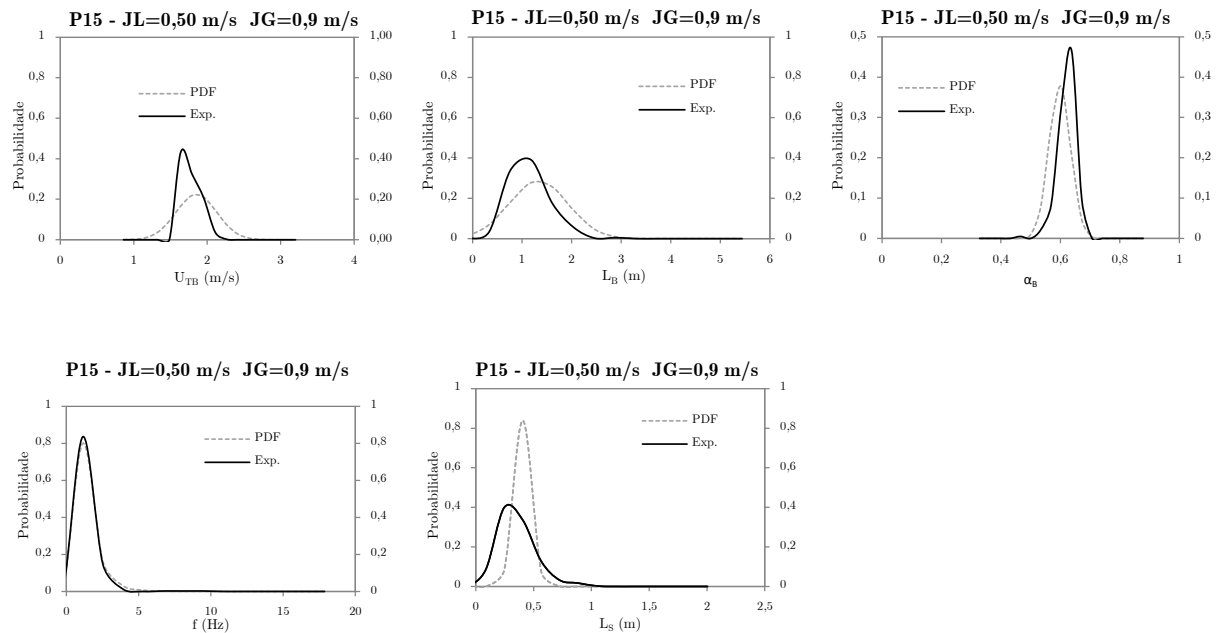


Figura F. 15. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 15.

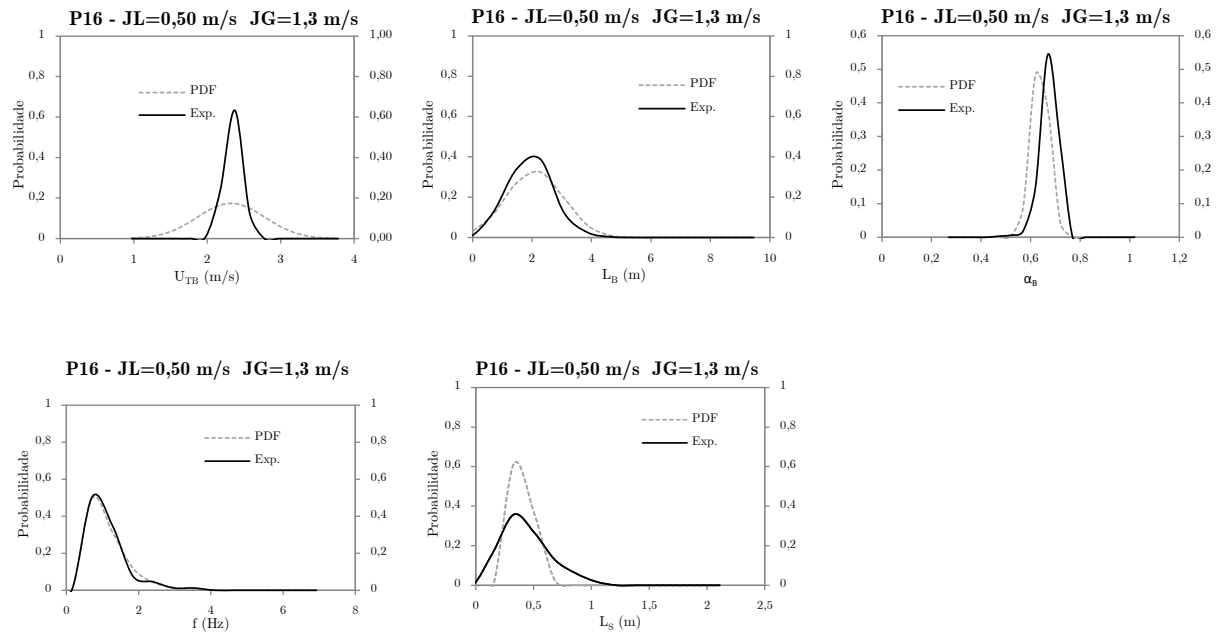


Figura F. 16. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 16.

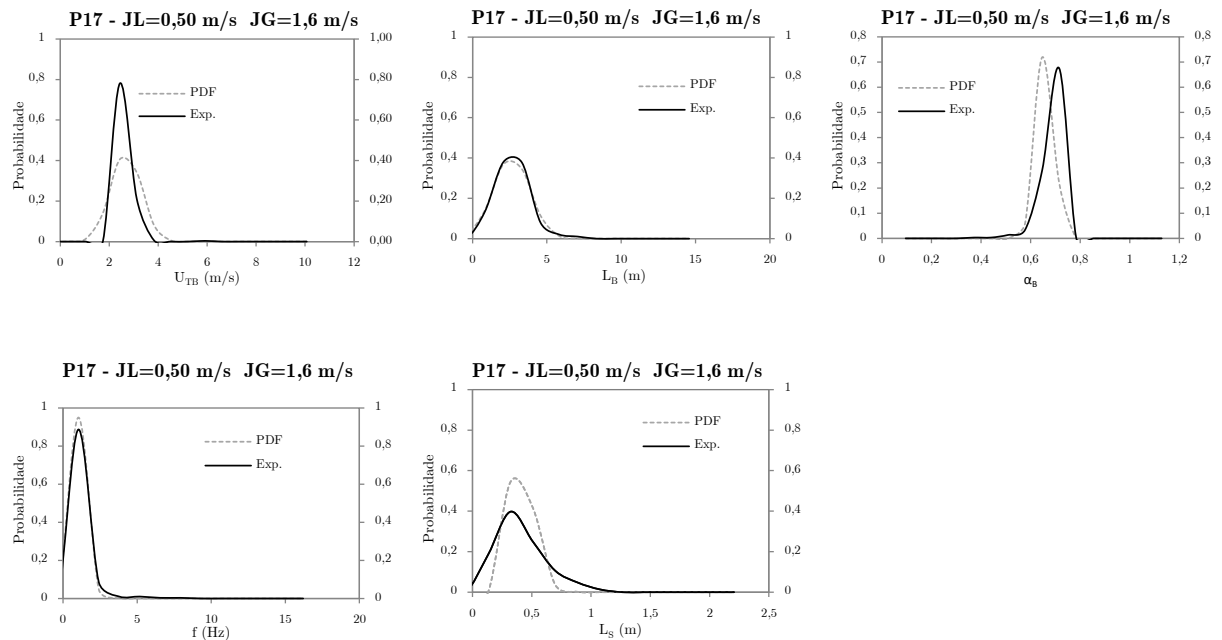


Figura F. 17. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 17.

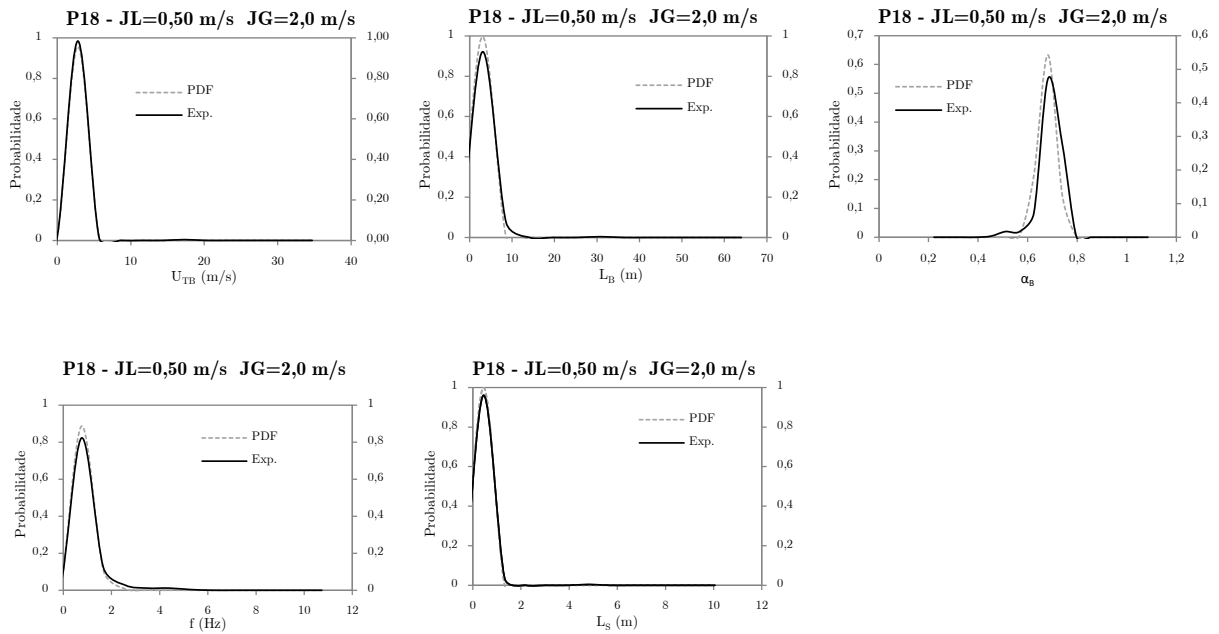


Figura F. 18. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 18.

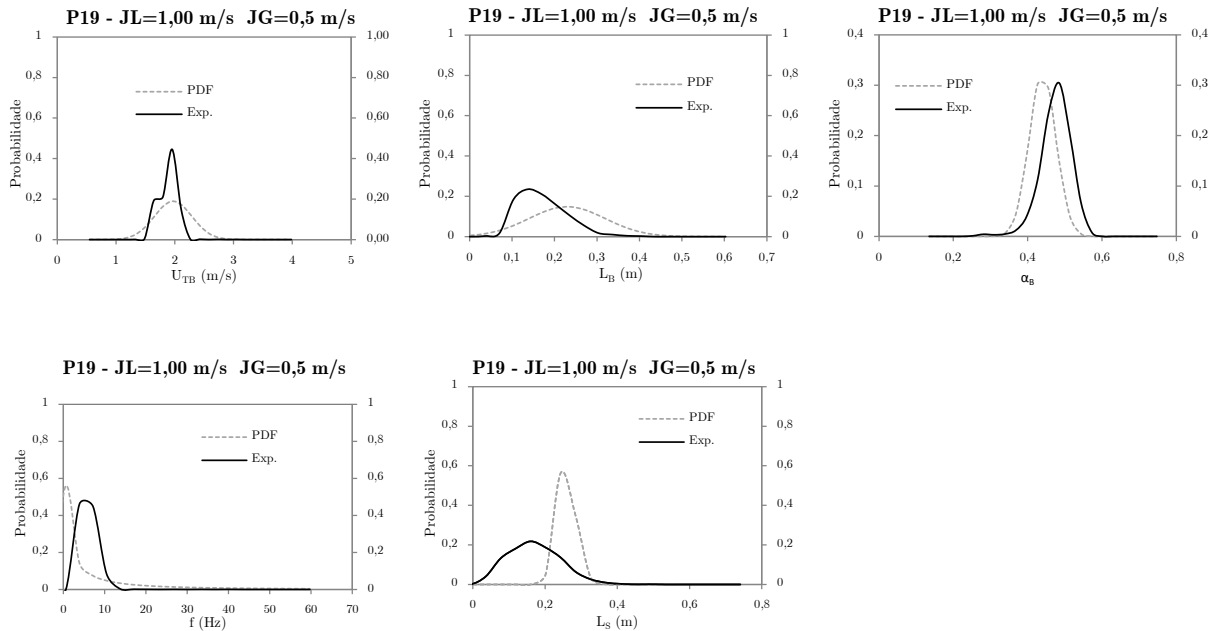


Figura F. 19. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 19.

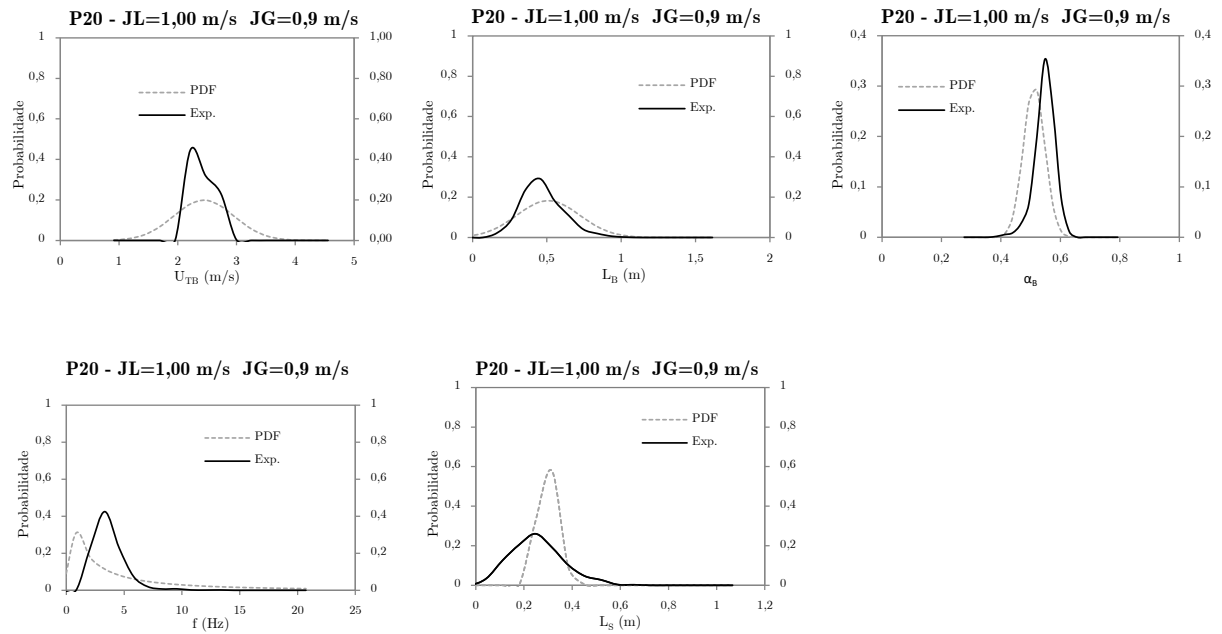


Figura F. 20. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 20.

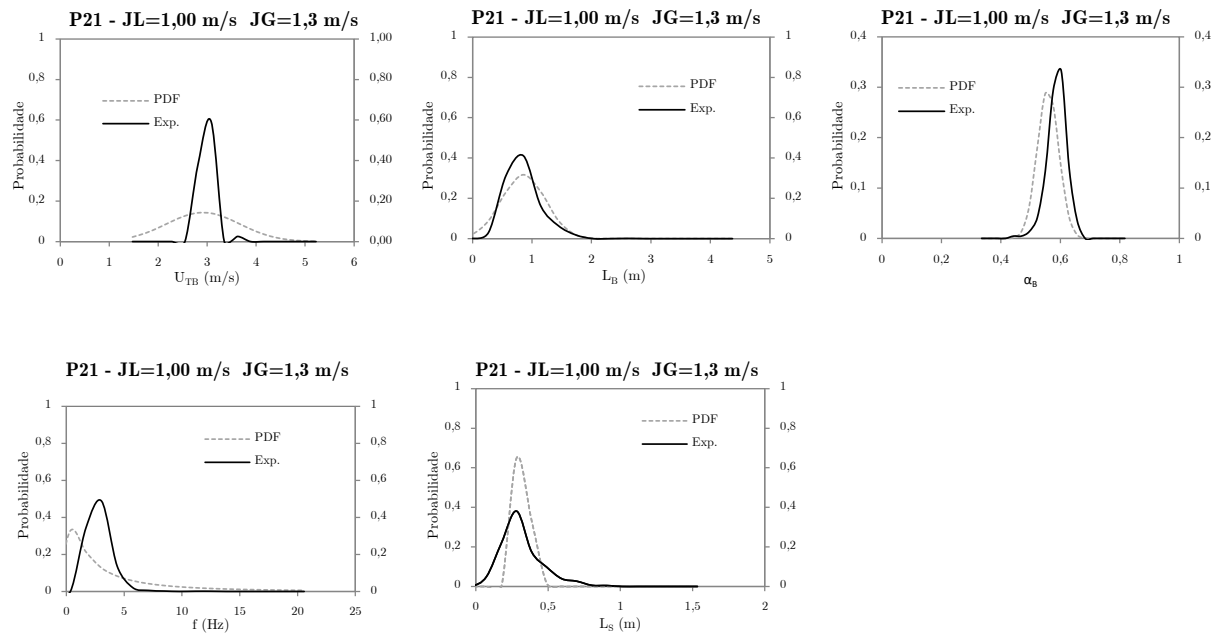


Figura F. 21. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 21.

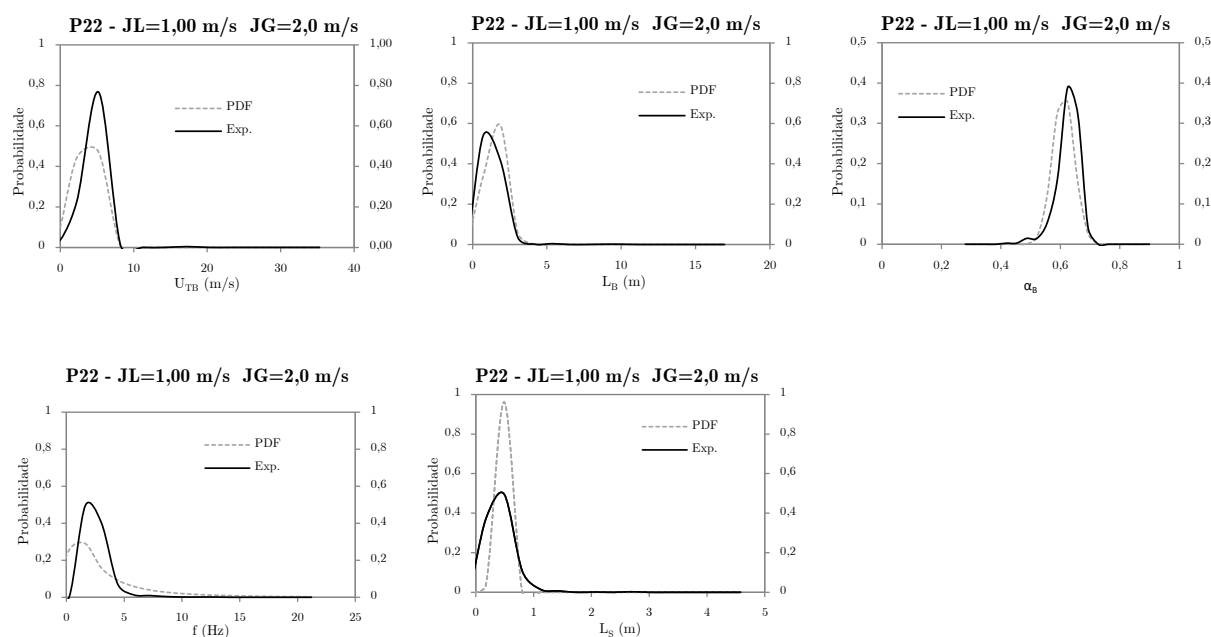


Figura F. 22. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 22.

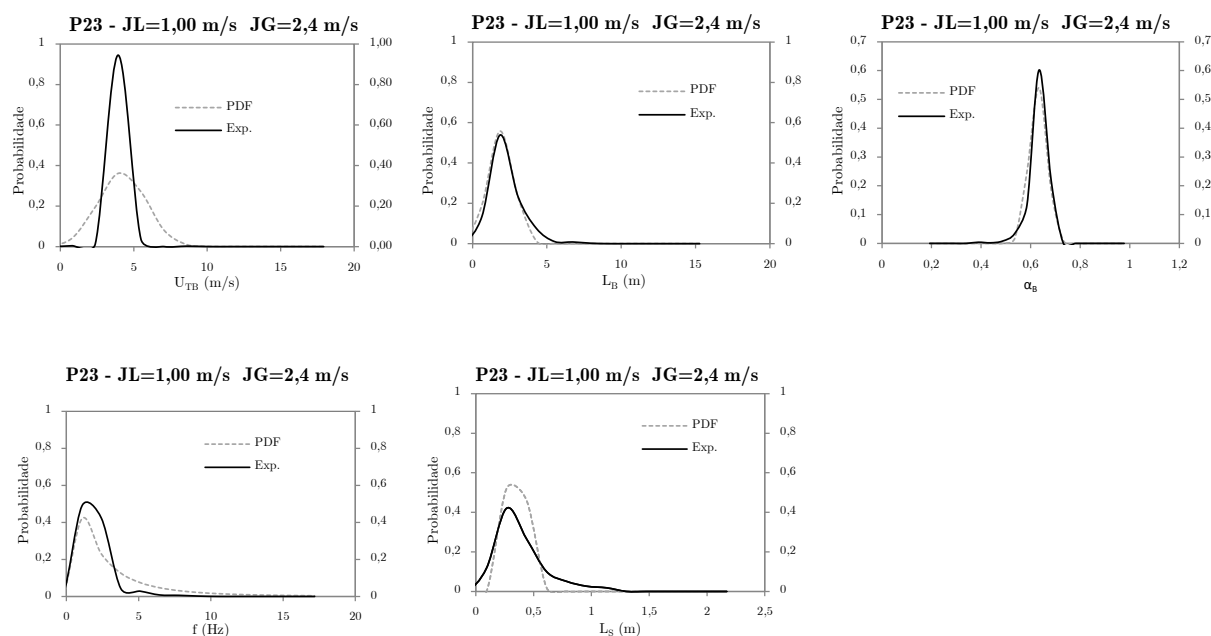


Figura F. 23. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 23.

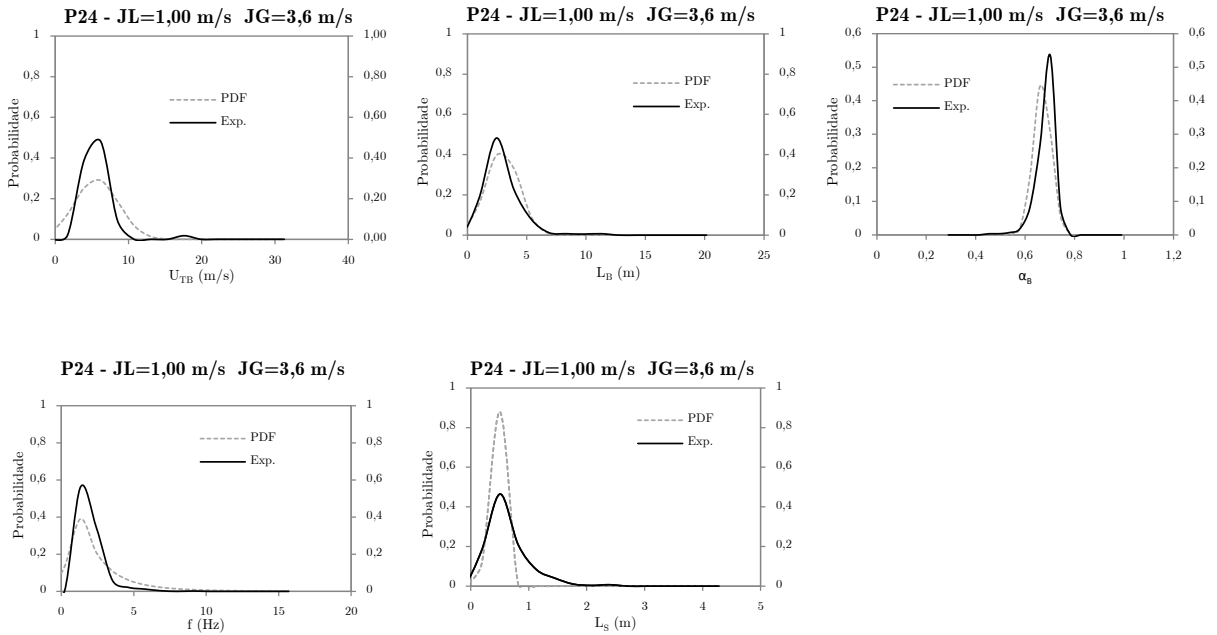


Figura F. 24. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 24.

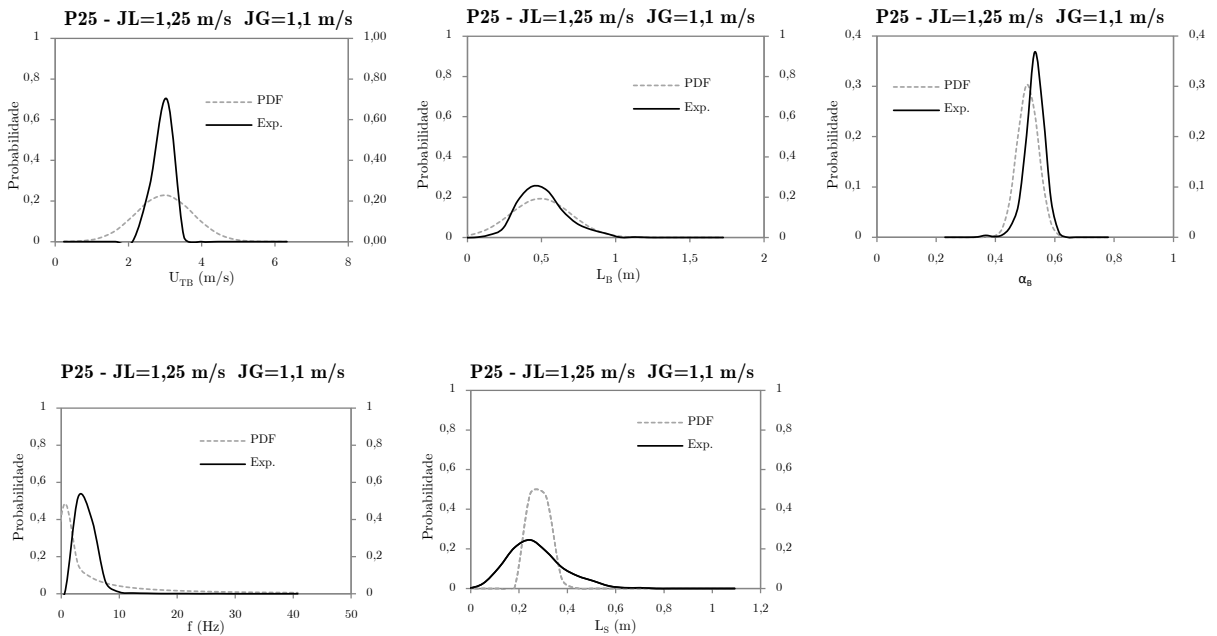


Figura F. 25. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 25.

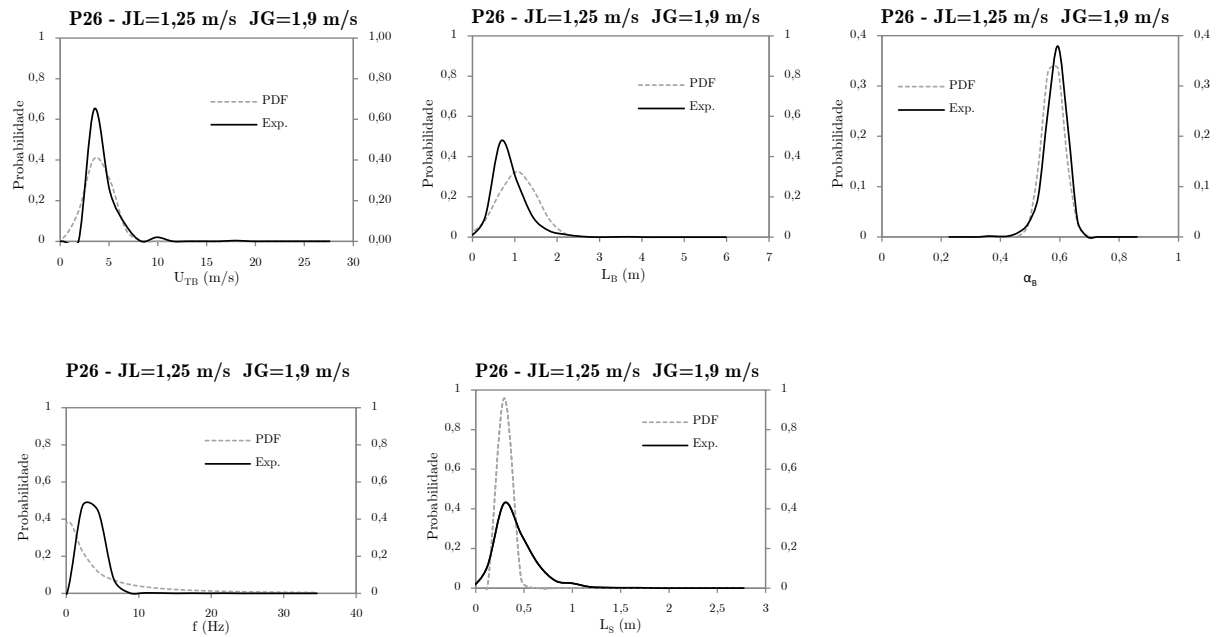


Figura F. 26. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 26.

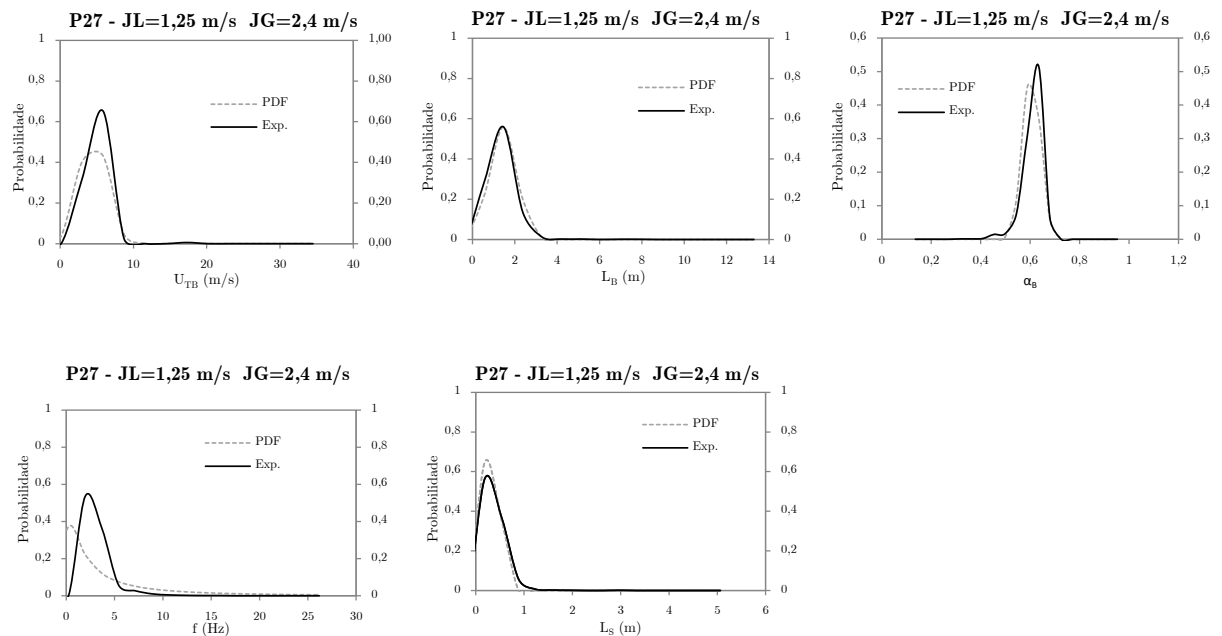


Figura F. 27. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 27.

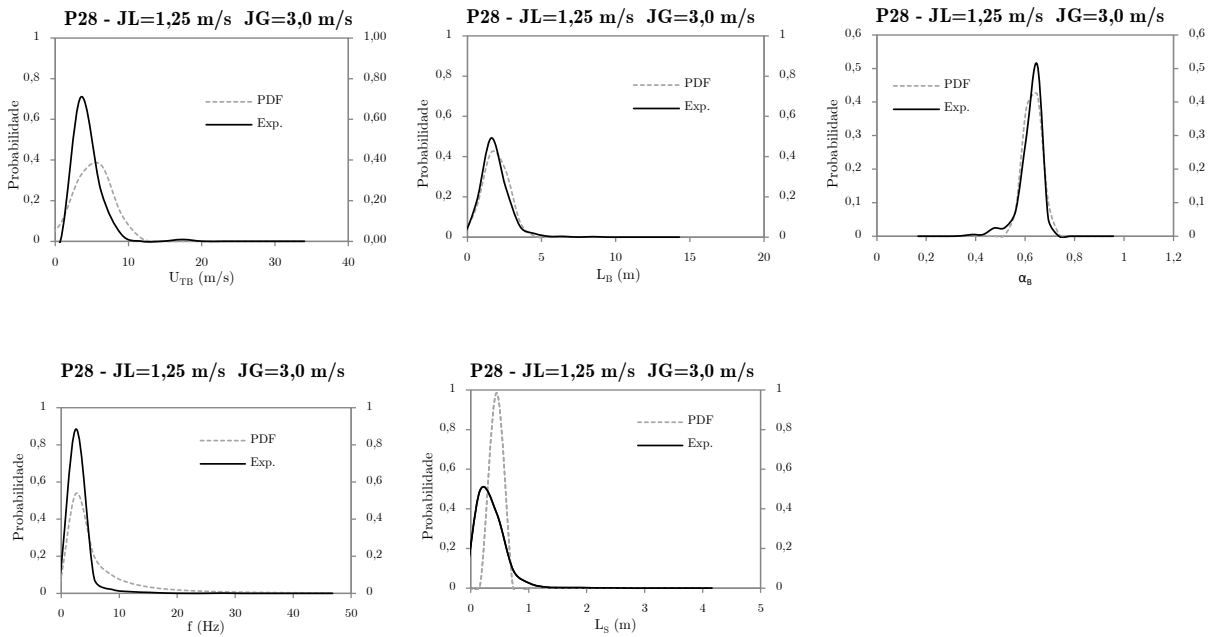


Figura F. 28. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 28.

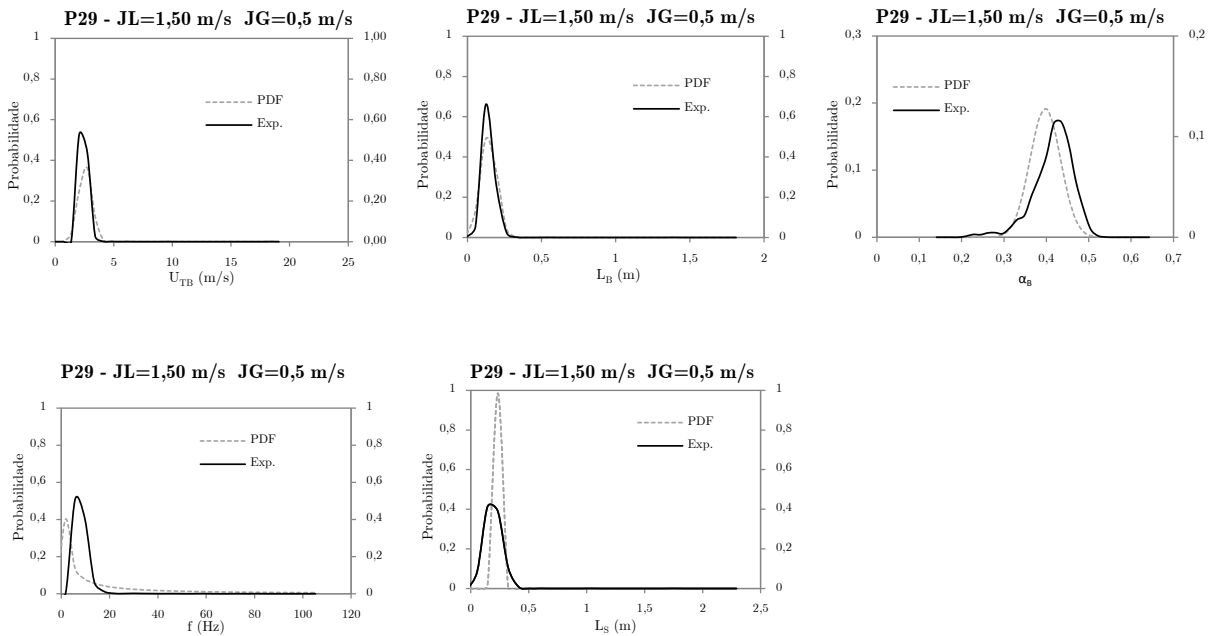


Figura F. 29. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 29.

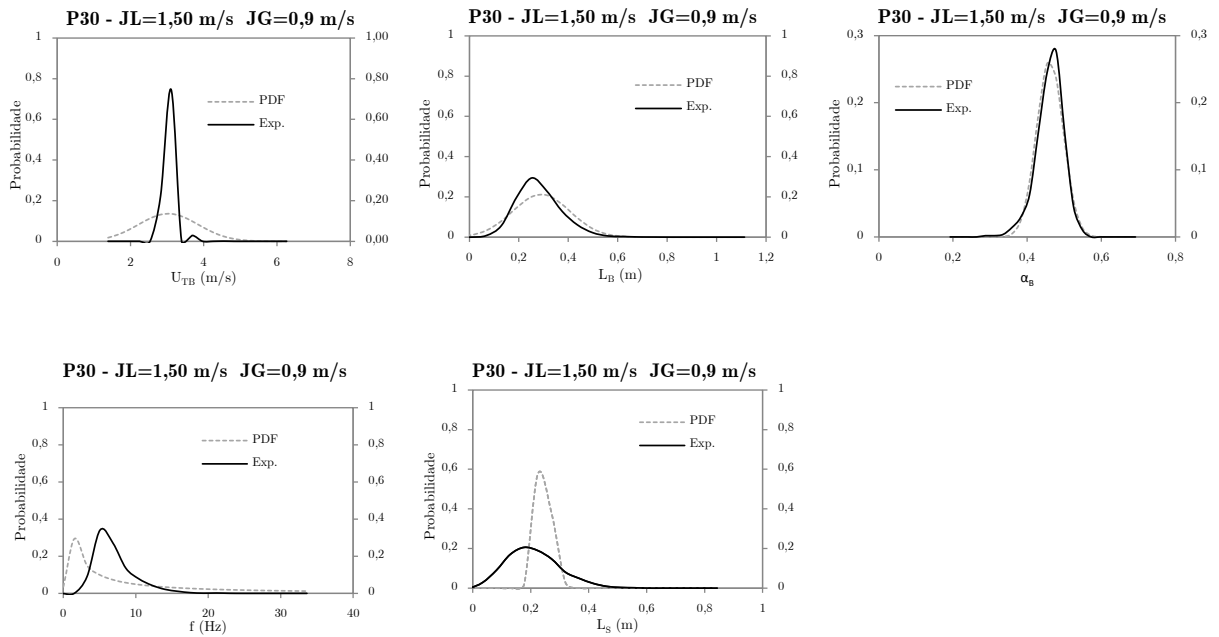


Figura F. 30. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 30.

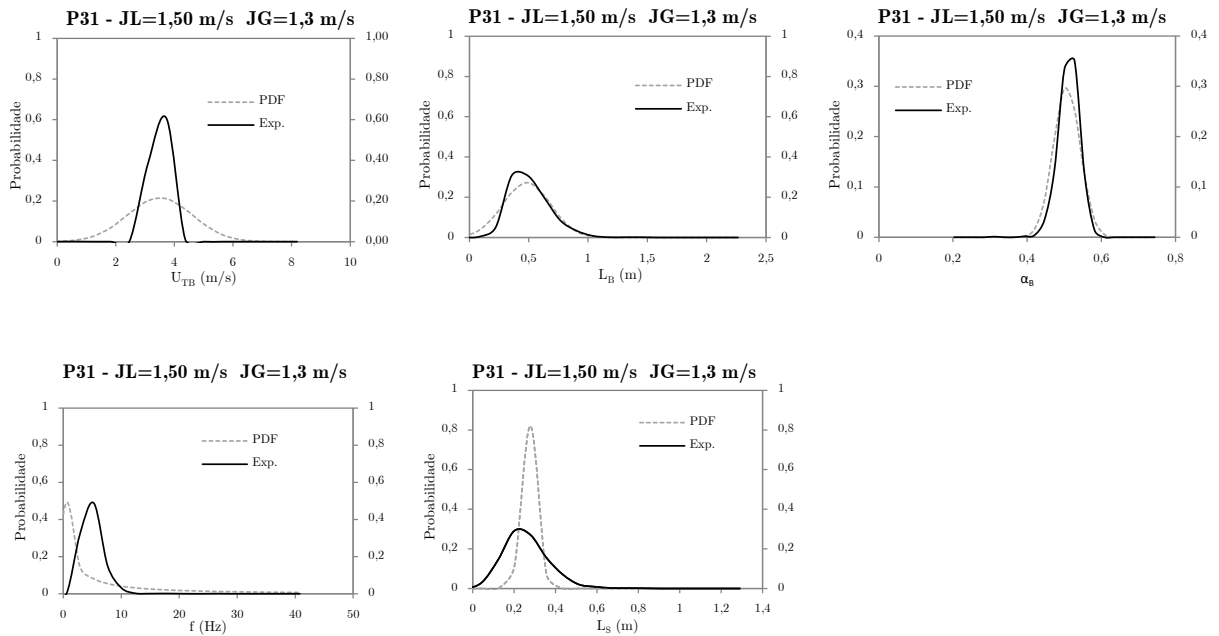


Figura F. 31. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 31.

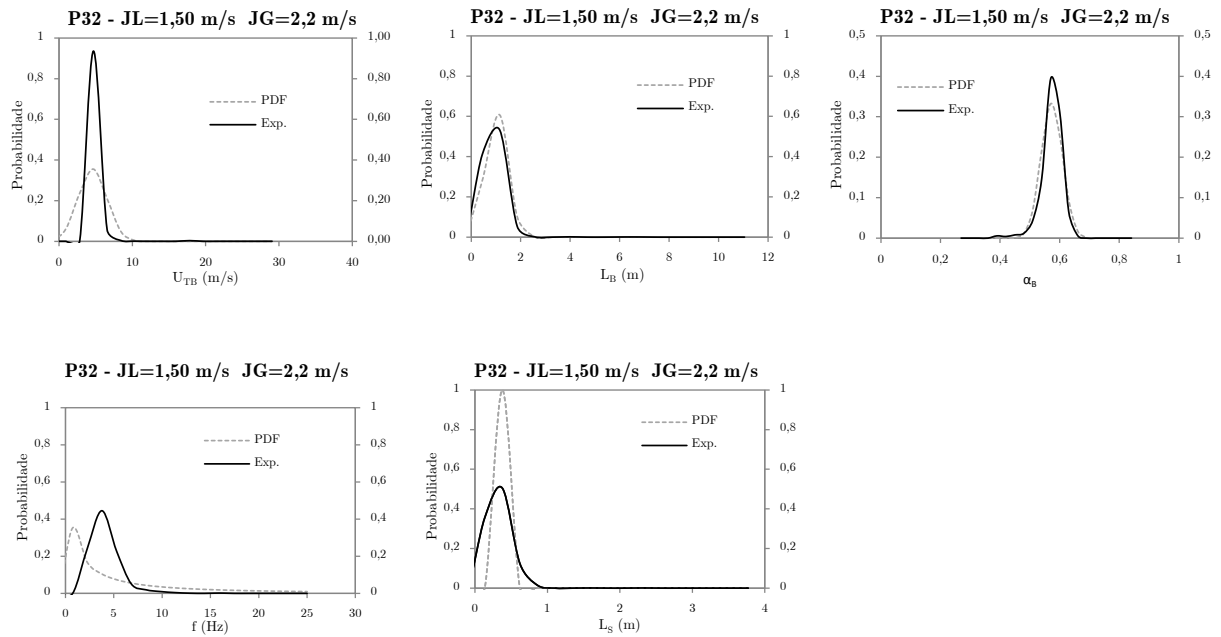


Figura F. 32. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 32.

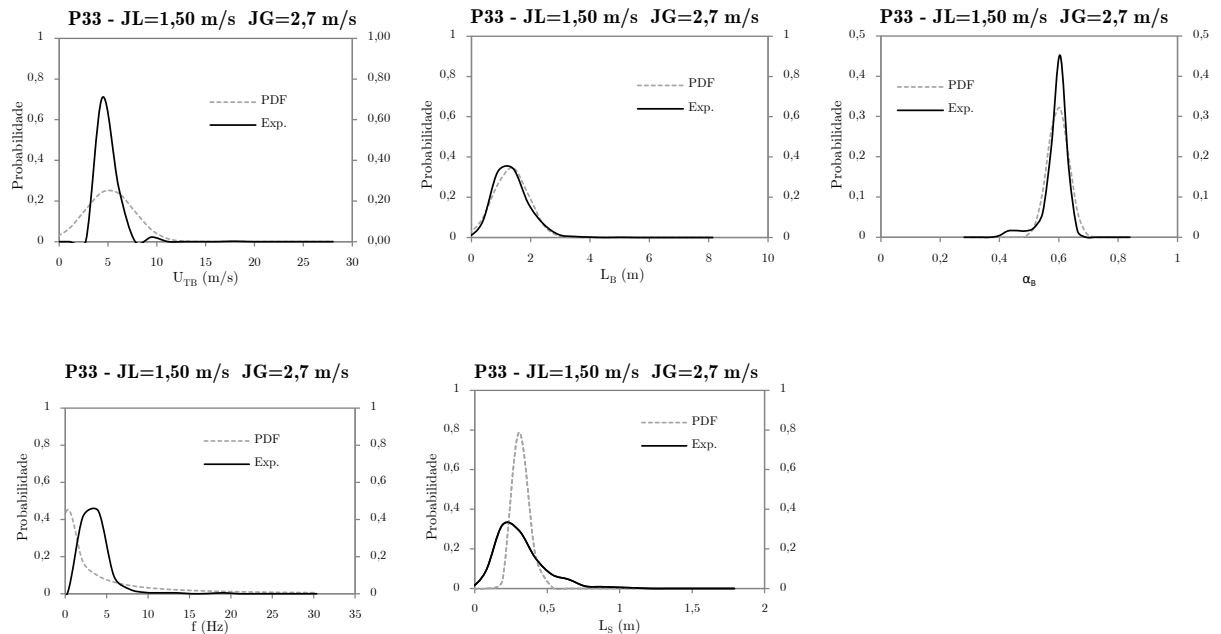


Figura F. 33. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 33.

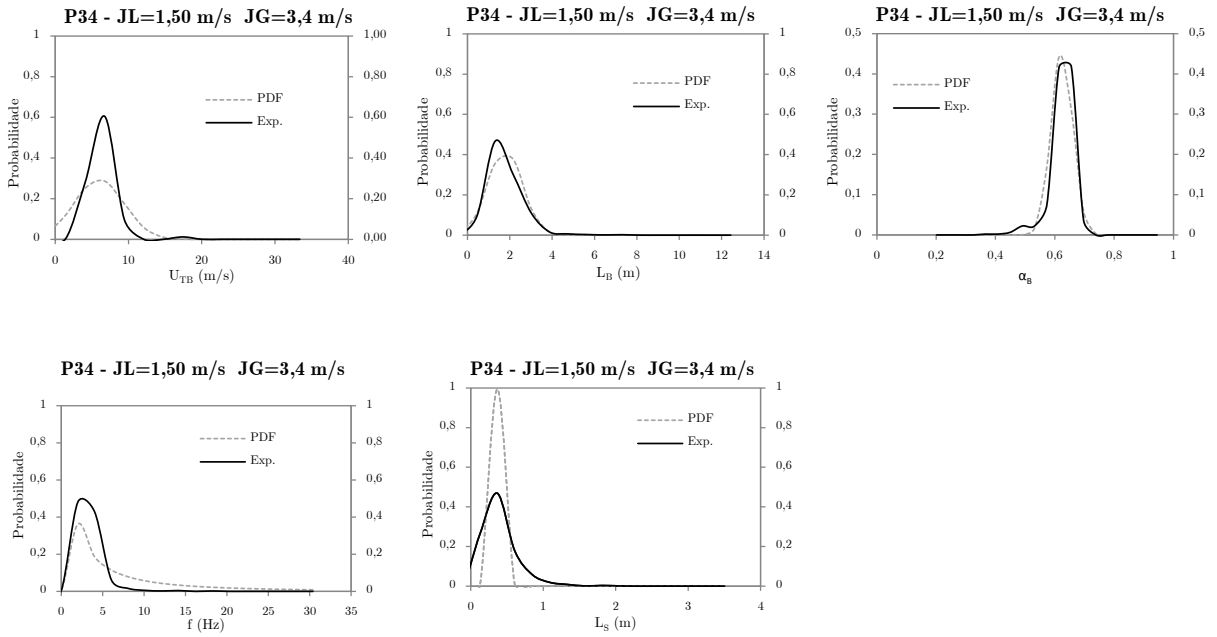


Figura F. 34. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 34.

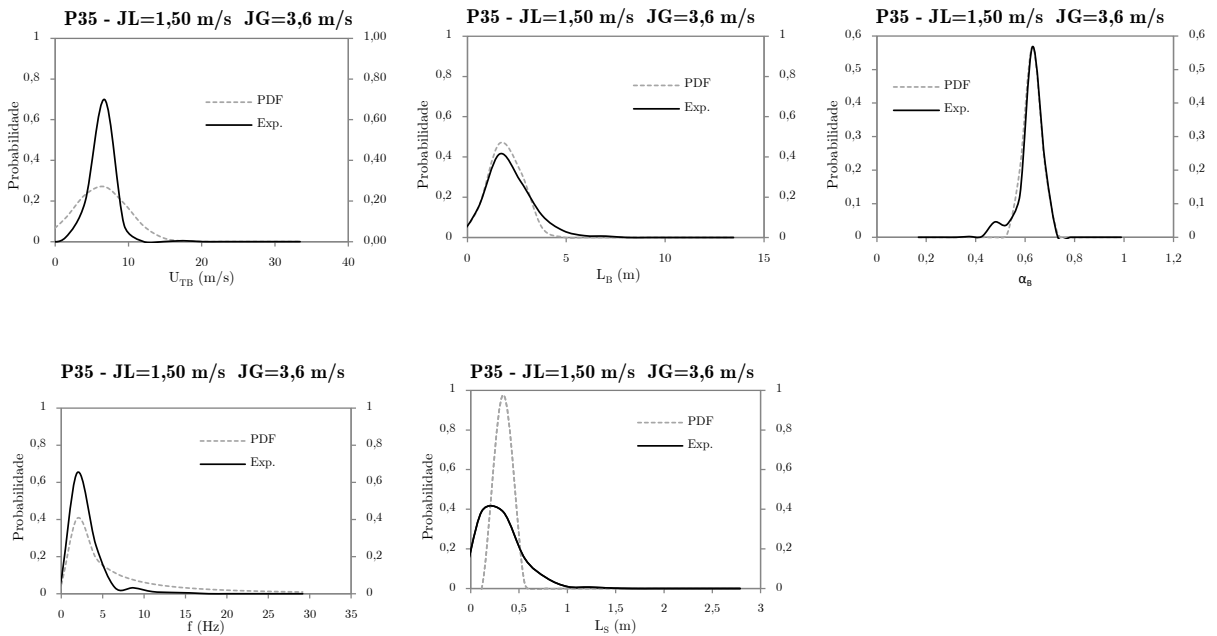


Figura F. 35. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 35.

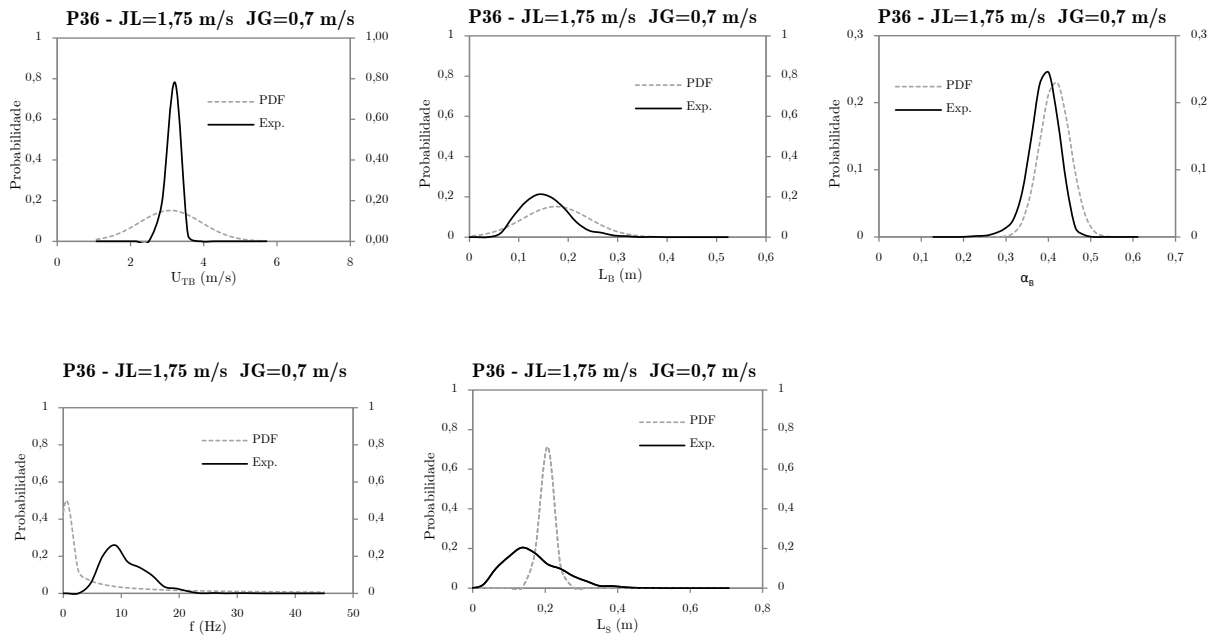


Figura F. 36. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 36.

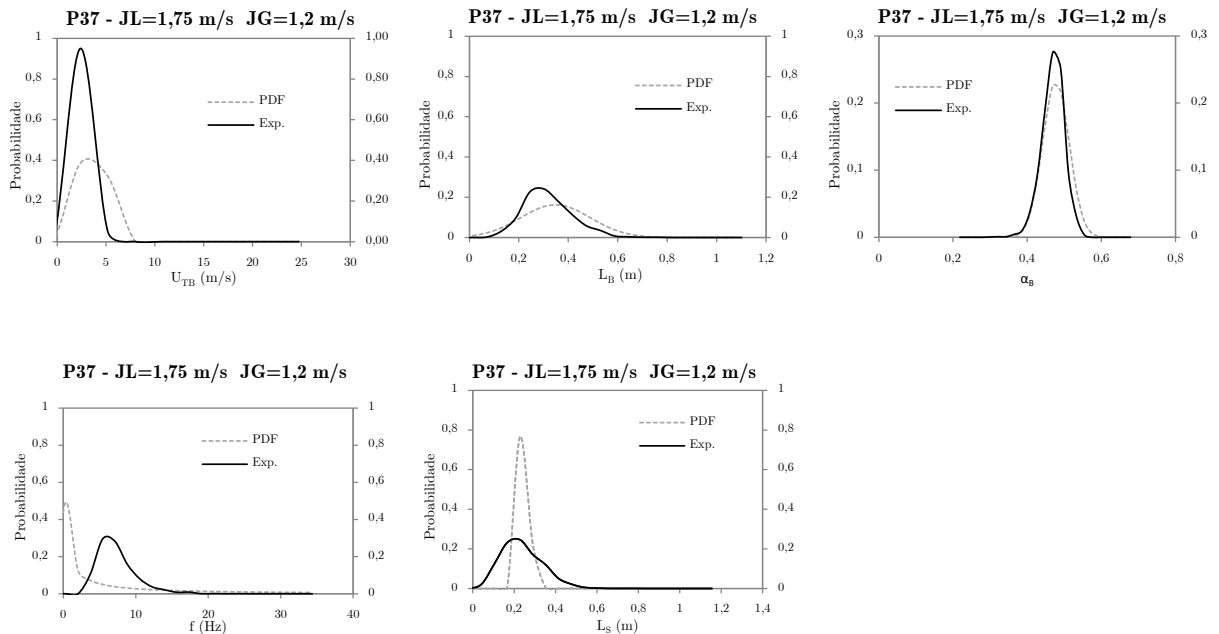


Figura F. 37. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 37.

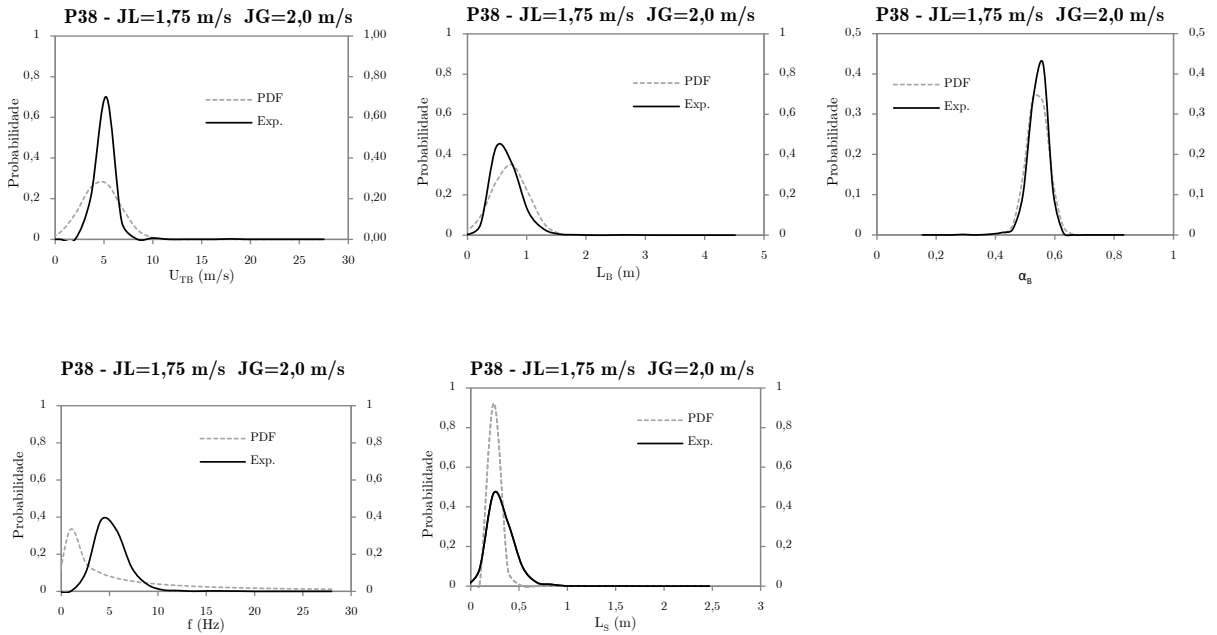


Figura F. 38. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 38.

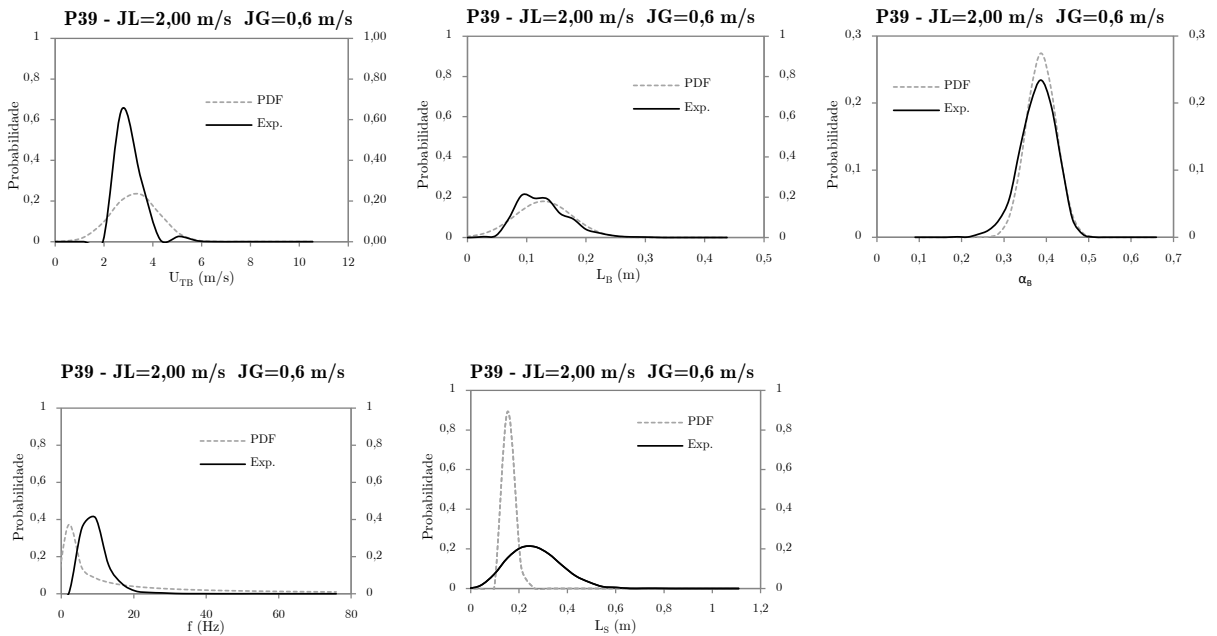


Figura F. 39. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 39.

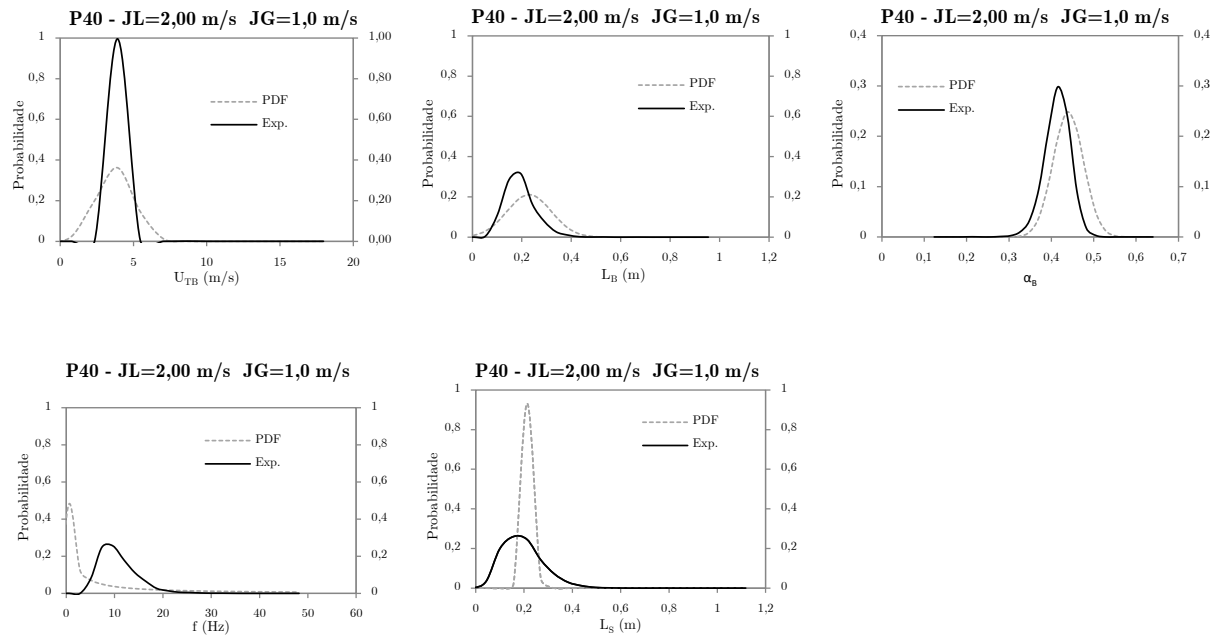


Figura F. 40. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 40.

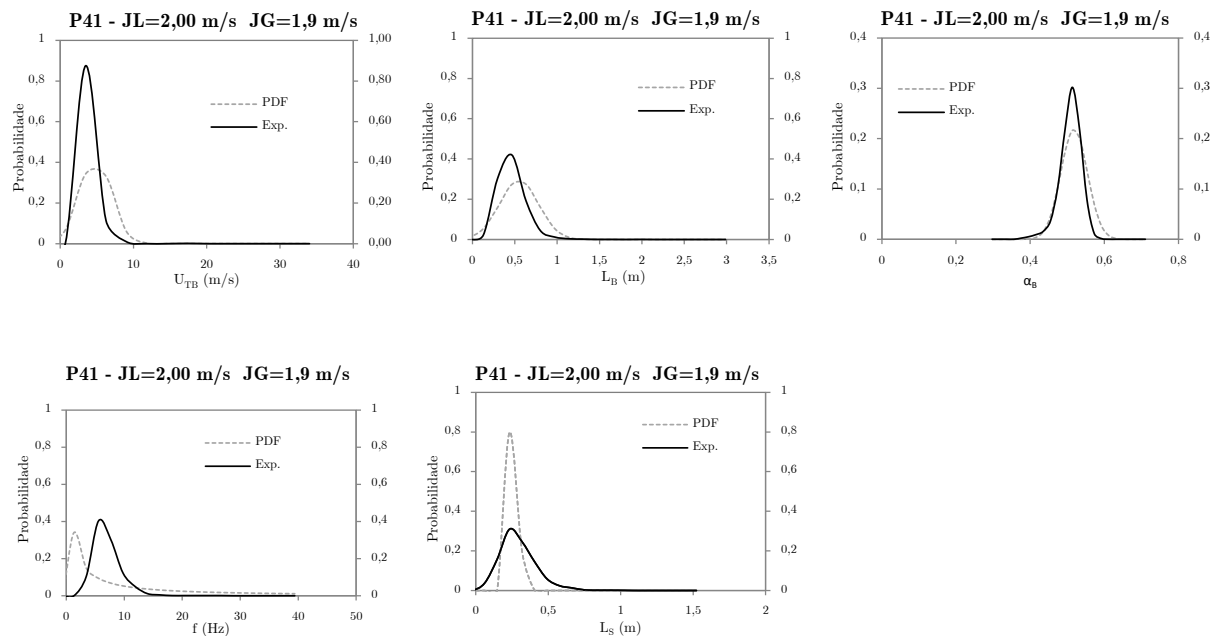


Figura F. 41. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 41.

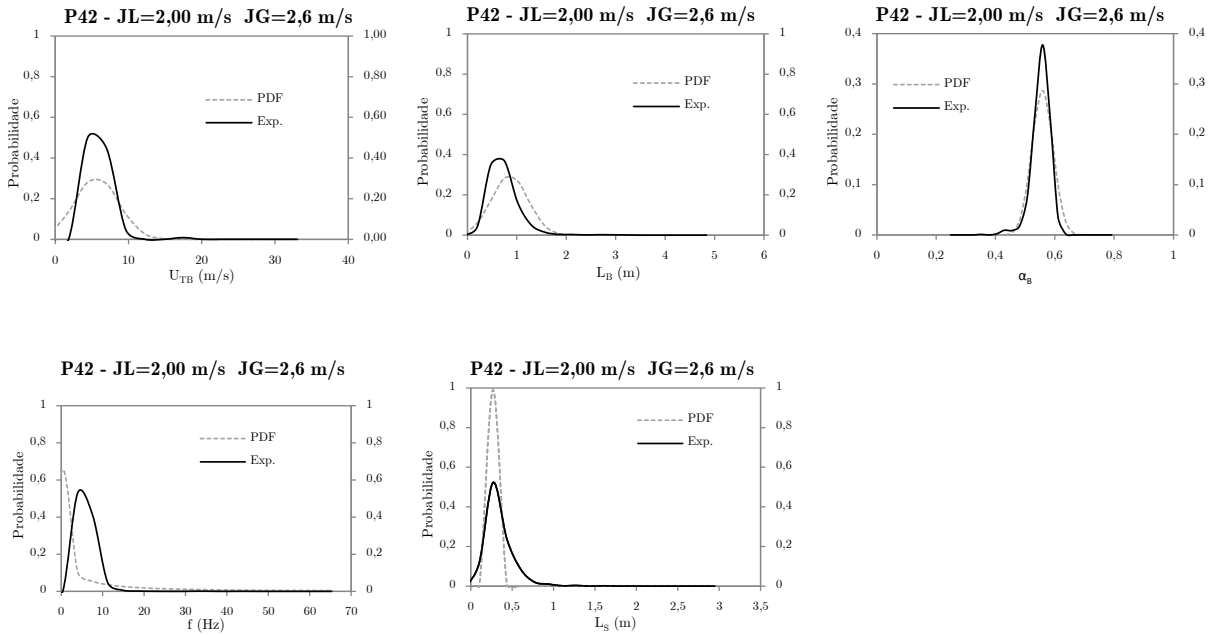


Figura F. 42. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 42.

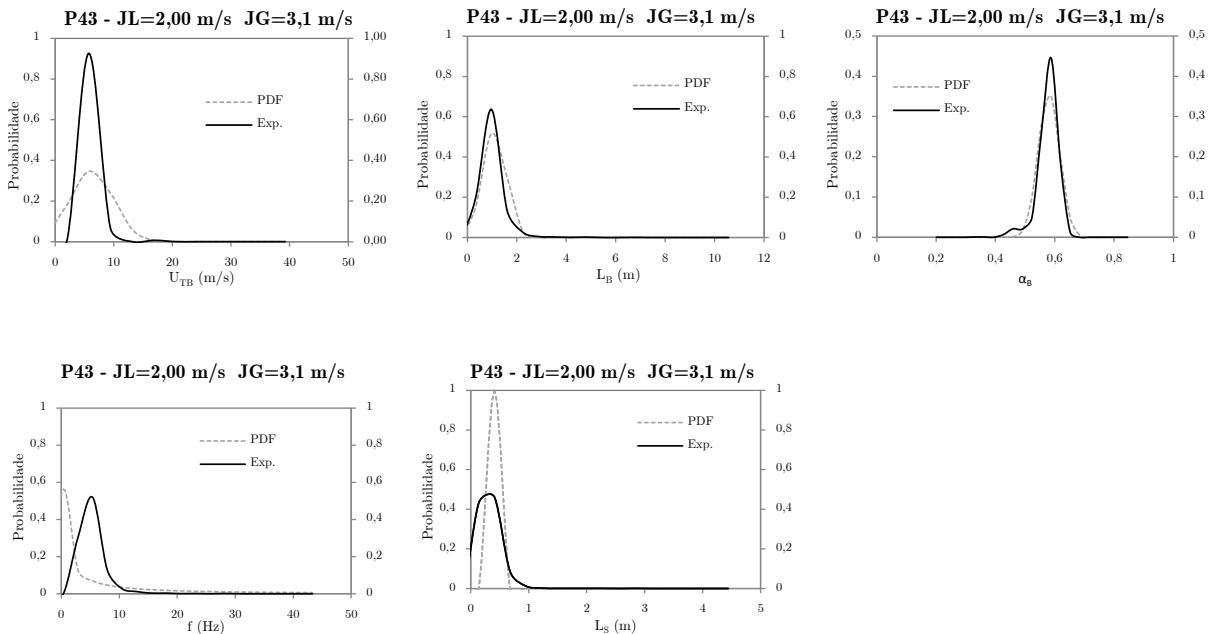


Figura F. 43. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 43.

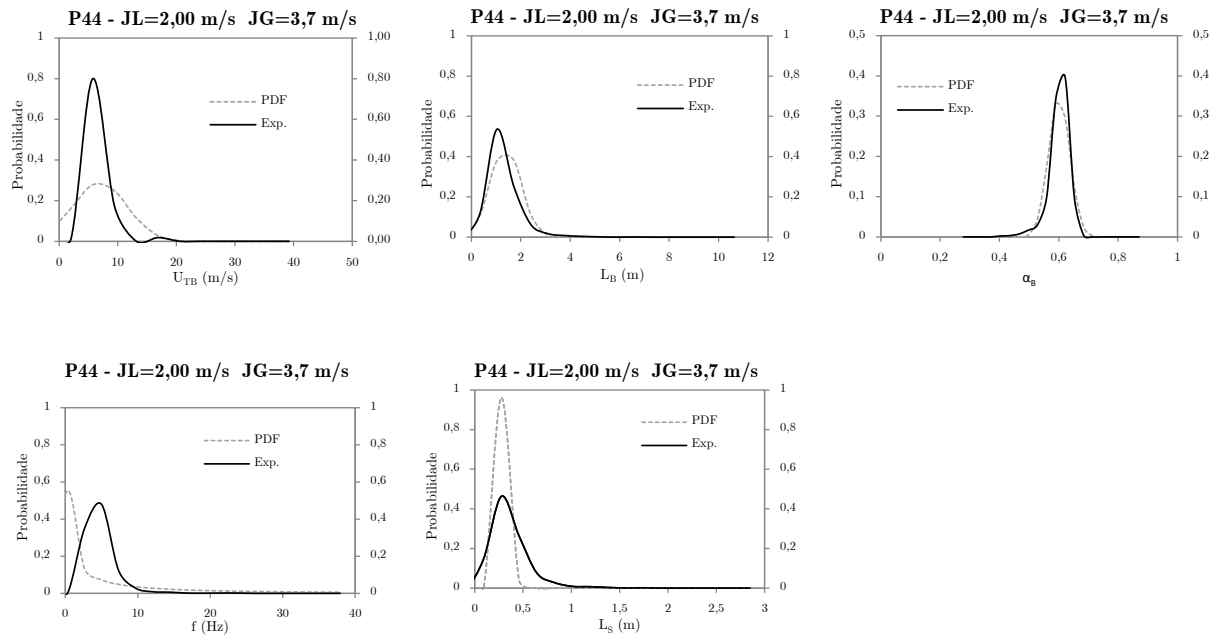


Figura F. 44. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 44.

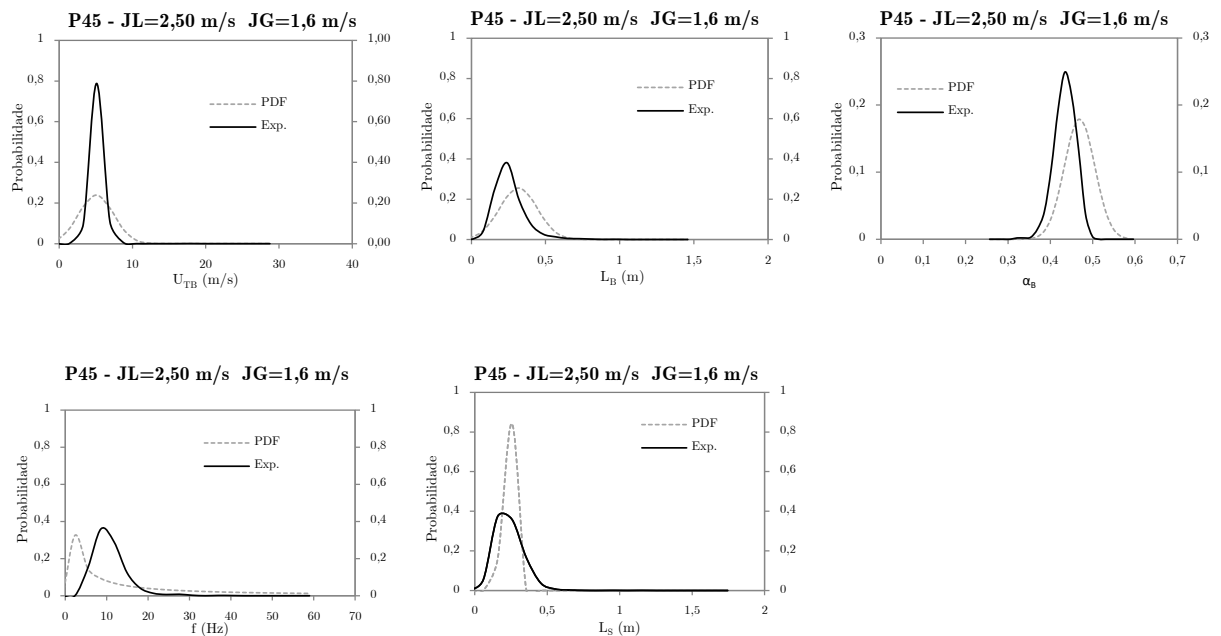


Figura F. 45. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 45.

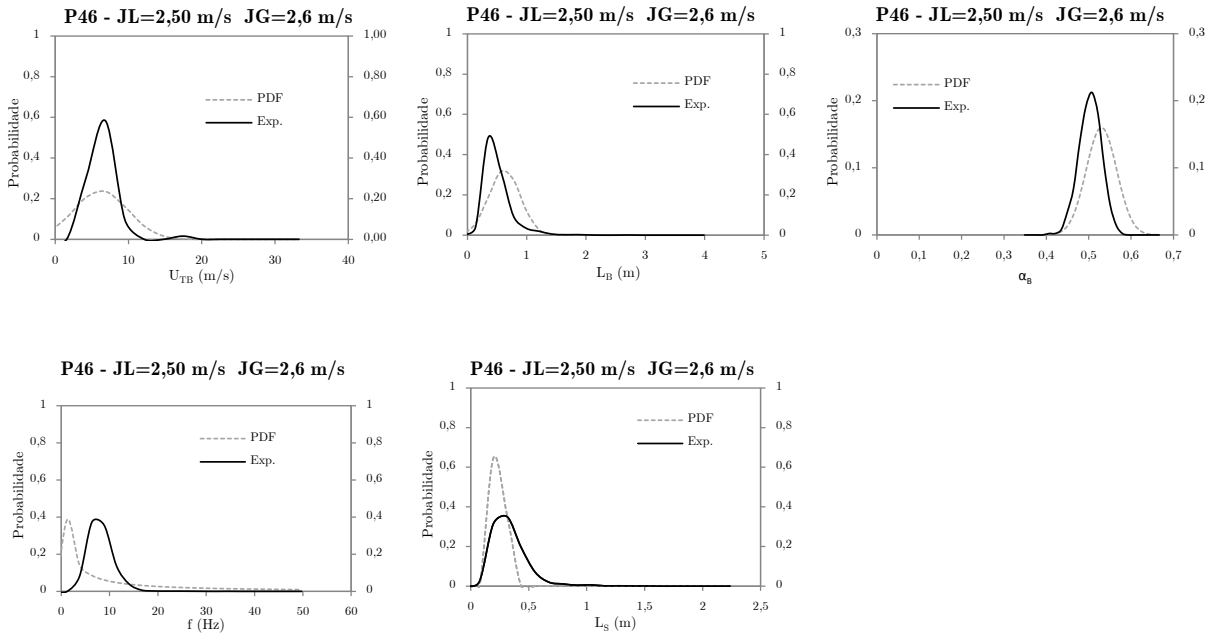


Figura F. 46. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 46.

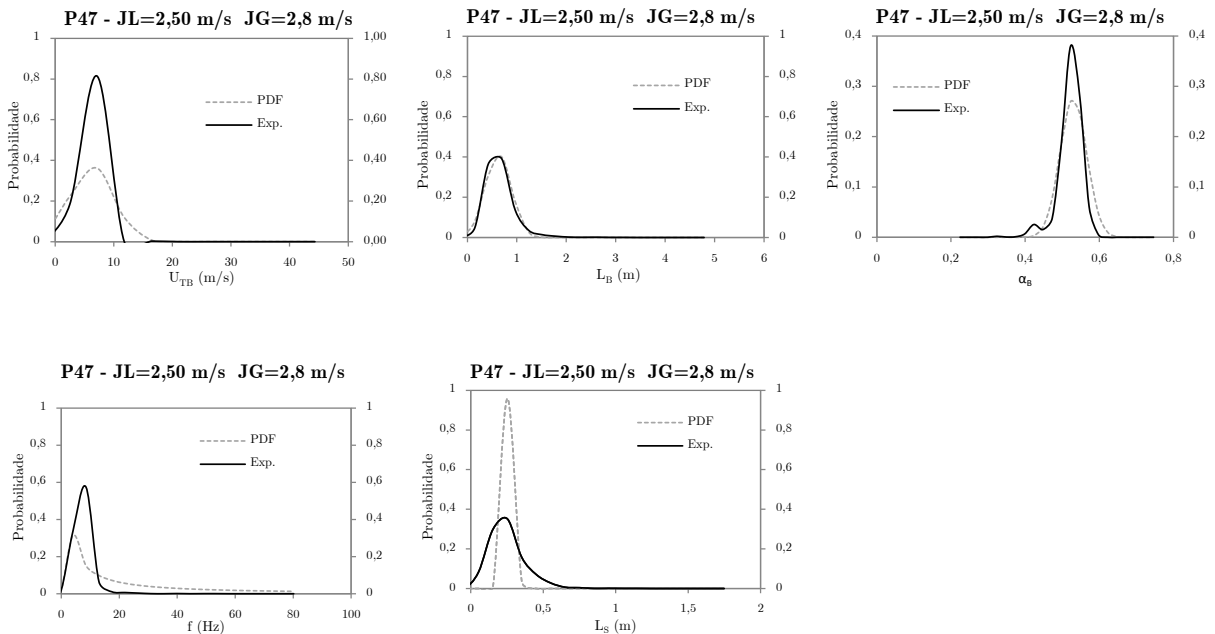


Figura F. 47. Comparação entre as distribuições de probabilidade obtidas experimentalmente (Exp.) e as obtidas mediante as relações apresentadas para os parâmetros característicos do escoamento intermitente líquido-gás (PDF) para o ponto 47.