



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

VÍCTOR ENRIQUE LLANTOY PARRA

ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-GÁS EM
GOLFADAS COM LEVE MUDANÇA DE DIREÇÃO

CURITIBA
SETEMBRO 2013

VÍCTOR ENRIQUE LLANTOY PARRA

**ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-GÁS EM
GOLFADAS COM LEVE MUDANÇA DE DIREÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia Térmica, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

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

Co-orientador: Prof. Marco José da Silva, Dr.

CURITIBA

SETEMBRO – 2013

TERMO DE APROVAÇÃO

VÍCTOR ENRIQUE LLANTOY PARRA

ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-GÁS EM GOLFADAS COM LEVE MUDANÇA DE DIREÇÃO

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

Prof. Guiseppe Pintaude, Dr
Coordenador de Curso

Banca Examinadora

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

Prof. Júlio César Passos, Dr
POSMEC / UFSC

Prof. Silvio L.M. Junqueira, Dr
PPGEM/UTFPR

Curitiba, 10 de Setembro de 2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P258 Parra, Víctor Enrique Llantoy
Escoamento bifásico líquido-gás em golfadas com leve mudança de direção / Víctor Enrique Llantoy Parra. — 2013.
138 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Rigoberto E. M. Morales.

Co-orientador: Marco José da Silva

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Área de concentração em Engenharia Térmica, Curitiba, 2013.

Bibliografia: f. 97-99.

1. Escoamento bifásico. 2. Gás – Escoamento. 3. Escoamento em golfadas. 4. Modelos matemáticos. 5. Métodos de simulação. 6. Engenharia mecânica – Dissertações. I. Morales, Rigoberto E.M., orient. II. Silva, Marco José, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD (22. ed.) 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Campus Curitiba

Dedico este trabalho a meus pais por estarem sempre comigo e por me darem forças nos momentos difíceis da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta dissertação representa uma vitória muito importante em minha vida profissional devido a todos os problemas e desafios achados ao longo da elaboração desta dissertação. Nesse sentido gostaria de expressar toda minha gratidão às pessoas envolvidas diretamente ou indiretamente na elaboração deste trabalho.

Primeiramente agradeço a Deus por iluminar meu caminho ao longo de minha vida.

A todos meus familiares e em especial a meus pais Teófila e Jorge pela compressão, apoio para a realização deste mestrado.

Ao professor Rigoberto E. M. Morales, meu orientador, que acreditou em mim e na realização deste trabalho. Ao professor Marco José da Silva de CPGEI por seu apoio no desenvolvimento da dissertação.

Ao Fausto Arinos Barbuto e a Cristiane Cozin pela paciência e seu apoio para o desenvolvimento de meu trabalho.

Ao professor Carlos Amaral e aos alunos de graduação do CPGEI Leonardo Lipinski e Diogo Machado, por seu apoio na parte experimental de meu projeto.

Ao Reinaldo Justiniano pela grande ajuda prestada na instalação e monitoramentos da bancada experimental.

Aos membros do Laboratório de Ciências Térmicas, em especial a Fernando Castillo, Hans Maldonado, Renzo Gutierrez e Ernani Maieski pela amizade e as sugestões na elaboração de meu trabalho.

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT - PRH10-UTFPR.



*“A persistência é o melhor caminho do
êxito”*

(Charles Chaplin)

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

RESUMO

Misturas bifásicas líquido-gás são frequentemente transportadas em tubulações através de terrenos com relevos irregulares. Estas irregularidades ocasionam perturbações nos parâmetros do escoamento bifásico, portanto tornando-se necessário prever o comportamento destes escoamentos. Neste cenário, o presente trabalho estuda, numérica e experimentalmente, os efeitos causados por uma leve mudança de direção no escoamento bifásico. O estudo foi realizado para escoamentos bifásicos ar-água em padrão de golfadas em uma tubulação horizontal de 26 mm e 5,8 m de comprimento seguida de um trecho inclinado ascendente de 3,4 m de comprimento e mesmo diâmetro com uma leve mudança de direção de 7° com relação à horizontal. Na abordagem numérica utilizou-se o método de seguimento dos pistões (*slug tracking*), para prever o comportamento do escoamento quando se produz uma leve mudança de direção. O trabalho experimental foi realizado utilizando um circuito experimental projetado e instalado no LACIT/UTFPR. Nele, foram instalados sensores resistivos e transdutores de pressão em quatro pontos da seção de teste, chamadas estações de medida, com a finalidade de monitorar a evolução da fração do vazio, velocidade de translação da bolha, a pressão e os comprimentos do pistão de líquido e da bolha. Os resultados numéricos e experimentais foram comparados entre si como função dos resultados médios e de distribuições de frequência nas estações de medição, tendo sido observada uma boa concordância.

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

LLANTOY PARRA, Víctor Enrique, **Two-phase gas-liquid slug flows with a slight direction change**, 2013, Dissertation (Master Degree in Engineering) – Mechanical and Material Engineering, Graduation Programme, Federal University of Technology – Paraná, Curitiba, 137p.

ABSTRACT

Two-phase, liquid-gas flow mixtures are usually transported through pipes stretching over irregular terrains. Those irregularities disturb the flow characteristics, thus predicting the behaviour of such disturbed flows becomes necessary. The present work introduces an experimental and numerical study on the effects of a slight direction change on the behaviour of a gas-liquid two-phase slug flow. The aforementioned study was carried out in a 1" (26 mm), 5.8-m long transparent pipe section followed by a +7° inclined pipe (3.4-m long) transporting air-water two-phase mixtures at different flow rates. This experimental rig was designed and assembled in the LACIT/UTFPR labs. Resistive sensors and pressure transducers were installed at four testing positions in the pipe, designated as metering stations. Void fractions, bubble translational velocities, *in situ* pressures and the lengths of the liquid slug and the bubble region – as well as the fluctuations of those flow parameters – were measured at these stations. A classical slug tracking approach was applied as the numerical scheme. That approach attempts at simultaneously solving the one-dimensional mass and momentum conservation equations for each instant of time, resulting in coupled system of pressure-velocity equations. A mathematical model to predict the flow behaviour at the pipe position where the change in direction occurred was developed and implemented. The equations of such mathematical model were implemented as source terms in the slug tracking model. The numerical results were compared to the experimental data using averaged results and frequency distribution of the data collected at the metering stations, and a good agreement was observed.

Keywords: Two-phase gas-liquid slug flows, flow direction change.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Justificativa	5
1.3 Estrutura do trabalho.....	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Revisão dos modelos existentes para escoamento em golfadas	8
2.1.1 Modelos estacionários.....	8
2.1.2 Modelos transientes	9
2.2 Revisão dos trabalhos sobre escoamento bifásico com mudança de direção.....	11
2.3 Comentários finais.....	15
3 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	17
3.1 Balanço de massa e quantidade de movimento	18
3.2 Equações auxiliares	19
3.2.1 Tensão de cisalhamento e perímetro molhado.....	19
3.2.1 Velocidades da frente da bolha.....	20
3.2.2 Velocidade traseira da bolha.....	22
3.2.3 Velocidade do filme de líquido	22
3.2.4 Coalescência das bolhas	23
3.3 Modelo de mudança de direção	25
3.3.1 Efeito gravitacional	26
3.3.2 Efeito geométrico.....	28
3.3.3 Acúmulo de líquido.....	31
3.4 Comentários finais.....	36
4 MODELAGEM NUMÉRICA	37
4.1 Discretização	37
4.1.1 Discretização das equações do sistema pressão-velocidade	37
4.1.2 Discretização das equações auxiliares	43
4.1.3 Passagem da célula unitária pela região do cotovelo.....	44
4.1.4 Modelagem numérica do modelo de Bolha.....	46
4.2 Algoritmo de solução.....	48
4.2.1 Dados de entrada.....	48
4.2.2 Processo de início da simulação.....	48
4.2.3 Desenvolvimento da simulação.....	51

4.2.4	Processo de entrada das células unitárias.....	52
4.2.5	Processo de saída das células unitárias	53
4.3	Sondas virtuais	55
4.3.1	Sonda euleriana	55
4.3.2	Sonda lagrangeana	55
4.3.3	Sonda instantânea.....	56
4.4	Comentários Finais.....	56
5	ABORDAGEM EXPERIMENTAL	57
5.1	Descrição do circuito experimental	57
5.2	Sensor gêmeo resistivo	62
5.3	Extração dos parâmetros	64
5.4	Aquisição de imagens	68
5.5	Comentários Finais.....	71
6	RESULTADOS	72
6.1	Grade de testes	72
6.2	Apresentação dos resultados experimentais	73
6.2.1	Análise do fator de corte.....	74
6.2.2	Velocidade de translação da bolha	77
6.2.3	Frequência da célula unitária	78
6.2.4	Análise do escoamento na região de mudança de direção	79
6.3	Metodologia de geração da lista na entrada	81
6.4	Resultados numéricos.....	83
6.4.1	Valores médios ao longo do duto.....	83
6.4.2	PDFs ao longo do duto.....	86
6.5	Comentários Finais.....	92
7	CONCLUSÕES.....	93
	PRODUÇÃO CIENTÍFICA NO PERÍODO (Março 2011 – Setembro 2013)	95
8	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A - FATORES DE CORTE DE ESCOAMENTO EM GOLFADAS.....	100
	APÊNDICE B – RESULTADOS PARA ESCOAMENTO EM GOLFADAS COM UMA LEVE MUDANÇA DE DIREÇÃO.....	107
	ANEXO A – EQUAÇÕES DE FECHAMENTO DO MODELO DE TAITEL E BARNEA (1990a).....	126
	ANEXO B – FLUXOGRAMAS	131
	ANEXO C – CURVAS de CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1-Padrões de escoamentos bifásicos líquido-gás em tubulação horizontal (líquido em cinza e gás em branco): a) estratificado, b) golfadas, c) bolhas dispersas, d) anular.....	2
Figura 1-2- Padrões de escoamentos bifásicos líquido-gás em tubulação vertical: a) bolhas dispersas, b) golfadas, c) agitado, d) anular.....	3
Figura 1-3- Escoamento em golfadas com mudança de direção	5
Figura 1-4- Transporte de petróleo nas profundidades marinhas.....	6
Figura 3-1-Célula unitária j	17
Figura 3-2-Volume de controle para a velocidade do filme	23
Figura 3-3 - Coalescência de bolhas.....	24
Figura 3-4-E escoamento bifásico em padrão de golfada durante a mudança de trecho.	25
Figura 3-5- Transição de pistões de líquido e bolha alongada de um trecho para outro.....	27
Figura 3-6-Mudança da geometria da bolha alongada de um trecho horizontal para um trecho inclinado ascendente.....	29
Figura 3-7-Volume de controle do acúmulo de líquido na região do cotovelo.....	31
Figura 3-8- Divisão da bolha alongada.....	33
Figura 3-9 - Incremento do comprimento do pistão precedente	35
Figura 4-1- Passagem do pistão de líquido pela região do cotovelo	44
Figura 4-2- Passagem da bolha alongada pela região do cotovelo.....	45
Figura 4-3- Sequência da integração do modelo de bolha desenvolvido por Zwanziger (2007)	47
Figura 4-4 - Algoritmo de solução	49
Figura 4-5- Representação do início da simulação	50

Figura 4-6- Processo de entrada de células unitárias no domínio de cálculo	53
Figura 4-7- Processo de saída de células unitárias no domínio de cálculo.....	54
Figura 5-1- Esquema do circuito experimental desenvolvido	58
Figura 5-2- Foto da instalação das estações de medição (acima), Esquema da distribuição das estações de medição (abaixo).....	60
Figura 5-3 - Painel do <i>software</i> para monitoramento das pressões e as velocidades superficiais de cada fase.....	61
Figura 5-4 - Desenho do sensor gêmeo resistivo (esquerda) e sensor gêmeo resistivo instalado (direita).....	62
Figura 5-5- Placa de circuito.....	63
Figura 5-6- Diagrama de funcionamento do sistema.....	63
Figura 5-7 - Série temporal da altura de líquido no escoamento em golfadas	66
Figura 5-8- Altura do filme de líquido	66
Figura 5-9- Análise dos parâmetros característicos do escoamento baseado na altura do líquido dos sinais do sensor gêmeo resistivo	67
Figura 5-10 - Esquema do aparato para a filmagem do escoamento.....	69
Figura 5-11- Quadro da filmagem de câmera de alta velocidade na Estação 1 (esquerda) e na região do cotovelo (direita).....	70
Figura 5-12- Cálculo da velocidade da translação da bolha.....	70
Figura 6-1-Representação das seções de teste experimental e numérica para escoamento em golfadas com uma leve mudança de direção.....	72
Figura 6-2- Resultados médios para A@W#4 ($j_L=1,000$ e $j_G=0,300$).....	74
Figura 6-3- PDFs para A@W#4	76
Figura 6-4- Comparação da velocidade de translação da bolha experimental com Bendiksen	77
Figura 6-5 – Distribuição da frequência da célula unitária em relação à velocidade superficial do gás	79

Figura 6-6 - Filmagem da passagem do escoamento em golfadas pela região do cotovelo para $j_L=0,250$ e $j_G=0,343$	80
Figura 6-7- Filmagem da passagem do escoamento em golfadas pela região do cotovelo para A@W#1 ($j_L=0,500$ e $j_G=0,356$)	80
Figura 6-8-Resultados médios para A@W#1 ($j_L=0,500$ e $j_G=0,356$).....	84
Figura 6-9-Resultados médios para A@W#5 ($j_L=1,000$ e $j_G=0,717$).....	85
Figura 6-10-Resultados médios para A@W#8 ($j_L=1,250$ e $j_G=0,835$).....	85
Figura 6-11-Resultados médios para A@W#11 ($j_L=1,500$ e $j_G=1,070$).....	86
Figura 6-12-PDFs para A@W#1 ($j_L=0,500$ e $j_G=0,356$)	88
Figura 6-13-PDFs para A@W#5 ($j_L=1,000$ e $j_G=0,717$)	89
Figura 6-14-PDFs para A@W#8 ($j_L=1,250$ e $j_G=0,835$)	90
Figura 6-15-PDFs para A@W#11($j_L=1,500$ e $j_G=1,070$)	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Coeficientes para a velocidade de translação da bolha	21
Tabela 3-2 - Coeficientes para a velocidade de translação da bolha	21
Tabela 3-3 - Tensão de cisalhamento, coeficiente de atrito e número de Reynolds. 20	
Tabela 4-1- Passagem da bolha alongada e pistão de líquido pela região do cotovelo	46
Tabela 5-1- Dados dos medidores de vazão de água.....	58
Tabela 5-2 - Dados dos medidores de vazão de ar.....	59
Tabela 5-3 - Dados dos transdutores de pressão	60
Tabela 6-1 - Grade de testes experimentais	73
Tabela 6-2 - Modelos para o cálculo da frequência da célula unitária do escoamento em golfadas.....	78
Tabela 6-3 Condição inicial de entrada para escoamento ar-água	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

K-H	- <i>Kelvin-Helmholtz</i>
LACIT	- <i>Laboratório de Ciências Térmicas</i>
PCI	- <i>Placa de circuito impresso</i>
PDF	- <i>Funções densidade de probabilidade</i>
TDMA	- <i>Algoritmo de Matriz tridiagonal</i>
UTFPR	- <i>Universidade Tecnológica Federal do Paraná</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Área	[m ²]
C	-Coeficiente de atrito	-
C_0	-Coeficiente de velocidade da bolha	-
C_∞	-Coeficiente de velocidade da bolha	-
D	- Diâmetro do tubo	[m]
ε	-Rugosidade	[m]
Eu	-Número de Eötvös	-
Fr	-Número de Froude	-
f	-Frequência da célula unitária	[s ⁻¹]
g	-Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	-Altura do filme de líquido	[m]
H	-Fator de pressão	[m]
h	-Fator de esteira	-
I	-Quantidade de movimento	[Pa]
j	-Velocidade superficial	[m/s]
J	-Velocidade de mistura	[m/s]
L	-Comprimento	[m]
LI	-Linha	-
\dot{m}	-Vazão mássica	[Kg/s]
M	-Comprimento do quadro de filmagem	[MP]
N	-Número de dados	-
P	-Pressão	[Pa]
Q	-Vazão	[m ³ /s]
R	-Fração volumétrica	-
Re	-Número de Reynolds	-
S	-Perímetro molhado	[m]
St	-Número de Strouhal	-
t	-Tempo	[s]
T	-Temperatura	[K]
U	-Velocidade	[m/s]

v	-Velocidade crítica	[m/s]
V	-Tensão Elétrica	[V]
x	-Posição da frente do pistão	[m]
y	-Posição da frente da bolha	[m]
z	-Direção axial	[m]
θ	-Ângulo de inclinação do duto	-
α	-Fator de relaxação	-
μ	-Viscosidade	[Pa.s]
ϕ	-Ângulo interno do perímetro molhado de líquido	-
ρ	-Massa específica	[Kg/m ³]
σ	-Tensão superficial	[N/m]
τ	-Tensão de cisalhamento	[Pa]
∇	-Volume de líquido	[m ³]

Subscritos

B	-Região da bolha
C	-Cheio
Cal	-Calibrado
$Corr$	-Corrigido
DS	-Elevação das bolhas em um médio estagnado
DES	-Deslocamento
G	-Gás
GB	-Gás na região da bolha alongada
GS	-Gás no pistão
GER	-Gerado
j	- j -ésima célula unitária
FC	-Fator de corte
i	-Número de iteração
I	-Interface
HL	-Hidráulico de líquido
HG	-Hidráulico de gás
L	-Líquido
LS	-Líquido no pistão

LB	-Líquido na região da bolha (filme de líquido)
Med	-Medido
N	-Número do instante do tempo
n	-Número de células unitárias na tubulação
N_j	-Número da célula unitária
S	-Região do pistão
Se	-Entre as duas PCI do sensor gêmeo resistivo
T	-Translação
u	-Célula unitária
V	-Vazio

Sobrescritos

N	-Instante de tempo atual
N'	-Instante de tempo atual hipotético
0	-Instante do tempo antigo

1 INTRODUÇÃO

Escoamento multifásico é o termo usado para referenciar qualquer escoamento simultâneo de duas ou mais fases, em oposição ao escoamento monofásico onde apenas uma fase encontra-se presente. Tais escoamentos são encontrados em muitos processos industriais como, por exemplo, na produção e transporte de petróleo, reatores nucleares, evaporadores, condensadores, plantas de destilação, caldeiras, entre outros.

Um caso particular de escoamento multifásico é o escoamento bifásico líquido-gás. Neste tipo de escoamento as fases presentes podem escoar em diferentes configurações espaciais e temporais no interior do tubo, denominadas padrões de escoamento. Estes padrões de escoamento dependem das relações entre as vazões de líquido e de gás, configuração geométrica do duto e das propriedades físicas dos fluidos.

Os padrões de escoamento de ocorrência mais comum em dutos horizontais e verticais são apresentados na Figura 1-1 e Figura 1-2.

A Figura 1-1 apresenta alguns dos padrões de escoamento em dutos horizontais: estratificado, golfadas, anular e bolhas dispersas. O escoamento estratificado ocorre a baixas vazões de líquido e gás com separação gravitacional das fases, isto é, a fase líquida escoando na parte inferior do duto e a gasosa na parte superior. Incrementando-se a vazão de líquido, o escoamento torna-se instável e passa a apresentar um comportamento intermitente, denominado escoamento em golfadas. Com um aumento ainda maior da vazão de líquido, as bolhas alongadas coalescem, originando o escoamento anular. Por outro lado, o padrão anular ocorre para altas vazões de gás, onde a fase gasosa escoar no centro do tubo com pequenas gotas de líquido e a fase líquida escoar em forma de filme na parede do tubo.

A Figura 1-2 apresenta os padrões de escoamento em dutos verticais: bolhas dispersas, golfadas, agitado e anular. O escoamento em bolhas dispersas ocorre a baixas vazões de gás. O aumento da vazão de gás faz com que as bolhas dispersas coalesçam, originando golfadas que escoam pelo centro do tubo. Incrementando-se ainda mais a vazão de gás, o escoamento passa por uma transição (escoamento

agitado) até atingir o padrão anular, onde a fase líquida escoar ao redor da parede do tubo e a gasosa escoar pelo centro do tubo com presença de gotículas de líquido.

Dentre os diversos padrões de escoamento bifásico possíveis, o escoamento em golfadas caracteriza-se pela sucessão alternada de duas regiões: um pistão de líquido e uma bolha alongada. O pistão é composto por uma grande quantidade de líquido com presença de pequenas bolhas de gás dispersas. No escoamento horizontal, a região da bolha é estratificada, com o líquido na região inferior e o gás na superior. No escoamento vertical, a região da bolha é anular com o gás na região interior e líquido no exterior, sendo que o líquido que escoar em volta da bolha alongada é chamado filme de líquido.

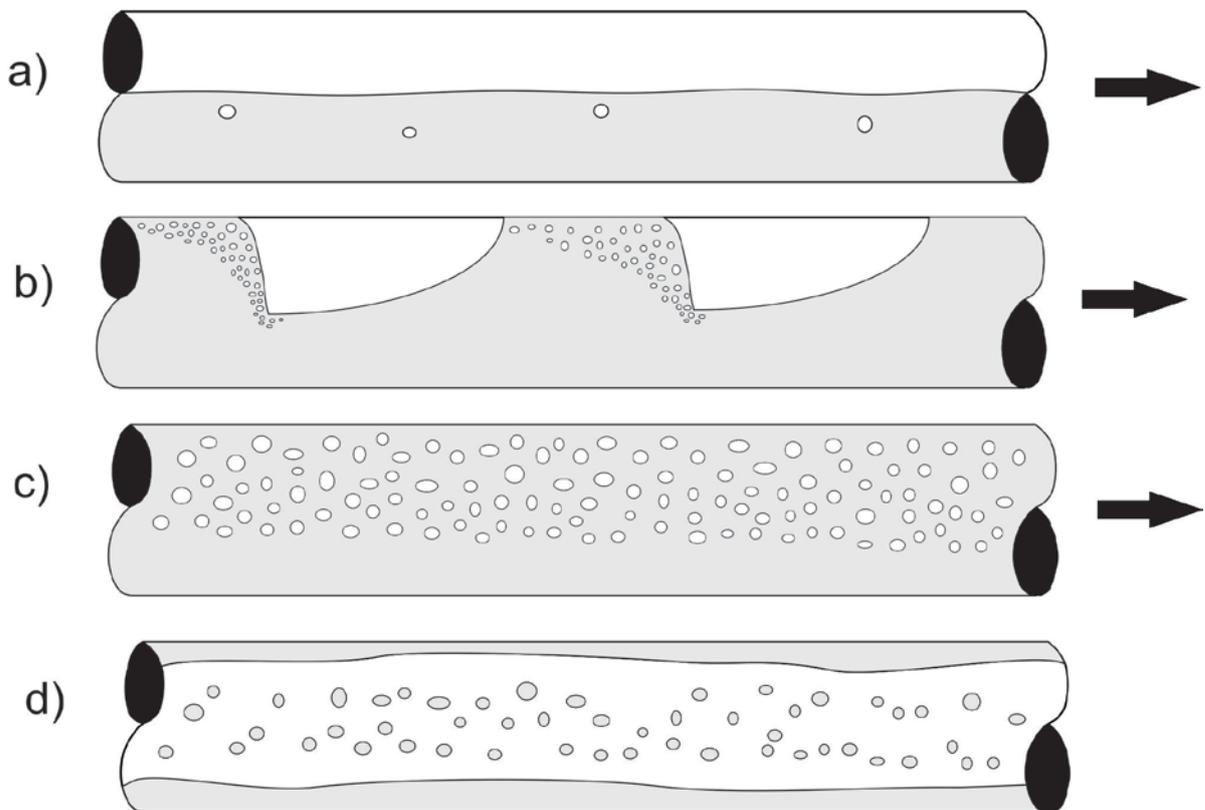


Figura 1-1-Padrões de escoamentos bifásicos líquido-gás em tubulação horizontal (líquido em cinza e gás em branco): a) estratificado, b) golfadas, c) bolhas dispersas, d) anular.

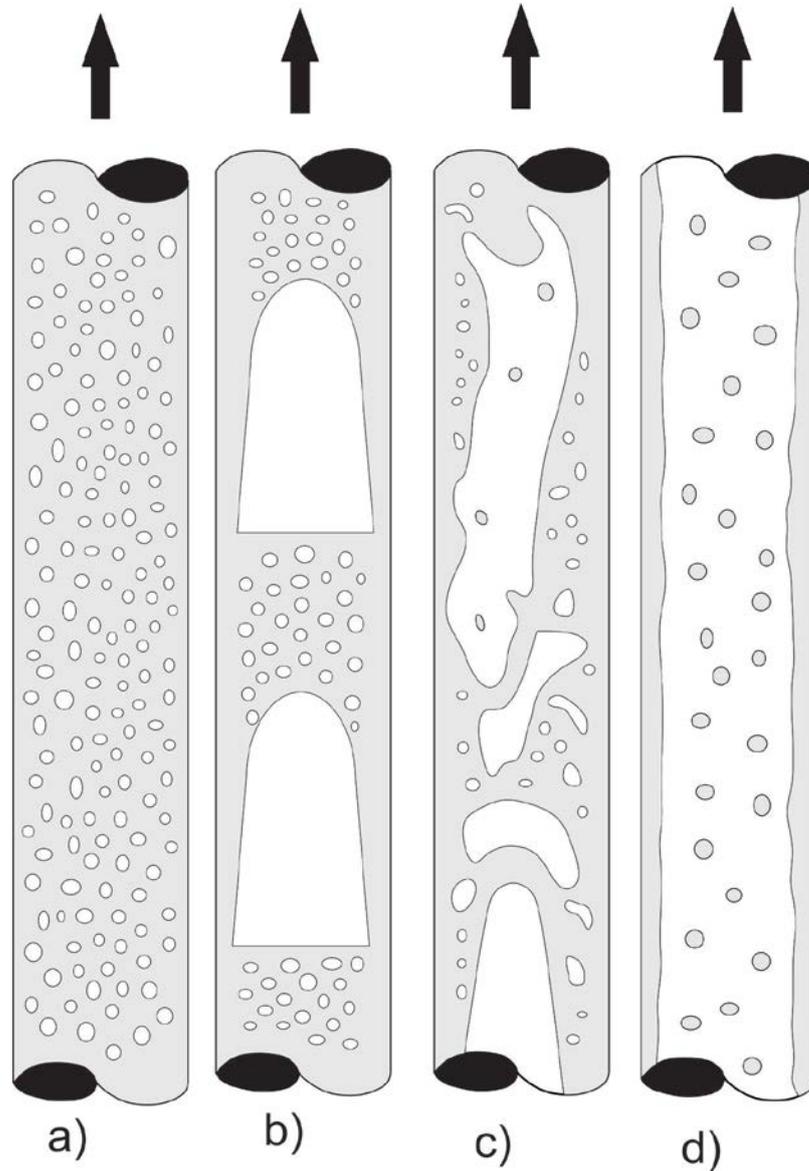


Figura 1-2- Padrões de escoamentos bifásicos líquido-gás em tubulação vertical: a) bolhas dispersas, b) golfadas, c) agitado, d) anular.

A maioria dos estudos feitos até hoje consideram o comportamento dos escoamentos com padrão de golfadas em configurações de tubulação sem variação do ângulo de inclinação ao longo de sua trajetória. Encontram-se poucos estudos deste padrão em configurações de tubulações com esta configuração, também chamado tubulação em terreno ondulado com mudança de direção (*hilly terrain*), ao longo de sua trajetória. Ao mesmo tempo, é notória a importância do escoamento bifásico para a indústria petrolífera, onde é comum a existência de tubulações de

transporte multifásico de fluidos que se estendem por longas distâncias, cruzando áreas de relevo geralmente bastante irregular.

Nesse cenário, torna-se propício e desejável o estudo do escoamento bifásico líquido-gás no padrão em golfadas com uma leve mudança de direção.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo o estudo do escoamento bifásico líquido-gás no padrão em golfadas quando se produz uma leve mudança de direção. É realizada uma análise das influências desta mudança de direção da tubulação nos parâmetros característicos do escoamento bifásico líquido-gás em golfadas como comprimento da bolha, comprimento do pistão de líquido, velocidade da bolha alongada, fração de gás e frequência de passagem das estruturas características deste tipo de escoamento.

Para atingir o objetivo proposto, o modelo lagrangeano de seguimento dos pistões (*slug tracking*), desenvolvido por Rodrigues (2009), foi aprimorado para capturar numericamente os efeitos produzidos pela leve mudança de direção nas estruturas do escoamento.

A seção de teste estudada consiste de um trecho de tubulação horizontal seguido de um trecho inclinado ascendente de 7° , tal como esquematizado na Figura 1-3. Ambos os trechos, horizontal e inclinado, têm diâmetro interno de 26 mm. O estudo foi concentrado no escoamento de ar e água na temperatura ambiente e pressão atmosférica na saída da seção de teste.

Com o objetivo de verificar os resultados numéricos obtidos, são realizados testes experimentais com a finalidade de medir os parâmetros característicos do escoamento bifásico em golfadas, utilizando a bancada experimental instalada no LACIT/UTFPR. Para monitorar a passagem das estruturas do escoamento bifásico foram instalados quatro sensores resistivos em quatro pontos da seção de teste.

A partir dos resultados obtidos, analisa-se a influência da leve mudança de direção no comportamento dos comprimentos da bolha e do pistão, da fração de vazio na região da bolha e da pressão, utilizando-se curvas de valores médios e PDFs.

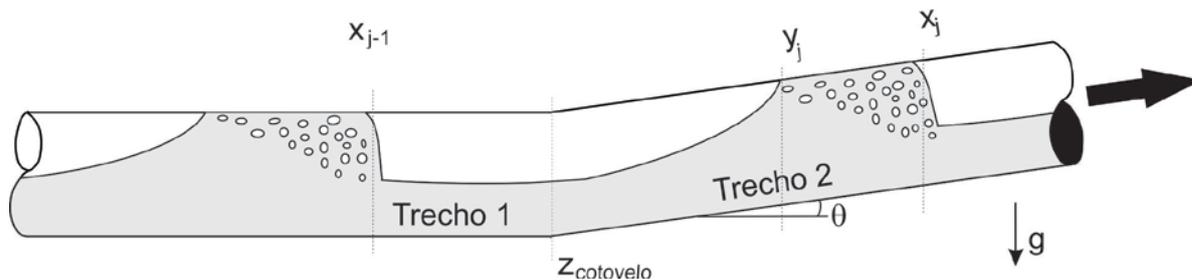


Figura 1-3- Escoamento em golfadas com mudança de direção

1.2 Justificativa

Escoamentos bifásicos em padrão de golfadas com mudança de direção ocorrem em diversas atividades industriais, com especial destaque para a indústria petrolífera onde estes escoamentos são encontrados com grande frequência. Nesta indústria o petróleo é transportado através de uma tubulação que atravessa regiões de diferentes topografias, o que ocasiona variações nos parâmetros do escoamento em golfadas. A Figura 1-4 apresenta o transporte de óleo e gás desde as profundidades marinhas até uma unidade de produção, onde se pode observar que as linhas de produção mudam constantemente de direção devido à topografia do terreno.

Os estudos realizados por Zheng *et al.* (1994), Hill *et al.* (1996), Al-Safran *et al.* (2005), Barbosa (2010) e Conte (2011) buscam entender o comportamento do escoamento quando se produz uma mudança de direção. Dessa maneira, a correta modelagem do escoamento em padrão de golfadas em tubulações com mudança de direção “*hilly terrain*” torna-se uma necessidade na indústria do petróleo, propiciando assim o bom dimensionamento dos equipamentos.

Adicionalmente, o desenvolvimento do presente trabalho – que enfoca uma linha de pesquisa com muitas aplicações práticas – poderá servir de referência para futuros trabalhos na área, com potencial para auxiliar pesquisas com abordagens numéricas e experimentais mais complexas do que a apresentada.

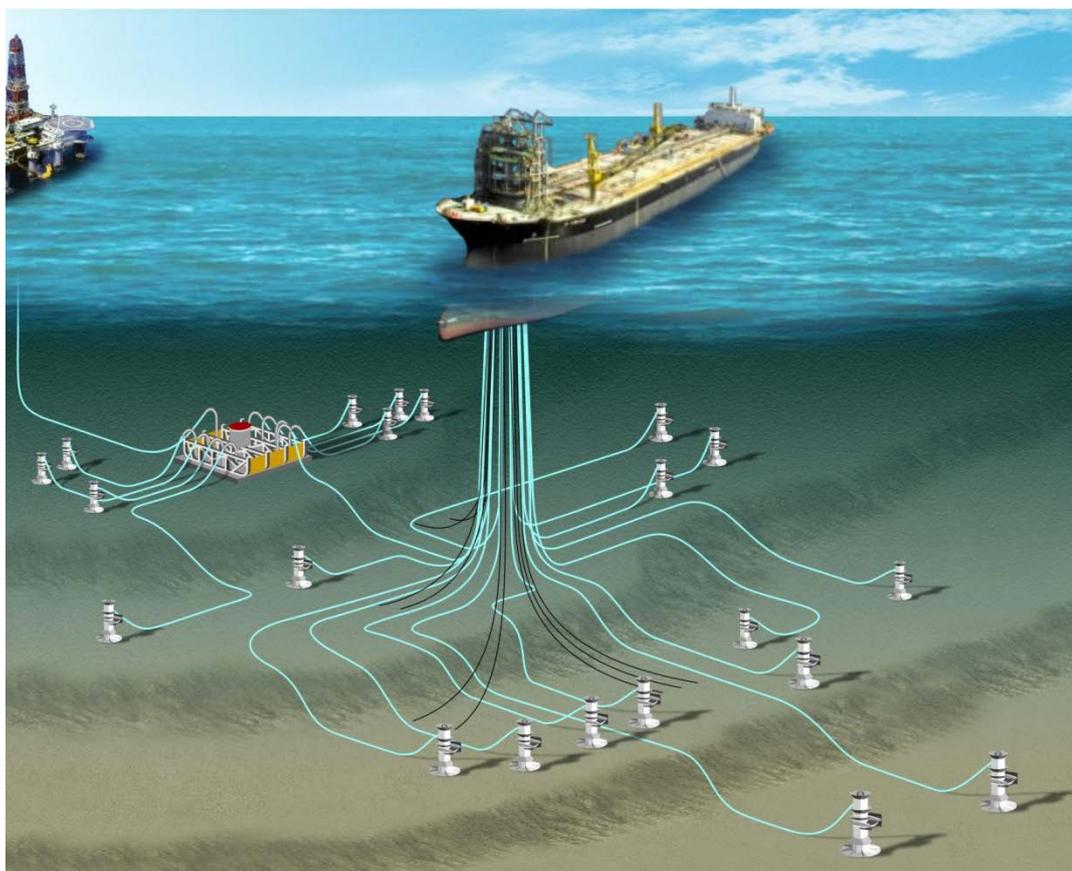


Figura 1-4- Transporte de petróleo nas profundidades marinhas¹

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos. No primeiro capítulo são apresentados a introdução ao problema estudado, os objetivos a serem atingidos e a justificativa para a realização do estudo.

No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica dos estudos anteriores mais relevantes sobre escoamento em golfadas. Primeiramente são apresentados os modelos estacionários e transientes para escoamento em golfadas, e em seguida são apresentados os estudos experimentais e numéricos do escoamento em golfadas com mudança de direção.

No terceiro capítulo é realizada a modelagem matemática do problema em questão, onde são apresentadas as equações de conservação da massa e

¹ <http://diariodopresal.wordpress.com/petroleo-e-gas/>

quantidade de movimento, assim como as equações auxiliares para escoamento em golfadas apresentadas no modelo de Rodrigues (2009). Em seguida é apresentada a formulação matemática quando se produz uma leve mudança de direção no escoamento em golfadas.

O quarto capítulo apresenta a modelagem numérica relacionada à modelagem matemática. Primeiramente introduz-se a discretização das equações governantes utilizando o método de diferenças finitas. Em seguida é apresentada a discretização das equações auxiliares para logo resolver o sistema de equações utilizando o método TDMA (*Tridiagonal Matrix Algorithm*). Por último é mostrado o algoritmo de solução do programa desenvolvido e os tipos de sondas virtuais utilizadas.

No quinto capítulo, a abordagem experimental relacionada ao problema em questão é exposta em detalhe. Primeiramente faz-se uma descrição da bancada experimental. A seguir as características do sensor resistivo são descritas. Logo depois é apresentado o tratamento dos sinais do sensor resistivo. Finalmente é mostrada a metodologia para a aquisição das imagens das câmeras de alta velocidade.

O sexto capítulo trata dos resultados. Na primeira parte são apresentadas a grade de teste dos experimentos e as simulações. Em seguida, os resultados experimentais são apresentados. E finalmente os resultados das simulações experimentais e dos testes experimentais são apresentados e discutidos.

Finalmente, no sétimo capítulo, as conclusões do trabalho são apresentadas, e trabalhos futuros são sugeridos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os diferentes estudos existentes de escoamento em golfadas. Inicialmente serão revisados os modelos estacionários e transientes. Em seguida serão apresentados estudos experimentais e numéricos de escoamento bifásico em golfadas com mudança de direção.

2.1 Revisão dos modelos existentes para escoamento em golfadas

O escoamento em golfadas é um fenômeno intermitente transiente, uma vez que seus parâmetros variam ao longo do tempo. Os primeiros modelos desenvolvidos foram os modelos estacionários, modelos estes que não consideram a intermitência devido a limitações da capacidade de cálculo. A evolução dos microprocessadores propiciou o desenvolvimento de modelos transientes que consideram a intermitência. Alguns modelos estacionários e transientes serão apresentados a seguir.

2.1.1 Modelos estacionários

Os primeiros modelos desenvolvidos para escoamento em golfadas foram os modelos de estado estacionário. O modelo aborda o fenômeno de escoamento em golfadas através do conceito da célula unitária introduzida por Wallis (1969). O autor definiu o conceito de célula unitária, que é composta por uma região do pistão de líquido e região da bolha alongada com o respectivo filme de líquido. Os modelos estacionários consideram que as células unitárias apresentam-se de forma periódica, isto é, que uma única célula se repete tanto no espaço quanto no tempo. Dessa maneira, os cálculos são feitos para uma única célula e depois é necessário extrapolar para determinar os parâmetros das outras células unitárias ao longo da tubulação.

Um dos primeiros estudos do escoamento em golfadas foi realizado por Wallis (1969). O autor afirma que uma vez descrito o comportamento de uma célula unitária típica é possível descrever o comportamento do escoamento em golfadas ao longo

da tubulação. O autor propõe correlações para calcular a velocidade da bolha e as quedas de pressão gravitacionais e friccionais.

O primeiro modelo numérico do escoamento em golfadas para tubulações horizontais foi apresentado por Dukler e Hubbard (1975). O modelo baseia-se nas equações da conservação da massa e da quantidade de movimento, propondo uma distribuição linear do gradiente de pressão ao longo do pistão e uma queda de pressão desprezível ao longo da bolha alongada. Porém, o modelo necessita de algumas equações adicionais de fechamento como a fração de líquido no pistão e a frequência da célula unitária. A partir deste modelo proposto, pode-se calcular a queda de pressão, as velocidades do pistão de líquido, da bolha de Taylor e do filme, e os comprimentos do pistão e da bolha alongada.

Fernandes (1983) desenvolveram um modelo para escoamento vertical. Neste modelo utiliza-se o mesmo raciocínio de Dukler e Hubbard (1975). A partir deste modelo pode-se calcular a queda de pressão, as velocidades do pistão de líquido, da bolha e do filme, a fração de vazio e a frequência da célula.

Taitel e Barnea (1990a) desenvolveram um modelo mais geral para escoamento vertical, horizontal e inclinado. Os autores consideram o líquido e o gás como incompressíveis. O modelo é constituído pelas equações do modelo de bolha e da queda de pressão na célula unitária, que são equações constitutivas para o fechamento do modelo. A partir deste modelo obtém-se o comprimento da bolha alongada, velocidade média do filme de líquido, fração de vazio da bolha alongada, entre outros.

Taitel e Barnea (1990b) examinaram de forma mais detalhada as abordagens anteriores de queda de pressão. Através de balanços de massa e quantidade de movimento os autores propuseram uma expressão da queda de pressão na região da mistura em função dos termos de atrito no filme e o perfil geométrico da bolha alongada.

2.1.2 Modelos transientes

Com os avanços na capacidade de processamento dos computadores obtidos a partir dos anos 90, foi possível o desenvolvimento de novas metodologias computacionais para resolver modelos de escoamento em regime transitório. Os

principais modelos em regime transitório que abordam o problema do escoamento bifásico são os seguintes: o modelo de dois fluidos, o modelo *drift flux* e o de seguimento de pistões, sendo este último comumente conhecido como *slug tracking*. Devido à complexidade desses modelos, o presente trabalho somente abordará o modelo de seguimento de pistões. Revisões dos modelos de dois fluidos e *drift flux* são apresentadas no apêndice do trabalho de Rodrigues (2009).

Nos modelos de seguimento de pistões, os pistões de líquido e as bolhas alongadas são considerados estruturas distintas que se propagam ao longo da tubulação. O modelo emprega uma abordagem lagrangeana para seguir as frentes das bolhas e do pistão, o que diminui o número de equações a serem resolvidas.

Um dos primeiros modelos usando o método de seguimento de pistões foi desenvolvido por Barnea e Taitel (1993). Eles consideraram que os comprimentos do pistão na entrada seguem uma distribuição uniforme ou uma distribuição normal, a qual é propagada ao longo da tubulação; porém, obtiveram resultados semelhantes para as duas distribuições. Os resultados do modelo mostraram que a distribuição do comprimento do pistão na região completamente desenvolvida tem a forma de uma distribuição log-normal. Para células unitárias de comprimentos pequenos gerados na região da entrada da tubulação, é possível observar a coalescência das bolhas.

Taitel e Barnea (1998) desenvolveram um modelo de seguimento de pistões considerando a compressibilidade do gás, escoamento transiente e intermitente. Os resultados mostraram que a compressibilidade do gás ocasiona um incremento do comprimento da célula unitária, porém não tem efeito significativo no crescimento do pistão.

Franklin (2004) apresentou um modelo para escoamento em tubulação horizontal. O autor considera pistões não-aerados, portanto a fração de líquido no pistão é igual à unidade. O autor deduziu um sistema de equações em função das velocidades dos pistões e as pressões das bolhas a partir das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento.

Rodrigues (2009) apresentou um modelo para escoamento em golfadas em tubulação horizontal, vertical e inclinada. O autor considera a intermitência do escoamento em golfadas e a compressibilidade do gás. Assim, ele calcula as velocidades dos pistões e a pressão na bolha alongada a partir das equações de

conservação de massa e quantidade de movimento. A partir dos resultados numéricos obtidos foram elaboradas as distribuições para a velocidade de translação da bolha, comprimento do pistão e da bolha. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais e mostraram que o modelo é capaz de simular o comportamento do escoamento com padrão de golfadas.

Pachas (2011) desenvolveu uma metodologia para a obtenção de dados iniciais com características aleatórias, a fim de aperfeiçoar o desempenho do modelo de seguimento de pistões desenvolvido por Rodrigues (2009). A metodologia de Pachas (2011) considera a distribuição estatística das velocidades superficiais de líquido e de gás, assim como os comprimentos da bolha e do pistão. A metodologia é baseada no modelo de bolha para o cálculo da fração de vazio e no balanço de massa para o cálculo de fração de líquido. Foi utilizada uma distribuição log-normal para os comprimentos do pistão, assim como uma distribuição normal para o comprimento da bolha e a velocidade da bolha. Os resultados foram analisados em termos de dados médios e distribuição de frequência. Os resultados numéricos foram comparados com dados experimentais, apresentando uma boa concordância na maioria das simulações.

2.2 Revisão dos trabalhos sobre escoamento bifásico com mudança de direção.

Nesta seção são apresentados alguns estudos sobre escoamento bifásico com mudança de direção. O principal interesse desses estudos é determinar o comportamento do escoamento com padrão de golfadas quando transitam de um trecho para outro. Na literatura são encontradas abordagens experimentais e numéricas.

Wood (1991) desenvolveu um modelo mecanicista da célula unitária para *hilly terrain*. Este modelo é baseado na análise dos dados empíricos e uma abordagem de escoamento em quase-equilíbrio. O modelo determina a velocidade crítica do gás para a remoção de líquido no cotovelo, a acumulação máxima de líquido no cotovelo e a frequência da célula unitária. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais apresentando boa concordância.

Zheng *et al.* (1994) desenvolveram um modelo numérico que simula o comportamento do escoamento com padrão de golfadas em tubulações *hilly terrain*, considerando o gás incompressível. Os autores consideram dois casos distintos: o primeiro em regime permanente, onde o pistão de líquido e a bolha alongada mantêm sua forma quando transitam em um trecho para o outro; o segundo considera a geração e a dissipação de pistões de líquido e bolhas alongadas, sendo que suas estruturas não mantêm sua identidade quando mudam de um trecho para outro. Os resultados obtidos do modelo foram comparados com dados experimentais e mostraram que o modelo é capaz de simular o comportamento do escoamento com padrão de golfadas em tubulações *hilly terrain*.

Henau e Raithby (1994) realizaram um estudo experimental do escoamento bifásico líquido-gás em tubulações *hilly terrain*. Os autores desenvolveram uma bancada de testes que é constituída por uma tubulação dividida em quatro trechos: o primeiro inclinado descendente, seguido de um segundo ascendente, seguido do terceiro trecho inclinado descendente e o quarto inclinado ascendente. Na bancada experimental foram testados dois casos: o primeiro em regime estacionário e o segundo em regime transitório. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados numéricos do modelo de dois fluidos desenvolvido por Henau e Raithby (1994 a,b). No caso de regime estacionário os resultados experimentais e numéricos apresentam discrepâncias, devidos às correlações experimentais usadas no modelo numérico. No caso de regime transitório os resultados numéricos e experimentais apresentam boa concordância.

Zheng *et al.* (1995) apresentaram uma abordagem experimental do escoamento com padrão de golfadas em tubulações *hilly terrain*. Os autores utilizam uma bancada experimental para a medição dos parâmetros característicos do escoamento. A bancada experimental contém um trecho de tubulação horizontal seguida de um trecho inclinado ascendente, um trecho inclinado descendente e um horizontal. Vários testes foram realizados para diferentes inclinações, vazões de gás e de líquido. Os resultados obtidos mostraram que para todos os testes o padrão em golfadas ocorre nos trechos horizontais e inclinado ascendentes. Por outro lado, o padrão estratificado é observado para alguns testes no trecho inclinado descendente. Além disso, são observadas a geração e dissipação de células unitárias no cotovelo que une os trechos.

Nydal (1995) apresentou um modelo numérico para escoamento de padrão de golfadas em tubulações *hilly terrain*, considerando o pistão do líquido não aerado, a fração de líquido no filme variável e gás incompressível. Os autores utilizam as equações da conservação da massa e da quantidade de movimento das regiões do pistão de líquido e da bolha alongada.

Hill *et al.* (1996) realizaram um estudo do escoamento com padrão de golfadas nas linhas de óleo da Cusiana, uma região localizada na cordilheira oriental dos Andes, na Colômbia, situada em uma área de terrenos muito montanhosos com fortes elevações. O objetivo desse estudo foi determinar a queda da pressão e as características do escoamento ao longo de linhas com diferentes comprimentos, diâmetros e topografias, através de um programa comercial. Os resultados obtidos foram comparados com dados já existentes, a fim de melhorar a metodologia do transporte do óleo.

Taitel e Barnea (2000) estenderam seu estudo de seguimento de pistões do padrão de golfadas para tubulações *hilly terrain*. O modelo é baseado na formulação de quase-equilíbrio, o que configura uma compatibilidade total com o estado estacionário da célula unitária. Este modelo é mais geral que o modelo desenvolvido por Zheng *et al.* (1994), pois nele são considerados os efeitos da compressibilidade do gás, a variação da fração de vazio na região da bolha alongada, a espessura do filme como sendo variável ao longo da região do filme e a possível variação da velocidade de translação da bolha de Taylor.

Al-Safran *et al.* (2004) apresentaram um modelo numérico para escoamento em padrão de golfadas em tubulações *hilly terrain* com a finalidade de prever as distribuições dos comprimentos dos pistões ao longo da tubulação. O modelo considera os efeitos de compressibilidade do gás e a fração de líquido no pistão. As distribuições dos comprimentos do pistão foram comparadas com resultados experimentais. O modelo é capaz de prever a distribuição dos comprimentos do pistão ao longo da tubulação, porém apresenta discrepâncias entre os máximos comprimentos do pistão calculado e o medido.

Al-Safran *et al.* (2005) apresentaram uma abordagem experimental do escoamento em padrão golfada quando a célula unitária passa por um cotovelo formado em um ponto baixo da tubulação. Os autores apresentam dois fenômenos, que ocorrem quando o pistão de líquido atravessa o cotovelo: crescimento e geração

do pistão de líquido. O crescimento do pistão de líquido ocorre devido à acumulação de líquido quando a bolha passa pelo cotovelo. Este líquido acumulado é formado pelo líquido à montante e pelo retorno do líquido à jusante, devido à gravidade. Este líquido acumulado provoca o crescimento da altura do filme e se este acúmulo de líquido atinge a parte superior da tubulação a bolha alongada se divide, gerando um novo pistão. Caso o acúmulo de líquido não produza um novo pistão, este líquido acumulado pela inércia do escoamento é jogado para trás, ocasionando um crescimento do pistão precedente.

Madal. *et al.* (2008) apresentaram um estudo experimental para escoamento em padrão de golfadas para tubulações com mudança de direção (*hilly terrain*). A bancada utilizada para as medições consiste em um trecho horizontal, seguido de um inclinado ascendente, seguido de um trecho inclinado descendente e um horizontal. Os trechos horizontais referem-se ao trecho montante e jusante, dependendo da direção do escoamento. Os resultados mostraram o padrão estratificado na montante da tubulação *hilly terrain* enquanto na jusante o padrão em golfadas persiste. As golfadas iniciadas no trecho inclinado ascendente são parcialmente ou completamente dissipadas no trecho inclinado descendente para baixas a moderadas velocidades superficiais, enquanto que as altas velocidades superficiais não influenciam no escoamento em golfadas no trecho horizontal.

Barbosa (2010) apresentou um estudo do escoamento padrão golfada durante a transição do trecho vertical ascendente para o horizontal. Este estudo utiliza o modelo de seguimento de pistões desenvolvido por Rodrigues (2009). Na configuração vertical o escoamento é composto por um pistão de líquido aerado e uma bolha de Taylor com uma interface anular, posicionada concentricamente no duto e circundada por um filme de líquido de pequena espessura. Na configuração horizontal a aeração dos pistões de líquido não é significativa e as bolhas de Taylor escoam na parte superior do duto. No trabalho, são apresentados dados experimentais referentes aos principais parâmetros desse tipo de escoamento, como velocidade de propagação das bolhas, tamanhos de bolhas e de pistões e gradiente de pressão em termos de seus valores médios e de suas distribuições. Os resultados numéricos apresentaram boa concordância quando comparados com os resultados experimentais.

Conte *et al.* (2011) apresentaram o modelo proposto por Rodrigues (2009) com a implantação de uma leve mudança de direção. O modelo considera o acúmulo do líquido na região da mudança produzido pela passagem do pistão de líquido. O acúmulo do líquido produz o crescimento do pistão precedente. Três casos foram simulados, onde todos eles têm um trecho horizontal seguido de um trecho inclinado ascendente de 3°, 5° e 7°, respectivamente. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais apresentando boa concordância.

2.3 Comentários finais

Neste capítulo foi apresentada uma revisão dos estudos existentes sobre escoamento em golfada (modelos estacionários e transientes) e escoamento em golfadas com mudança de direção a fim de fornecer uma base teórica sólida para o desenvolvimento do presente trabalho. Nesta revisão foi observado que existem poucos estudos sobre o escoamento em golfadas com mudança de direção, e estes não são conclusivos o suficiente sobre o problema em questão e não permitem a sua utilização no desenvolvimento de modelos ou validações de resultados de simulações numéricas. Neste cenário, espera-se que o presente trabalho constitua um avanço para o estado-da-arte vigente sobre o assunto, e que sirva como referência para futuros desenvolvimentos nesta área. No seguinte capítulo será apresentada a formulação matemática que descreve o comportamento do escoamento quando se produz uma leve mudança de direção, e para isso será utilizado o modelo de seguimento dos pistões desenvolvido por Rodrigues (2009), que não considera os efeitos produzidos pela mudança de direção. Os seguintes efeitos produzidos pela leve mudança de direção são considerados neste trabalho: o efeito gravitacional, o efeito geométrico e o acúmulo de líquido na região do cotovelo, sendo que este último pode produzir dois fenômenos: a quebra da bolha alongada e a geração de um novo pistão. Por outro lado o modelo desenvolvido utiliza o trabalho de Conte (2011), que considera estes efeitos, embora não contemple a quebra da bolha alongada, assumindo que a comprimento da célula unitária não varia quando transita de um trecho para outro. Esta última consideração não é necessariamente correta e, assim sendo, o presente trabalho propõe o caso

em que o comprimento da célula unitária varia ao transitar pela região da mudança. Além disso, o modelo proposto contempla a quebra da bolha alongada na região de mudança.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo apresentar-se-á a formulação matemática do modelo de seguimento dos pistões proposto por Rodrigues (2009) e a seguir será apresentada a formulação matemática quando o escoamento transita de um trecho horizontal para um trecho inclinado ascendente.

O modelo desenvolvido por Rodrigues (2009) baseia-se no conceito da célula unitária proposto por Wallis (1969), e foi obtido a partir dos balanços de massa e quantidade de movimento nas formas integrais aplicadas a volumes de controle nas regiões do pistão, bolha e filme em um duto com uma inclinação em relação à horizontal, conforme mostra a Figura 3-1. Este modelo utiliza uma abordagem lagrangeana. O autor considera as seguintes hipóteses para a simplificação das equações de conservação da massa e quantidade de movimento: escoamento unidimensional, escoamento em regime transitório, escoamento isotérmico, fluidos newtonianos, gás compressível e líquido incompressível e pressão desprezível ao longo da bolha alongada.

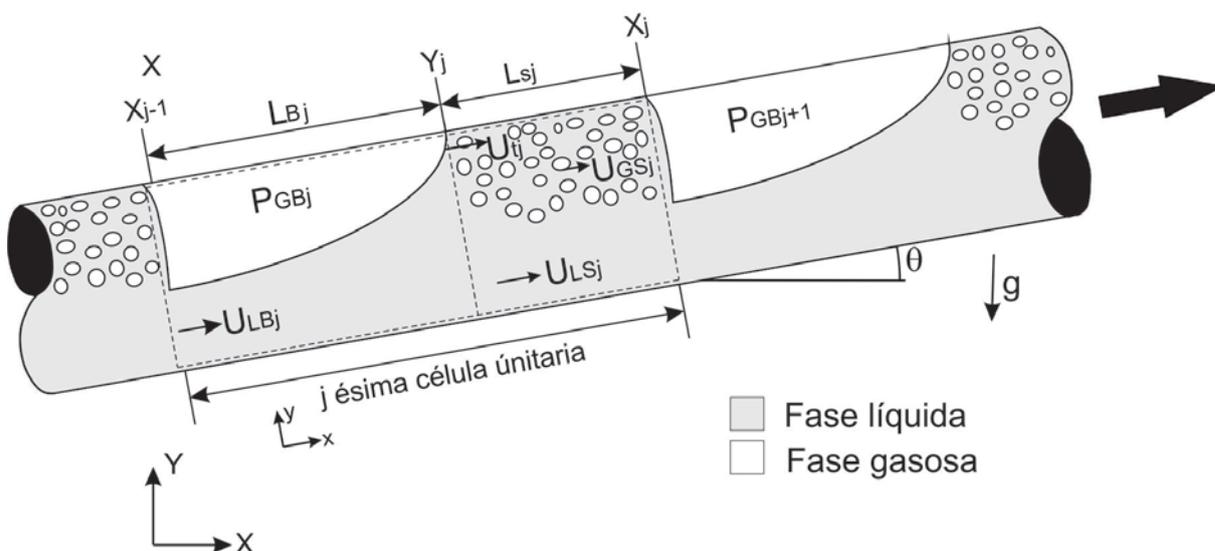


Figura 3-1-Célula unitária j

A Figura 3-1 apresenta o volume de controle que envolve a j -ésima célula unitária, onde x_j e y_j são as posições da frente do pistão e da frente da bolha, respectivamente. O comprimento do pistão de líquido j é L_{Sj} , o comprimento da bolha

é L_{Bj} , a pressão no interior do gás é P_{GBj} . U_{LSj} e U_{GSj} são as velocidades médias do líquido e do gás, respectivamente, no pistão j , U_{LBj} é a velocidade média do líquido no filme, U_{Tj} é a velocidade da translação da bolha, θ é o ângulo de inclinação do tubo com a horizontal e g é a gravidade.

3.1 Balanço de massa e quantidade de movimento

O balanço de massa é aplicado a todas as regiões da célula unitária para as fases de líquido e gás. O acoplamento dessas equações resulta numa equação de balanço de massa global na célula unitária j apresentada na equação (3.1). Além disso, o gás é considerado compressível e, pela hipótese do gás ideal, o balanço global da massa na célula unitária j pode ser expresso em função da pressão.

$$U_{LSj} - U_{LSj-1} = \frac{dP_{GBj}}{dt} \left[L_{Bj} \frac{(1-R_{LBj})}{P_{GBj}} + \frac{L_{Sj}(1-R_{LSj})}{2 P_{GBj}} + \frac{L_{Sj-1}(1-R_{LSj-1})}{2 P_{GBj-1}} \right] + \left(\frac{1-R_{LSj}}{R_{LSj}} \right) U_{DSj} - \left(\frac{1-R_{LSj-1}}{R_{LSj-1}} \right) U_{DSj-1} \quad (3.1)$$

onde U_{DSj} é a velocidade de elevação das bolhas em um meio estagnado, U_{LS} é a velocidade do líquido no pistão, R_{LSj} e R_{LBj} são as frações de líquido na região do pistão e da bolha alongada, L_{Sj} e L_{Bj} são respectivamente os comprimentos dos pistões e das bolhas e P_{GB} é a pressão de gás na bolha.

A equação (3.1) mostra que a diferença de velocidades do líquido nos pistões adjacentes é devida à expansão do gás da bolha entre os pistões (primeiro termo do lado direito) e à diferença de velocidade das bolhas dispersas nos pistões de líquido da j -ésima célula e a anterior (segundo e terceiro termos).

O balanço de quantidade de movimento é aplicado a todas as regiões líquidas da célula unitária. Negligenciando-se a queda da pressão na frente da bolha ($P_s \Big|_{y_j} = P_{GBj}$) e a queda da pressão ao longo da célula unitária obtém-se:

$$\begin{aligned}
 P_{GBj} - P_{GBj+1} = & \frac{\tau_{LBj+1} S_{LBj+1} L_{Bj+1} + \tau_{LSj} \pi D L_{Sj}}{A} + (R_{LSj} L_{Sj} + R_{LBj+1} L_{Bj+1}) \rho_L g \sin \theta + \\
 & + \rho_L \left\{ L_{Sj} R_{LSj} \frac{dU_{LSj}}{dt} + L_{Sj} \frac{dR_{LSj}}{dt} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{dx_j}{dt} + \frac{dy_j}{dt} \right) - U_{LSj} \right] \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

onde τ_{LBj+1} e τ_{LSj} são a tensão do cisalhamento da região da bolha alongada e da região da região do pistão, S_{LBj+1} é o perímetro molhado na região da bolha, θ é o ângulo de inclinação do duto em relação à horizontal, A é a área da seção transversal do duto, ρ_L é a massa específica de líquido x e y são as posições referentes às frentes dos pistões e das bolhas, respectivamente.

A equação (3.2) mostra que a diferença de pressões do gás no interior de duas bolhas consecutivas é devida às forças de atrito que atuam na parede do pistão e o filme de líquido (primeiro termo do lado direito), à ação da gravidade apresentada pelo segundo termo e à aceleração do *slug* apresentada pelo terceiro termo.

As variáveis τ_{LBj+1} , τ_{LSj} , S_{LBj+1} , dx_j/dt , dy_j/dt são calculadas a partir de equações auxiliares apresentadas na seção seguinte.

3.2 Equações auxiliares

Das equações de balanço da massa e quantidade de movimento, equações (3.1) e (3.2), pode-se observar que para sua solução será necessário conhecer as velocidades das fronteiras e outros parâmetros cinemáticos apresentados no estudo de Rodrigues (2009). Os parâmetros a serem apresentados nesta seção são: tensão de cisalhamento, coeficiente de atrito, perímetro molhado, velocidades da frente da bolha, velocidade da traseira da bolha e a velocidade do filme de líquido.

3.2.1 Tensão de cisalhamento e perímetro molhado

As tensões de cisalhamento, o fator de atrito e o número de Reynolds são apresentados na Tabela 3-1. As tensões de cisalhamento são função do fator de atrito de Fanning e das velocidades. O coeficiente de atrito de Fanning é calculado a partir da correlação de Blasius.

Tabela 3-1 - Tensão de cisalhamento, coeficiente de atrito e número de Reynolds.

	Pistão do líquido na célula j	Filme de líquido na célula $j+1$
Tensão de cisalhamento	$\tau_{LSj} = C_{LSj} \frac{\rho_L U_{LSj}^2}{2}$	$\tau_{LBj+1} = C_{LBj+1} \rho_L \frac{U_{LBj+1}^2}{2}$
Coeficiente de atrito	$C_{LSj} = \begin{cases} \frac{16}{Re_{LSj}}, & \text{se } Re_{LSj} < 1000 \\ 0,079 \\ Re_{LSj}^{0,25}, & \text{se } Re_{LSj} > 1000 \end{cases}$	$C_{LBj} = \begin{cases} \frac{16}{Re_{LBj}}, & \text{se } Re_{LBj} < 1000 \\ 0,079 \\ Re_{LBj}^{0,25}, & \text{se } Re_{LBj} > 1000 \end{cases}$
Número de Reynolds	$Re_{LSj} = \frac{\rho_L U_{LSj} D_{HLj}}{\mu_L}$	$Re_{LBj} = \frac{\rho_L U_{LBj} D_{LHj}}{\mu_L}$

Com os parâmetros da área e perímetro molhado pode-se calcular o diâmetro hidráulico D_{Hj} :

$$D_{HLj} = 4 \frac{R_{LBj} A}{S_{LB}} = \frac{R_{LBj} D^2 \pi}{S_{LBj}} \quad (3.3)$$

O perímetro molhado do filme S_{LBj} pode ser calculado usando-se a correlação de Fagundes Neto (1999):

$$\frac{S_{LBj}}{\pi D} = \begin{cases} 1, & \text{se } \theta \sim 90^\circ \\ 0,5269 R_{LBj} + 0,2365, & \text{se } \theta \sim 0^\circ \end{cases} \quad (3.4)$$

3.2.1 Velocidades da frente da bolha

A velocidade da frente da bolha alongada com a fronteira y_j está se movendo é a velocidade da frente da bolha U_{Tj} , é calculada pela seguinte equação:

$$\frac{dy_j}{dt} = U_{Tj} = \left(C_0 J + C_\infty \sqrt{gD} \right) (1 + \#) \quad (3.5)$$

onde J é a velocidade da mistura, μ é o fator de esteira, C_0 e C_∞ são constantes. A constante C_0 quantifica a influência da velocidade do pistão e C_∞ é relacionada à velocidade que uma bolha teria se o líquido à sua frente estivesse estagnado. Os coeficientes C_0 e C_∞ são calculados a partir da correlação de Bendiksen (1984) conforme apresentados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Coeficientes para a velocidade de translação da bolha

Número de Reynolds	Número de Froude	C_0	C_∞
$Re_j \geq 2000$	$Fr_j \geq 3,5$	1,2	$\frac{0,345}{(1 + 3805 / Eo^{3,06})^{0,58}} \text{sen}(\theta)$
	$Fr_j < 3,5$	$1 + 0,2 \text{sen}^2(\theta)$	$\left(0,542 - \frac{1,76}{Eo^{0,56}}\right) \cos(\theta) + \frac{0,345}{(1 + 3805 / Eo^{3,06})^{0,58}} \text{sen}(\theta)$
$Re_j < 2000$		2,0	$\left(0,542 - \frac{1,76}{Eo^{0,56}}\right) \cos(\theta) + \frac{0,345}{(1 + 3805 / Eo^{3,06})^{0,58}} \text{sen}(\theta)$

Na Tabela 3-3 são apresentadas as relações para determinar os números de Eötvös, Froude e Reynolds. O número de Eötvös é a relação entre as forças gravitacionais e a tensão superficial de líquido, o número de Froude (Fr_j) é a relação entre as forças de inércia e gravitacionais e o número de Reynolds (Re_j) é a relação entre as forças inerciais e viscosas.

Tabela 3-3 - Coeficientes para a velocidade de translação da bolha

Número de Eötvös	Número de Froude	Número de Reynolds
$Eo = \frac{(\rho_L - \rho_G) g D^2}{\sigma}$	$Fr_j = \frac{J}{\sqrt{gD}}$	$Re_j = \frac{\rho_L J D}{\mu_L}$

O fator de esteira é calculado a partir da correlação de Moissis e Griffith (1962):

$$h_j = a_w \exp\left(-b_w \frac{L_s}{D}\right) \quad (3.6)$$

onde a_w e b_w são constantes obtidas experimentalmente. Para escoamentos com pistões de líquidos relativamente grandes os efeitos da esteira na velocidade da bolha são pequenos. Por outro lado para escoamentos com pistões de líquidos pequenos o efeito da esteira incrementa a velocidade da bolha provocando a coalescência das bolhas.

3.2.2 Velocidade traseira da bolha

A expressão para a velocidade da traseira da bolha com fronteira x_j . pode ser obtida da equação de conservação da massa na bolha:

$$\begin{aligned} \frac{dx_{j-1}}{dt} = & \frac{\left(R_{GBj} - R_{GSj}\right) \frac{dy_j}{dt} - \frac{L_{Sj}}{2} \frac{dR_{LSj}}{dt} - \frac{L_{Sj-1}}{2} \frac{dR_{LSj-1}}{dt}}{R_{GBj} - R_{GBj-1}} + \\ & \frac{\frac{dP_{GBj}}{dt} \left(\frac{L_{Bj} R_{GBj}}{P_{GBj}} + \frac{L_{Sj} R_{GSj}}{2P_{GBj}} + \frac{L_{Sj-1} R_{GSj-1}}{2P_{GBj-1}} \right) + R_{GSj} U_{GSj} - R_{GSj-1} U_{GSj-1}}{R_{GBj} - R_{GBj-1}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

sendo R_{GBj} a fração de vazio na região da bolha alongada, R_{LSj} a fração de líquido na região do filme, L_{Sj} e L_{Bj} os comprimentos do pistão e bolha respectivamente, U_{GSj} a velocidade das bolhas dispersas na região do pistão, x e y são as posições referentes às frentes dos pistões e das bolhas, respectivamente.

3.2.3 Velocidade do filme de líquido

A velocidade do filme do líquido é calculada através de um balanço da massa para um volume de controle que engloba a frente da bolha desde o pistão até uma região no filme onde a velocidade é igual à velocidade média. O volume de controle é apresentado na Figura 3-2.

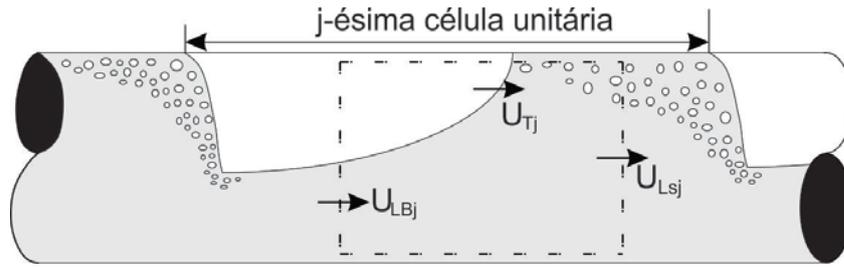


Figura 3-2-Volume de controle para a velocidade do filme

A Figura 3-2 apresenta o volume de controle indeformável que se move com uma velocidade igual à velocidade de translação da bolha U_{Tj} . A velocidade de líquido no pistão é U_{LSj} , a velocidade de líquido na região da bolha é U_{LBj} e a velocidade das bolhas dispersas no pistão é U_{GBj} . Assim, realizando-se um balanço de massa líquida através do volume de controle da Figura 3-2 obtém-se:

$$\rho_L A R_{LSj} (U_{LSj} - U_{Tj}) - \rho_L A R_{LB} (U_{LBj} - U_{Tj}) = 0 \quad (3.8)$$

Isolando-se a velocidade do filme U_{LBj} , obtém-se:

$$U_{LBj} = U_{Tj} + \frac{R_{LSj}}{R_{LB}} (U_{LSj} - U_{Tj}) \quad (3.9)$$

Dessa maneira são obtidas as equações auxiliares para o cálculo das equações (3.1) e(3.2). Porém, sendo um escoamento transiente e intermitente, pode resultar que a velocidade do frente da bolha alongada pode resultar maior que a velocidade traseira da bolha precedente, originando uma coalescência da bolha alongada, está coalescência é modelado na seguinte seção.

3.2.4 Coalescência das bolhas

A coalescência é um fenômeno que ocorre quando a velocidade de translação da bolha $j-1$ é maior que na velocidade de translação da bolha j , ocasionando a coalescência destas duas bolhas e dando origem a uma bolha de maior dimensão. Na modelagem matemática considera-se que duas bolhas coalescem quando a

distância entre elas é menor que o diâmetro da tubulação. O fenômeno da coalescência das bolhas é mostrado na Figura 3-3.

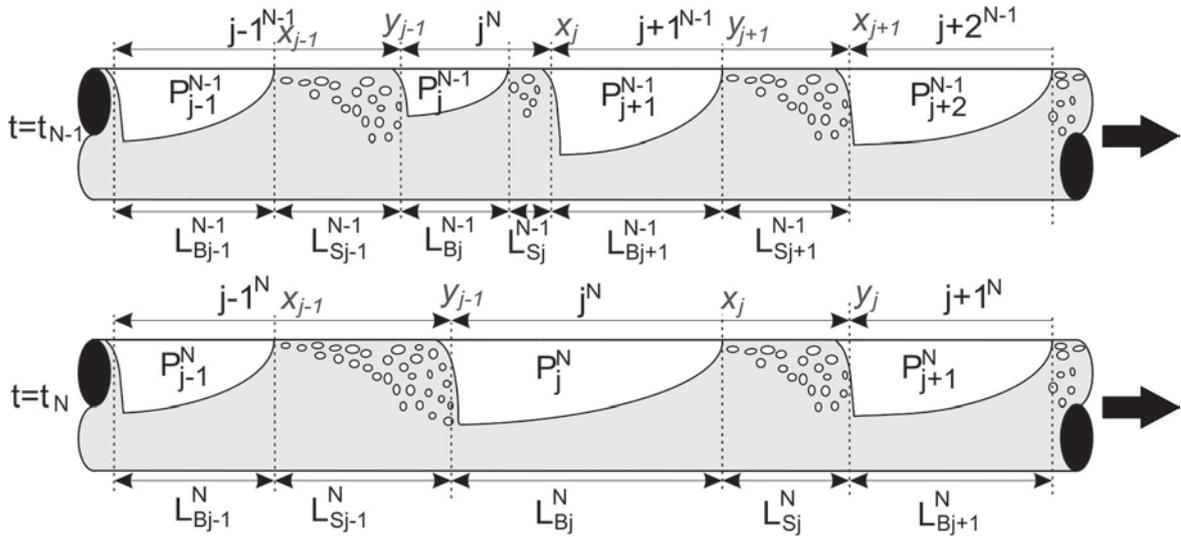


Figura 3-3 - Coalescência de bolhas

Na Figura 3-3 o sobrescrito N indica o instante onde se produz a coalescência das bolhas, enquanto o sobrescrito $N-1$ indica o instante anterior à coalescência das bolhas. Assim, se duas bolhas j e $j+1$ coalescem o comprimento da nova bolha é a soma dos comprimentos das bolhas j e $j+1$.

$$L_{Bj}^N = L_{Bj}^{N-1} + L_{Bj+1}^{N-1} \tag{3.10}$$

O comprimento do pistão j é muito pequeno, mas não pode ser desprezado, caso contrário o balanço de massa não será satisfeito. Nesse sentido o novo comprimento do pistão $j-1$ é igual à soma dos comprimentos dos pistões $j-1$ e j .

$$L_{Sj-1}^N = L_{Sj}^{N-1} + L_{Sj-1}^{N-1} \tag{3.11}$$

Além disso, considera-se que as frações do volume no pistão j não variam.

$$R_{LSj}^N = R_{LSj+1}^{N-1} \tag{3.12}$$

A fração de gás da nova bolha j é calculada considerando-se fração máxima de gás entre as antigas bolhas j e $j-1$.

$$R_{GBj}^N = \max \left[R_{GBj}^{N-1}, R_{GBj+1}^{N-1} \right] \quad (3.13)$$

A pressão da nova bolha j é calculada a partir das pressões das bolhas j e $j+1$ no instante de tempo anterior.

$$P_{GBj}^N = \frac{P_{GBj}^{N-1} + P_{GBj+1}^{N-1}}{2} \quad (3.14)$$

3.3 Modelo de mudança de direção

O modelo desenvolvido por Rodrigues (2009) considera escoamento bifásico líquido-gás em padrão de golfadas em tubulações que apresentam apenas uma inclinação arbitrária. Uma restrição desse modelo é que ele não considera os efeitos da mudança de direção e tampouco os efeitos da variação geométrica da bolha quando transitam de um trecho para o outro. Dessa forma, para poder aplicar o modelo desenvolvido por Rodrigues (2009), é necessário modificá-lo para que ele capture os efeitos produzidos pela variação do ângulo de inclinação nos principais parâmetros do escoamento bifásico.

A configuração estudada neste trabalho está composta por um trecho horizontal conectado a um trecho inclinado ascendente, como mostra a Figura 3-4.

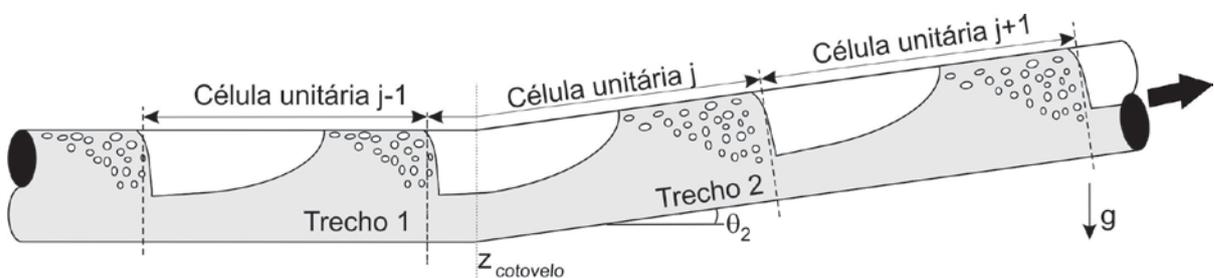


Figura 3-4-E escoamento bifásico em padrão de golfada durante a mudança de trecho.

A Figura 3-4 mostra o escoamento bifásico quando transita de um trecho para o outro, sendo que esta região onde se produz a mudança de direção é denominada região do cotovelo. O primeiro trecho é horizontal e o segundo trecho tem um ângulo de inclinação θ_2 . Neste estudo abordar-se-ão os efeitos da leve mudança de direção nos principais parâmetros do escoamento bifásico líquido-gás em golfadas. Dentre os efeitos produzidos pela mudança de direção tem-se o efeito gravitacional, o efeito geométrico e acúmulo de líquido na região do cotovelo. Estes efeitos serão descritos detalhadamente nas seções vindouras.

3.3.1 Efeito gravitacional

O segundo termo do lado direito da equação da quantidade de movimento (equação (3.2)) representa a queda de pressão gravitacional e é reproduzido na equação (3.15). A queda de pressão gravitacional depende da aceleração da gravidade, comprimento da bolha e do pistão, do ângulo de inclinação do trecho, das frações de líquido no pistão e na bolha alongada e da massa específica do líquido.

$$\Delta P_{Gj} = (R_{Lsj}L_{sj} + R_{LBj+1}L_{Bj+1})\rho_L g \text{ sen}\theta \quad (3.15)$$

Pode-se observar na equação (3.15) que a queda de pressão gravitacional é aplicada ao comprimento do pistão da célula unitária j e ao comprimento da bolha alongada da célula unitária $j+1$.

Uma modificação no termo da queda da pressão do modelo de Rodrigues (2009) deve ser feita no sentido de permitir que cada célula unitária possa ter uma inclinação própria. Como critério de transição entre os trechos escolhe-se a posição da frente da bolha x_j . Dessa maneira cada vez que a frente da bolha atravessa o cotovelo $z_{cotovelo}$, toda célula unitária à qual pertence à bolha recebe a inclinação do trecho seguinte, como mostrado nos tempos t_N e t_{N+1} na Figura 3-5. Nesse sentido, enquanto a bolha alongada estiver passando pela região do cotovelo todo o comprimento contribuirá para a queda da pressão gravitacional com a inclinação do trecho seguinte. Situação similar ocorrerá durante a passagem do pistão, porém de forma inversa. Se o pistão estivesse passando pela região do cotovelo todo seu

comprimento contribuiria para a queda da pressão gravitacional com a inclinação do trecho anterior, como mostrado nos instantes t_{N+2} e t_{N+3} :

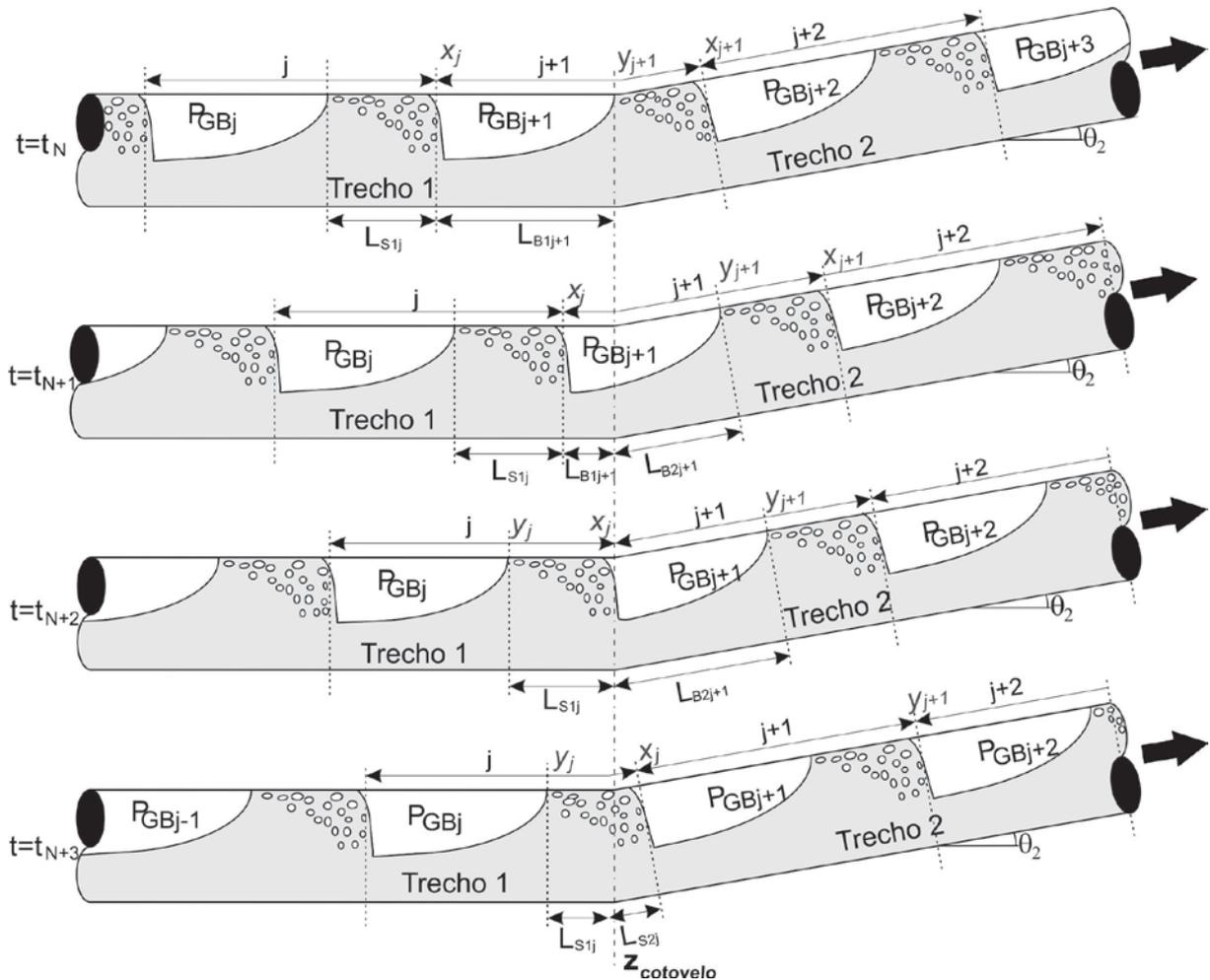


Figura 3-5- Transição de pistões de líquido e bolha alongada de um trecho para outro.

Por outro lado é necessário adequar a passagens das bolhas alongadas e dos pistões de líquido pela região de mudança, os comprimentos destes foram divididos em duas partes como é mostrado na Figura 3-5, estas porções sofrem os efeitos da gravidade. Dessa maneira, de acordo com a equação para a queda da pressão gravitacional apresentada pela equação (3.15), os comprimentos das frações dos pistões e bolha alongada variam de zero até o comprimento total do pistão.

Com esta descrição da passagem dos comprimentos da bolha alongada e do pistão pela região do cotovelo, a equação da queda de pressão é modificada

considerando-se os efeitos gravitacionais produzidos pela mudança de trecho. Esta modificação foi apresentada nos trabalhos de Barbosa (2010) e Conte (2011), sendo dada por:

$$\Delta P_{Gj} = \rho_L g R_{LSj} (L_{S1j} \text{sen}(\theta_1) + L_{S2j} \text{sen}(\theta_2)) + \rho_L g R_{LBj+1} (L_{B1j+1} \text{sen}(\theta_1) + L_{B2j+1} \text{sen}(\theta_2)) \quad (3.16)$$

onde os subscritos 1 e 2 representam, respectivamente, os parâmetros do primeiro e segundo trecho (antes e depois do cotovelo). A maneira como são determinados os comprimentos do pistão e da bolha alongada será apresentada na seção 4.1.3

3.3.2 Efeito geométrico

De uma forma geral, o escoamento bifásico líquido-gás no padrão de golfadas sofre mudanças na geometria da bolha quando esta transita de um trecho para outro. Na modelagem matemática considera-se que a bolha alongada $j+1$ muda sua geometria quando esta termina de transitar pela região do cotovelo ($x_j > Z_{cot}$), tal como mostrado na Figura 3-6. Além disso, a passagem da bolha alongada produz um acúmulo de líquido na região do cotovelo, acúmulo este que será apresentado mais detalhadamente na seção seguinte.

Na Figura 3-6 é mostrada a passagem da bolha alongada $j+1$ de um trecho horizontal para o trecho inclinado ascendente. Nesta figura, $t=t_{N-1}$ indica o instante do tempo antes que a frente da bolha alongada $j+1$ passe pelo cotovelo ($x_j = Z_{cot}$).

No instante $t=t_N$, a frente do pistão j está encostada na região do cotovelo. Nesse instante de tempo é rodado o modelo de bolha desenvolvido por Taitel e Barnea (1990a) com a finalidade de obter os novos parâmetros da bolha alongada j . Estes novos parâmetros calculados são observados no instante $t=t_N$. Entre os parâmetros que são modificados pela mudança de direção são: velocidade de translação da bolha (U_{Tj+1}), fração de líquido no pistão (R_{LSj+1}), fração de vazio na bolha (R_{GBj+1}), comprimento da bolha alongada (L_{Bj+1}), frente da bolha (y_{j+1}) e frente do pistão (x_{j+1}).

Os parâmetros U_{Tj+1} e R_{LSj+1} são determinados a partir das correlações de Bendiksen (1984) e Andreussi (1989). Estas correlações consideram a influência da inclinação do tubo. Ambas correlações são apresentadas na equação (3.5) e no Anexo A.

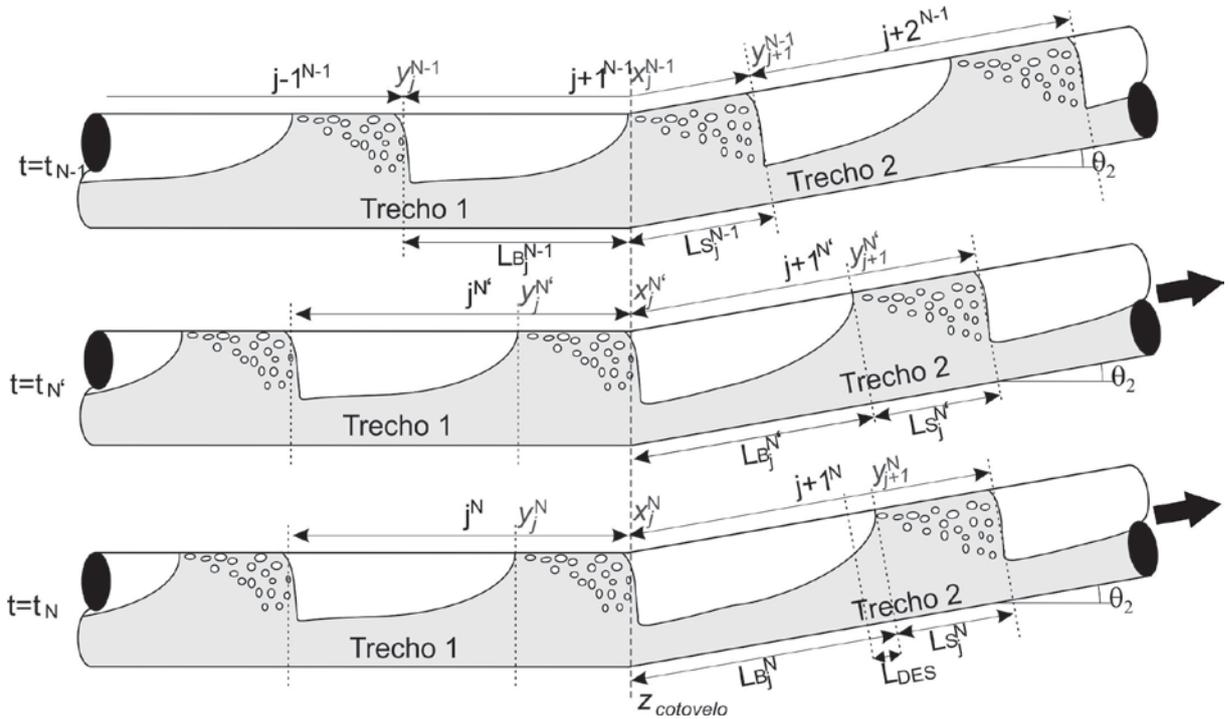


Figura 3-6-Mudança da geometria da bolha alongada de um trecho horizontal para um trecho inclinado ascendente

Os parâmetros $L_{B_{j+1}}$ e $R_{GB_{j+1}}$ da bolha alongada no tempo n são calculados utilizando o modelo de bolha, que é obtido a partir de um balanço de massa e quantidade de movimento em uma célula unitária, e que resulta na equação (3.17).

$$\frac{\partial h_{LB_{j+1}}^N}{\partial z} = \frac{\frac{\tau_L S_L}{A_L} + \frac{\tau_G S_G}{A_G} - \tau_I S_I \left(\frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) + (\rho_L - \rho_G) g \sin \theta}{(\rho_L - \rho_G) g \cos \theta - \rho_G \frac{(U_{Tj+1}^N - U_{GB_{j+1}}^N)^2}{(1 - R_{LB_{j+1}}^N)} \frac{\partial R_{LB_{j+1}}^N}{\partial h_{LB_{j+1}}^N} - \rho_L \frac{(U_{Tj+1}^N - U_{LB_{j+1}}^N)^2}{(R_{LB_{j+1}}^N)} \frac{\partial R_{LB_{j+1}}^N}{\partial h_{LB_{j+1}}^N}} \quad (3.17)$$

A equação (3.17) representa o perfil geométrico da bolha alongada, onde $\partial h_{LB}/\partial z$ é a variação da altura do filme ao longo do comprimento da bolha alongada. τ_L , τ_G e τ_I são respectivamente as tensões de cisalhamento no líquido, no gás e na interface, A_L e A_G são as áreas de líquido e de gás, S_L , S_G e S_I são os perímetros molhados do líquido, do gás e da interface e $R_{LB_{j+1}}$ é a fração de líquido. As equações de fechamento do modelo de Taitel e Barnea (1990a) são apresentadas no Anexo A.

A integração da equação (3.17) tem como resultado o perfil geométrico da bolha alongada. No entanto, sem um critério de parada o cálculo da integração prosseguiria indefinidamente. Esse critério de parada é dado pelo balanço de líquido na célula unitária:

$$j_{Lj+1}^N = U_{LSj+1}^N R_{LSj+1}^N + U_{Tj+1}^N (1 - R_{LSj+1}^N) \frac{L_{Bj+1}^N}{L_{Bj+1}^N + L_{Sj+1}^N} - \frac{R_{LS}^N}{L_{Bj+1}^N + L_{Sj+1}^N} \int_0^{L_B} R_{GBj+1}^N dz \quad (3.18)$$

onde R_{GBj+1} é a fração de vazio ao longo do comprimento da bolha.

Finalmente, a fração de vazio média é calculada através da integração da fração de vazio ao longo do comprimento da bolha alongada:

$$R_{GBj+1}^N = \frac{1}{L_B} \int_0^{L_B} R_{GB}^N dz \quad (3.19)$$

A sequência de integração numérica da equação (3.17) é apresentada na seção 4.1.4.

A modificar-se o comprimento L_{Bj+1} , a frente da bolha alongada x_{j+1} é deslocada de um espaçamento L_{DES} como é mostrado na Figura 3-6. O cálculo deste espaçamento é feito subtraindo-se o comprimento L_{Bj+1} nos instantes $t=t_N$ e $t=t_N'$:

$$L_{DES} = L_{Bj+1}^N - L_{Bj+1}^{N'} \quad (3.20)$$

Como a frente da bolha $j+1$ é deslocada, todas as frentes x_k e y_k a partir da célula unitária $j+1$ até a célula unitária n são deslocados por um espaçamento L_{DES} .

$$y_k^N = y_k^{N'} + L_{DES} \quad (3.21)$$

$$x_k^N = x_k^{N'} + L_{DES} \quad (3.22)$$

onde k varia desde a célula unitária localizada no cotovelo $j+1$ até a célula unitária n .

3.3.3 Acúmulo de líquido

O acúmulo de líquido na região do cotovelo produz-se quando a bolha alongada atravessa de um trecho para outro. Este acúmulo foi estudado anteriormente por Wood (1991), Zheng *et al.* (1994), Conte *et al.* (2011), entre outros autores. Este acúmulo de líquido é representado na Figura 3-7.

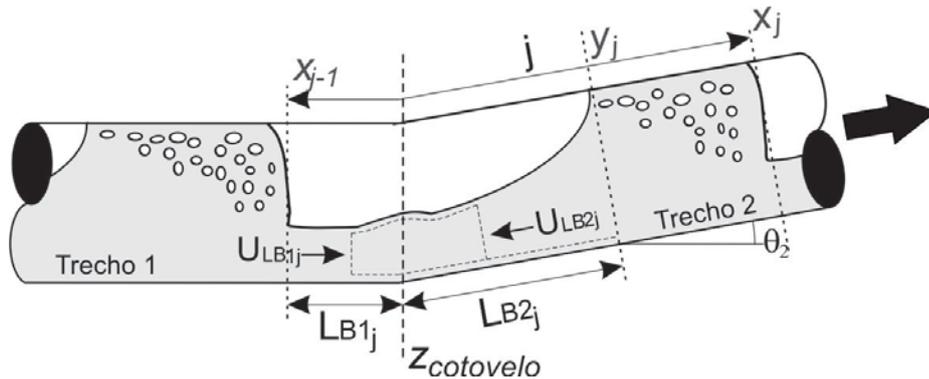


Figura 3-7-Volume de controle do acúmulo de líquido na região do cotovelo

A acumulação de líquido no cotovelo é calculada a partir da equação de conservação da massa para a fase de líquido no interior do volume de controle apresentado na Figura 3-7 e é dada por:

$$\frac{d\forall}{dt} = (U_{LBj}AR_{LSj})_1 - (U_{LBj}AR_{LSj})_2 \quad (3.23)$$

onde U_{LBj1} e U_{LBj2} são as velocidades do filme do líquido. \forall é o volume de líquido acumulado no cotovelo durante a passagem da bolha alongada e é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$\forall = L_{GER} (R_{LSj-1} - R_{LBj}) A \quad (3.24)$$

sendo que L_{GEN} é o comprimento de pistão gerado pelo acúmulo de líquido e A é a área da seção transversal do tubo. Rearranjando a equação (3.24) em termos do comprimento do pistão gerado, obtém-se:

$$L_{GER} = \frac{\nabla}{(R_{LSj-1} - R_{LBj})A} \quad (3.25)$$

A equação (3.25) representa um pistão hipotético gerado pelo líquido acumulado no filme. Quando o líquido acumulado no cotovelo é suficiente para bloquear a passagem do gás, um novo pistão é gerado no cotovelo e a bolha alongada é dividida em duas; caso contrário o líquido acumulado será capturado pelo pistão de líquido precedente ($j-1$) incorporando esse líquido acumulado quando atravessar o cotovelo. A divisão da bolha alongada é mostrada na Figura 3-8 e o incremento do pistão de líquido precedente ($j-1$) é apresentado na Figura 3-9.

Uma forma de prever a divisão da bolha alongada ou incremento do pistão precedente ($j-1$) é usando o modelo desenvolvido por Taitel e Dukler (1976) para a transição de escoamento estratificado em golfadas. Os autores desenvolveram o modelo para esta transição utilizando o critério de instabilidade de Kelvin-Helmholtz (K-H) para um duto circular, produzindo a equação (3.26). Se essa equação for verdadeira produz-se a divisão da bolha alongada; caso contrário produz-se o incremento do pistão precedente ($j-1$).

$$v_G \geq C_2 \left(\frac{(\rho_L - \rho_G) g \cos(\theta) A_G}{\rho_G S_1} \right)^{0.5} \quad (3.26)$$

$$\text{sendo que } C_2 = 1 - \frac{h_{LB}}{D} \quad (3.27)$$

onde v_G é a velocidade crítica de gás na transição, S_1 é o perímetro molhado da interface, A_G é a área transversal ocupada pelo gás e h_{LB} é a altura de filme. O cálculo de S_1 e A_G é mostrado no Anexo A.

A geração do novo pistão obedece ao critério de instabilidade de Kelvin-Helmholtz (K-H), como é mostrado na Figura 3-8. Esta instabilidade ocorre devido à perturbação do movimento entre as camadas de líquido e gás na região da bolha alongada. Os mecanismos que provocam esta perturbação são, por um lado, as forças gravitacionais e por outro as tensões superficiais que tendem a estabilizar o escoamento. De acordo com o princípio de Bernoulli, a pressão diminui nesse ponto,

o que tende a fazer com que onda da fase líquida cresça ainda mais, até que chegue um instante do tempo onde a bolha alongada se quebre.

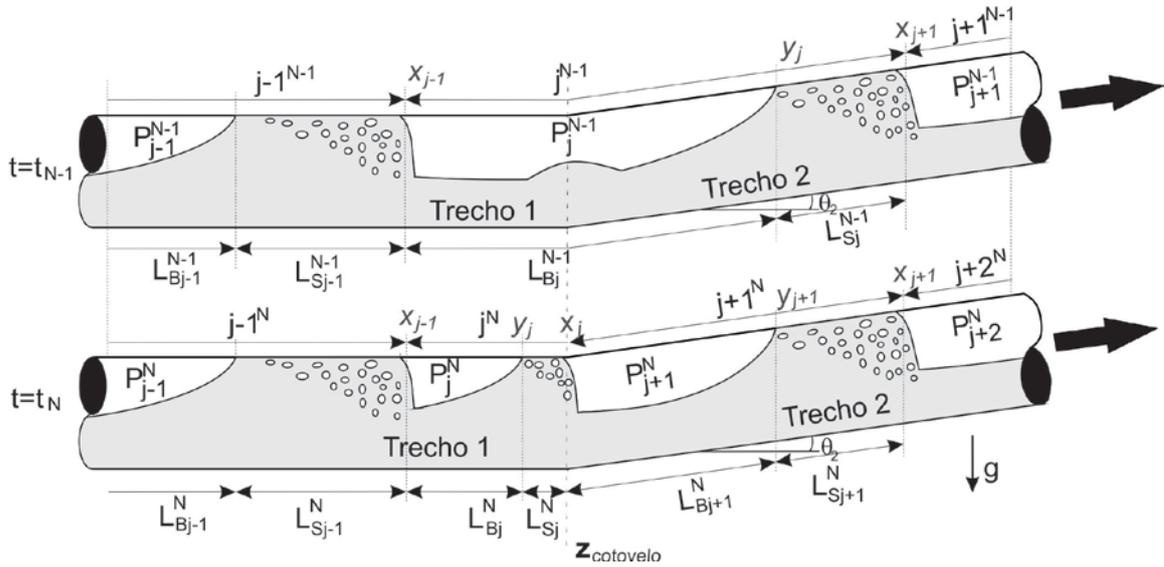


Figura 3-8- Divisão da bolha alongada

A Figura 3-8 apresenta a divisão da bolha alongada. O sobrescrito N indica o instante em que a bolha alongada se quebra e o sobrescrito $N-1$ indica o instante do tempo anterior à quebra da bolha. No instante que as bolhas se dividem os comprimentos das novas bolhas são calculados em função dos parâmetros das bolhas antigas. A soma do comprimento do novo pistão j e dos novos comprimentos das bolhas geradas j e $j+1$ é igual ao comprimento da bolha no tempo antigo j .

$$L_{Bj}^N + L_{Sj}^N + L_{Bj+1}^N = L_{Bj}^{N-1} \quad (3.28)$$

Além disso, o comprimento do novo pistão j é igual ao do pistão gerado.

$$L_{Sj}^N = L_{GER} \quad (3.29)$$

Considerando que a bolha alongada se divide em duas bolhas alongadas j do mesmo comprimento, tem-se:

$$L_{Bj}^N = L_{Bj+1}^N = \frac{L_{Bj}^{N-1} - L_{Sj}^N}{2} \quad (3.30)$$

O comprimento do pistão $j+1$ no tempo atual é igual ao comprimento do pistão j no tempo anterior:

$$L_{Sj}^{N-1} = L_{Sj+1}^N \quad (3.31)$$

Também a fração de vazio do pistão $j+1$ no tempo novo, R_{LSj+1}^N , é calculada com a relação de Andreussi (1989) que é apresentada posteriormente no Anexo A. Considerando-se que as frações de líquido dos pistões j e $j+1$ não variam, tem-se:

$$R_{LSj+1}^N = R_{LSj}^N \quad (3.32)$$

A fração de vazio da nova bolha alongada $j+1$ é igual à fração do vazio da bolha alongada j no tempo anterior:

$$R_{GBj+1}^N = R_{GBj+1}^{N-1} \quad (3.33)$$

As pressões nas regiões das bolhas j e $j+1$ são iguais à pressão na região da bolha no tempo anterior à quebra da bolha j :

$$P_{GBj+1}^N = P_{GBj}^N = P_{GBj}^{N-1} \quad (3.34)$$

Por outro lado o incremento do pistão é ilustrado na Figura 3-9, no instante do tempo $t=N-2$ a passagem da bolha alongada produz um acúmulo de líquido na região do cotovelo. No instante do tempo $t=N-1$ uma parte da bolha alongada atravessa o cotovelo aumentando o acúmulo de líquido. No instante do tempo $t=N'$ a bolha alongada termina de passar pela região alongada e o acúmulo inercial de líquido tende a incrementar o comprimento do pistão $j-1$. As novas posições da frente do pistão x , da frente da bolha y e o comprimento do pistão L_{Sj-1} são mostrados no tempo $t=N$.

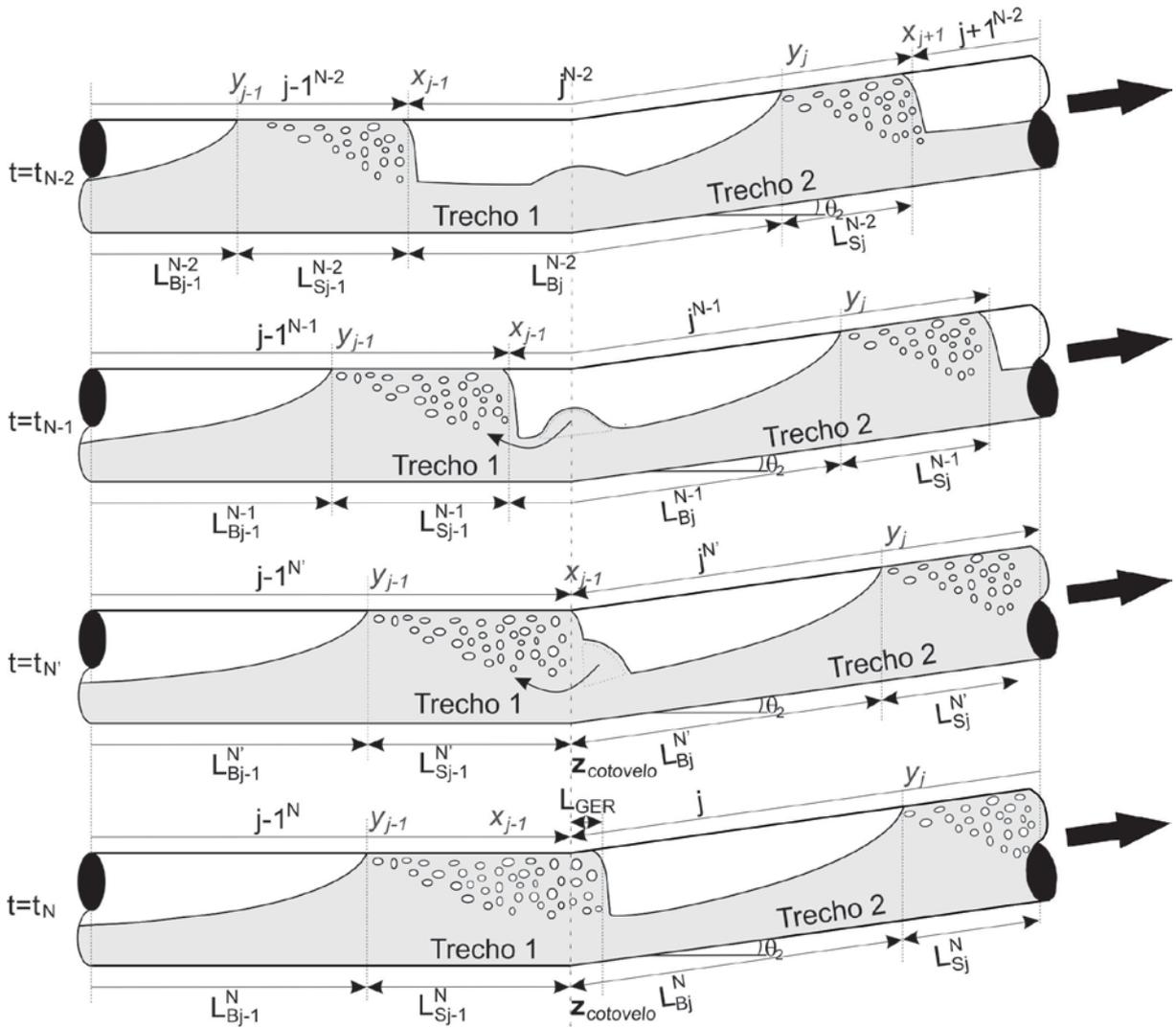


Figura 3-9 - Incremento do comprimento do pistão precedente

O incremento do pistão $j-1$ no tempo N é igual ao incremento do pistão no tempo N' somado ao pistão gerado:

$$L_{LSj-1}^N = L_{Sj}^{N'} + L_{GER} \quad (3.35)$$

Da mesma maneira que para L_{Bj-1} no tempo N é calculado a posição da frente do pistão $j-1$ no tempo N , e é dado por a expressão:

$$x_{j-1}^N = x_{j-1}^{N'} + L_{GER} \quad (3.36)$$

A fração de líquido no pistão $j-1$ no tempo N é igual à fração de líquido no instante de tempo anterior.

$$R_{LSj-1}^N = R_{LSj-1}^{N-1} \quad (3.37)$$

O incremento do comprimento do pistão j ocasiona que todas as frentes das bolhas alongadas e do pistão de líquido têm que ser deslocadas para frente a partir da célula unitária j até a célula unitária n , este deslocamento é mostrado nas equações (3.38) e (3.39).

$$y_{k-1}^N = y_{k-1}^{N'} + L_{GER} \quad (3.38)$$

$$x_k^N = x_k^{N'} + L_{GER} \quad (3.39)$$

onde k varia desde a célula unitária localizada j até a célula unitária n .

3.4 Comentários finais

No presente capítulo foram apresentadas as equações de conservação da massa e quantidade de movimento que governam o escoamento em golfadas e uma análise do comportamento do escoamento quando se produz uma leve mudança de direção. As equações resultantes desta análise foram apresentadas neste capítulo. A modelagem numérica é tratada no próximo capítulo.

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Este capítulo apresenta a modelagem numérica do problema de escoamento em golfadas com leve mudança de direção. Primeiramente, discretizam-se as equações governantes apresentadas no capítulo anterior, com a finalidade de se obter um sistema de equações lineares em função da velocidade de líquido no pistão e da pressão na bolha. Posteriormente, as equações auxiliares são discretizadas e, na etapa seguinte, o algoritmo de solução e sua implementação computacional são apresentados. A implementação é feita utilizando-se o código desenvolvido em linguagem Fortran por Rodrigues (2009).

4.1 Discretização

As equações apresentadas no capítulo anterior são discretizadas utilizando-se o método de diferenças finitas:

$$\int_t^{t+\Delta t} \varphi dt = (\alpha \varphi^N + (1-\alpha) \varphi^0) \Delta t \quad (4.1)$$

Onde φ é uma variável discretizada em forma geral, podendo ser a velocidade de líquido no pistão U_{LS} ou fator de pressão H_{GB} que será definido na próxima seção. Os sobrescritos N e 0 indicam a função φ avaliada no tempo atual e antigo respectivamente. α é o fator de relaxação que é igual a um para o esquema totalmente implícito, zero para o esquema explícito e 0,5 para o esquema de Crank-Nicholson.

4.1.1 Discretização das equações do sistema pressão-velocidade

No capítulo anterior foram mostradas as equações de conservação da massa e quantidade de movimento para uma célula unitária. Essas equações estão em função da velocidade do pistão e da pressão na bolha. O termo de pressão dessas equações tem uma ordem de grandeza muito superior à velocidade do pistão, o que

ocasiona instabilidade numérica quando se resolve o sistema de equações. Por este motivo, define-se o fator de pressão H , que tem uma ordem de grandeza menor que da pressão da bolha P , o qual é necessário para garantir a estabilidade numérica.

$$H_{GBj} = \frac{P_{GBj}}{\rho_L} \quad (4.2)$$

Além disso, são definidas algumas expressões com a finalidade de simplificar as equações:

$$\Delta U_{DSj} = \frac{(1 - R_{LSj})}{R_{LSj}} U_{DSj} - \frac{(1 - R_{LSj-1})}{R_{LSj-1}} U_{DSj-1} \quad (4.3)$$

$$\Delta P_{Sj+1} = \frac{2C_{LBj} S_{LBj}}{D} L_{Bj+1} U_{LBj+1}^2 \quad (4.4)$$

$$\Delta I_j = \left[\frac{L_{Sj}}{2} \left(\frac{dx_j}{dt} + \frac{dy_j}{dt} \right) - L_{Sj} U_{LSj} \right] \frac{dR_{LSj}}{dt} \rho_L \quad (4.5)$$

A equação (4.3) representa o termo devido à velocidade das bolhas dispersas, enquanto a equação (4.4) representa a queda da pressão devido ao atrito entre a parede do tubo e o filme de líquido. A equação (4.5) representa a variação da quantidade de movimento no interior do pistão devido à variação da fração do líquido no pistão.

No capítulo anterior foi definida a queda da pressão quando ocorre a mudança de direção. Por conveniência, esta equação é apresentada novamente abaixo:

$$\Delta P_{Gj} = \rho_L g R_{LSj} (L_{S1j} \text{sen}(\theta_1) + L_{S2j} \text{sen}(\theta_2)) + \rho_L g R_{LBj+1} (L_{B1j+1} \text{sen}(\theta_1) + L_{B2j+1} \text{sen}(\theta_2)) \quad (4.6)$$

As equações de conservação da massa (3.1) e quantidade de movimento (3.2) são reescritas de forma simplificada em função do fator de pressão e das equações (4.2)-(4.6).

$$U_{LSj} - U_{LSj-1} = \frac{dH_{GBj}}{dt} \left[L_{Bj} \frac{(1-R_{LBj})}{H_{GBj}} + \frac{L_{Sj}}{2} \frac{(1-R_{LSj})}{H_{GBj}} + \frac{L_{Sj-1}}{2} \frac{(1-R_{LSj-1})}{H_{GBj-1}} \right] + \Delta U_{DSj} \quad (4.7)$$

$$H_{GBj} - H_{GBj+1} = L_{Sj} R_{LSj} \frac{dU_{LSj}}{dt} + 2C_{LSj} \frac{L_{Sj}}{D} U_{LSj}^2 + \frac{1}{\rho_L} (\Delta P_{Gj} + \Delta I_J + \Delta P_{Sj+1}) \quad (4.8)$$

Aplicando-se o esquema de diferenças finitas apresentado na equação (4.1) nas equações (4.7) e (4.8), obtém-se:

$$\begin{aligned} & \left[\alpha U_{LSj-1}^N + (1-\alpha) U_{LSj-1}^0 \right] - \left[\alpha U_{LSj}^N + (1-\alpha) U_{LSj}^0 \right] - = \Delta U_{DSj} + \\ & + \left(\frac{H_{GBj}^N - H_{GBj}^0}{\Delta t} \right) \left[L_{Bj} \frac{(1-R_{LBj})}{H_{GBj}} + \frac{L_{Sj}}{2} \frac{(1-R_{LSj})}{H_{GBj}} + \frac{L_{Sj-1}}{2} \frac{(1-R_{LSj-1})}{H_{GBj-1}} \right] \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} & \left[\alpha H_{GBj}^N + (1-\alpha) H_{GBj}^0 \right] - \left[\alpha H_{GBj+1}^N + (1-\alpha) H_{GBj+1}^0 \right] = L_{Sj} R_{LSj} \frac{U_{LSj}^N - U_{LSj}^0}{dt} + \\ & + 2C_{LSj} \frac{L_{Sj}}{D} U_{LSj}^N U_{LSj}^0 + \frac{1}{\rho_L} (\Delta P_{Gj} + \Delta I_J + \Delta P_{Sj+1}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Isolando-se os termos do tempo novo no lado direito das equações (4.9) e (4.10), obtém-se:

$$\begin{aligned} & -U_{LSj-1}^N + \frac{H_{GBj}^N}{\alpha \Delta t} \left(\frac{L_{Bj} (1-R_{LBj})}{H_{GBj}^0} + L_{Sj} \frac{(1-R_{LSj})}{2H_{GBj}^0} + L_{Sj-1} \frac{(1-R_{LSj-1})}{2H_{GBj-1}^0} \right) + U_{LSj}^N = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) \times \\ & \times (U_{LSj-1}^0 - U_{LSj}^0) + \frac{1}{\alpha \Delta t} \left(L_{Bj} (1-R_{LBj}) + L_{Sj} \frac{(1-R_{LSj})}{2} + L_{Sj-1} \frac{(1-R_{LSj-1}) H_{GBj}^0}{2H_{GBj-1}^0} \right) - \frac{\Delta U_{DSj}}{\alpha} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} & -H_{GBj}^N + \left(\frac{R_{LSj} L_{Sj}}{\alpha \Delta t} + 2C_{LSj} \frac{L_{Sj}}{D} U_{LSj}^0 \right) U_{LSj}^N + H_{GBj+1}^N = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (H_{GBj}^0 - H_{GBj+1}^0) + \\ & + \frac{R_{LSj} L_{Sj} U_{LSj}^0}{\alpha \Delta t} - \frac{1}{\alpha \Delta t} (\Delta P_{Sj+1} + \Delta P_{Gj} + \Delta I_J) \end{aligned} \quad (4.12)$$

As equações (4.11) e (4.12) são, respectivamente, equações discretizadas de conservação da massa e quantidade de movimento para uma célula genérica j .

Essas equações devem ser aplicadas a todas as células no interior da tubulação desde 1 até n em um sistema de equações lineares $2n$. Para a primeira célula obtém-se:

$$\begin{aligned}
 & j = 1 \\
 & \left\{ \begin{aligned}
 & \frac{H_{GB1}^N}{\alpha \Delta t} \left(\frac{L_{B1}(1-R_{LB1})}{H_{GB1}^0} + L_{S1} \frac{(1-R_{LS1})}{2H_{GB1}^0} + L_{S0} \frac{(1-R_{LS0})}{2H_{GB0}^0} \right) + U_{LS1}^N = U_{LS0}^N + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) \times \\
 & \times \left(U_{LS0}^0 - U_{LS1}^0 \right) + \frac{1}{\alpha \Delta t} \left(L_{B1}(1-R_{LB1}) + L_{S1} \frac{(1-R_{LS1})}{2} + L_{S0} \frac{(1-R_{LS0})H_{GB1}^0}{2H_{GB0}^0} \right) - \frac{\Delta U_{DS1}}{\alpha} \\
 & - H_{GB1}^N + \left(\frac{R_{LS1}L_{S1}}{\alpha \Delta t} + 2C_{LS1} \frac{L_{Sj}}{D} U_{LS1}^0 \right) U_{LS1}^N + H_{GB2}^N = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (H_{GB1}^0 - H_{GB2}^0) + \\
 & + \frac{R_{LS1}L_{S1}U_{LS1}^0}{\alpha \Delta t} - \frac{1}{\alpha \Delta t} (\Delta P_{S2} + \Delta P_{G1} + \Delta I_1)
 \end{aligned} \right. \quad (4.13)
 \end{aligned}$$

Observe-se na equação (4.13) que a velocidade do líquido no pistão 0, U_{LS0}^N , aparece no lado direito da equação por ser uma condição de contorno do modelo. Da mesma maneira, para a célula 2, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 & j = 2 \\
 & \left\{ \begin{aligned}
 & -U_{LS1}^N + \frac{H_{GB2}^N}{\alpha \Delta t} \left(\frac{L_{B2}(1-R_{LB2})}{H_{GB2}^0} + L_{S2} \frac{(1-R_{LS2})}{2H_{GB2}^0} + L_{S1} \frac{(1-R_{LS1})}{2H_{GB1}^0} \right) + U_{LS2}^N = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) \times \\
 & \times \left(U_{LS1}^0 - U_{LS2}^0 \right) + \frac{1}{\alpha \Delta t} \left(L_{B2}(1-R_{LB2}) + L_{S2} \frac{(1-R_{LS2})}{2} + L_{S1} \frac{(1-R_{LS1})H_{GB2}^0}{2H_{GB1}^0} \right) - \frac{\Delta U_{DS2}}{\alpha} \\
 & - H_{GB2}^N + \left(\frac{R_{LS2}L_{S2}}{\alpha \Delta t} + 2C_{LS2} \frac{L_{S2}}{D} U_{LS2}^0 \right) U_{LS2}^N + H_{GB3}^N = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (H_{GB2}^0 - H_{GB3}^0) + \\
 & + \frac{R_{LS2}L_{S2}U_{LS2}^0}{\alpha \Delta t} - \frac{1}{\alpha \Delta t} (\Delta P_{S3} + \Delta P_{G2} + \Delta I_2)
 \end{aligned} \right. \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

E assim por diante até a última célula n , que assume a forma:

$$\begin{aligned}
 & j = n \\
 & \left\{ \begin{aligned}
 & -U_{LSj-1}^N + \frac{H_{GBj}^N}{\alpha\Delta t} \left(\frac{L_{Bj}(1-R_{LBj})}{H_{GBj}^0} + L_{Sj} \frac{(1-R_{LSj})}{2H_{GBj}^0} + L_{Sj-1} \frac{(1-R_{LSj-1})}{2H_{GBj-1}^0} \right) + U_{LSj}^N = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) \times \\
 & \times \left(U_{LSj-1}^0 - U_{LSj}^0 \right) + \frac{1}{\alpha\Delta t} \left(L_{Bj}(1-R_{LBj}) + L_{Sj} \frac{(1-R_{LSj})}{2} + L_{Sj-1} \frac{(1-R_{LSj-1})H_{GBj}^0}{2H_{GBj-1}^0} \right) - \frac{\Delta U_{DSj}}{\alpha} \\
 & -H_{GBn}^N + \left(\frac{R_{LSn}L_{Sn}}{\alpha\Delta t} + 2C_{LSn} \frac{L_{Sn}}{D} U_{LSn}^0 \right) U_{LSn}^N + H_{GBn+1}^N = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (H_{GBn}^0 - H_{GBn+1}^0) + \\
 & + \frac{R_{LSn}L_{Sn}U_{LSn}^0}{\alpha\Delta t} - \frac{1}{\alpha\Delta t} (\Delta P_{Sn+1} + \Delta P_{Gn} + \Delta I_n)
 \end{aligned} \right. \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

Na equação (4.15), o fator de pressão H_{GBn+1}^N na saída é uma condição de contorno. Com as equações (4.13)-(4.15) obtidas pode-se construir um sistema de equações da seguinte forma:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B} \quad (4.16)$$

onde \mathbf{A} é a matriz de coeficientes, \mathbf{B} é o vetor de termos fonte e \mathbf{X} é o vetor das incógnitas, que são escritos como:

A matriz \mathbf{A} , mostrada na equação (4.17), é uma matriz tridiagonal, ou seja, possui coeficientes não-nulos na diagonal principal e nas duas diagonais secundárias e adjacentes. O sistema assim formado será resolvido utilizando-se o método TDMA (*Tridiagonal Matrix Algorithm*). Este método é uma forma simplificada do método de eliminação de Gauss para resolver o sistema de equações tridiagonais. O sistema apresentado pela equação (4.17) é resolvido para cada passo de tempo e é calculado no tempo atual das variáveis U_{LS}^N e P_{GB}^N .

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha\Delta t} \left(\frac{L_{B1}(1-R_{LB1})}{H_{GB1}^0} + L_{S1} \frac{(1-R_{LS1})}{2H_{GB1}^0} + L_{S0} \frac{(1-R_{LS0})}{2H_{GB0}^0} \right) & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -1 & \left(\frac{R_{LS1}L_{S1}}{\alpha\Delta t} + 2C_{LS1} \frac{L_{S1}}{D} U_{LS1}^0 \right) & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & \left(\frac{L_{Bn}(1-R_{LBn})}{H_{GBn}^0} + L_{Sn} \frac{(1-R_{LSn})}{2H_{GBn}^0} + L_{Sn-1} \frac{(1-R_{LSn-1})}{2H_{GBn-1}^0} \right) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & \left(\frac{R_{LSn}L_{Sn}}{\alpha\Delta t} + 2C_{LSn} \frac{L_{Sn}}{D} U_{LSn}^0 \right) \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} H_{GB1}^N \\ U_{LS1}^N \\ \vdots \\ H_{GBn}^N \\ U_{GBn}^N \end{bmatrix} ; B = \begin{bmatrix} U_{LS0}^N + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (U_{LS0}^0 - U_{LS}^0) + \frac{1}{\alpha\Delta t} \left(L_{B1}(1-R_{LB1}) + L_{S1} \frac{(1-R_{LS1})}{2} + L_{S0} \frac{(1-R_{LS0})H_{GB1}^0}{2H_{GB0}^0} \right) - \frac{\Delta U_{DS1}}{\alpha} \\ \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (H_{GB1}^0 - H_{GB2}^0) + \frac{R_{LS1}L_{S1}U_{LS1}^0}{\alpha\Delta t} - \frac{1}{\alpha\Delta t} (\Delta P_{S2} + \Delta P_{G1} + \Delta I_1) \\ \vdots \\ \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (U_{LSn-1}^0 - U_{LSn}^0) + \frac{1}{\alpha\Delta t} \left(L_{Bn}(1-R_{LBn}) + L_{Sn} \frac{(1-R_{LSn})}{2} + L_{Sn-1} \frac{(1-R_{LSn-1})H_{GBjn}^0}{2H_{GBjn-1}^0} \right) - \frac{\Delta U_{DSjn}}{\alpha} \\ \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (H_{GBn}^0 - H_{GBn+1}^0) + \frac{R_{LSn}L_{Sn}U_{GBn}^0}{\alpha\Delta t} - \frac{1}{\alpha\Delta t} (\Delta P_{Sn+1} + \Delta P_{Gn} + \Delta I_n) - H_{GBn+1}^N \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

4.1.2 Discretização das equações auxiliares

As equações auxiliares não estão acopladas ao sistema pressão-velocidade e são resolvidas após o cálculo de U_{LS}^N e P_{GB}^N . Essas equações foram apresentadas no capítulo anterior e por conveniência são reescritas a seguir:

$$\frac{dy_j}{dt} = U_{Tj} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_{j-1}}{dt} = & \frac{(R_{GBj} - R_{GSj})}{R_{GBj} - R_{GSj-1}} \frac{dy_j}{dt} - \frac{L_{Sj}}{2} \frac{dR_{LSj}}{dt} - \frac{L_{Sj-1}}{2} \frac{dR_{LSj-1}}{dt} + \\ & \frac{dP_{GBj}}{dt} \left(\frac{L_{Bj} R_{GBj}}{P_{GBj}} + \frac{L_{Sj} R_{GSj}}{2P_{GBj}} + \frac{L_{Sj-1} R_{GSj-1}}{2P_{GBj-1}} \right) + R_{GSj} U_{GSj} - R_{GSj-1} U_{GSj-1} \\ & + \frac{}{R_{GBj} - R_{GBj-1}} \end{aligned} \quad (4.19)$$

As equações (4.18) e (4.19) são discretizadas pelo método de diferenças finitas. Para frente da bolha j , tem-se:

$$y_j^N = y_j^0 + U_{Tj}^N \Delta t \quad (4.20)$$

Para o caso do deslocamento da velocidade traseira da bolha, a discretização é dada por:

$$\begin{aligned} x_{j-1}^N = x_{j-1}^0 + & \frac{(R_{GBj}^0 - R_{GSj}^0) U_{Tj}^N \Delta t - \frac{L_{Sj}^0}{2} (R_{LSj}^N - R_{LSj}^0) - \frac{L_{Sj-1}^0}{2} (R_{LSj-1}^N - R_{LSj-1}^0)}{R_{GBj}^0 - R_{GBj-1}^0} + \\ & \frac{(P_{GBj}^N - P_{GBj}^0) \left(\frac{L_{Bj}^0 R_{GBj}^0}{P_{GBj}^0} + \frac{L_{Sj}^0 R_{GSj}^0}{2P_{GBj}^0} + \frac{L_{Sj-1}^0 R_{GSj-1}^0}{2P_{GBj-1}^0} \right) + \Delta t (R_{GSj}^0 U_{GSj}^0 - R_{GSj-1}^0 U_{GSj-1}^0)}{R_{GBj}^0 - R_{GBj-1}^0} \end{aligned} \quad (4.21)$$

4.1.3 Passagem da célula unitária pela região do cotovelo

Na modelagem matemática a queda de pressão gravitacional tem influência no vetor de termos fontes B apresentado na equação (4.17). Sendo assim, é necessário o cálculo dos comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido quando a célula unitária transita de um trecho horizontal para um trecho inclinado ascendente.

A Figura 4-1 e a Figura 4-2 mostram, respectivamente, a passagem da bolha alongada e pistão de líquido pela região do cotovelo.

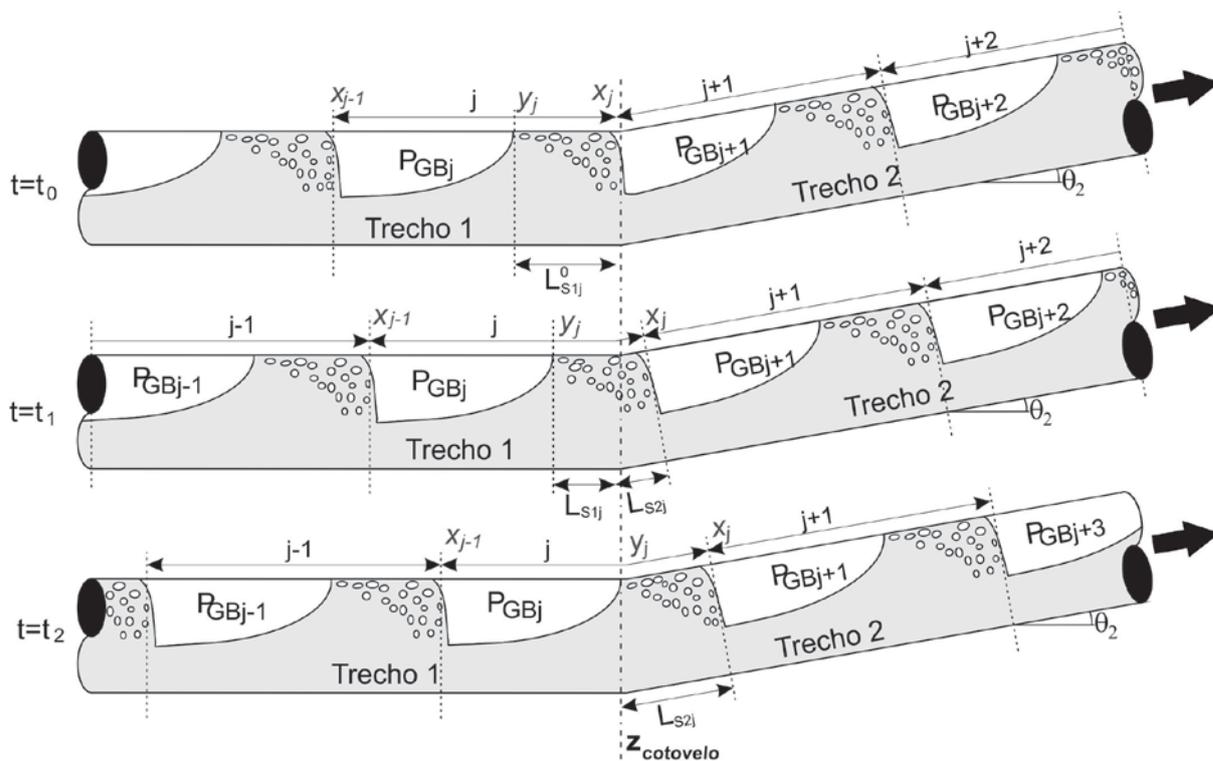


Figura 4-1- Passagem do pistão de líquido pela região do cotovelo

Para o cálculo das frações dos pistões de líquido da célula unitária j , o comprimento do pistão é dividido em duas partes: L_{S1j} e L_{S2j} como mostrado na Figura 4-1, onde L_{S1j} e L_{S2j} são os comprimentos do pistão no primeiro e no segundo trecho, respectivamente. No instante $t = t_0$, a frente do pistão (x_j) atinge o final do primeiro trecho ($z_{Cotovelo}$), a fração L_{S1j} é igual ao comprimento total do pistão ($L_{S1j} = L_{Sj}^0$) e L_{S2j} é nulo.

No instante $t = t_1$, a frente do pistão (x_j) já passou pelo final do primeiro trecho e a traseira do pistão (y_j), ainda não passou pelo final do primeiro trecho. L_{S2j} é

calculado pela diferença entre a frente do pistão e o final do primeiro trecho ($L_{S2} = x_j - Z_{cotovelo}$) e L_{S1j} é calculado tomando a diferença entre o comprimento total do pistão no tempo anterior e a porção do comprimento do pistão que está no segundo trecho ($L_{S1j} = L_{Sj}^0 - L_{S2j}$).

No instante $t = t_3$, a frente da bolha já alcançou ou ultrapassou o final do primeiro trecho, o comprimento total do pistão já está ao segundo trecho, L_{S2j} é equivalente ao comprimento total do pistão $L_{Sj} = L_{S2j}$ e L_{S1j} é nulo.

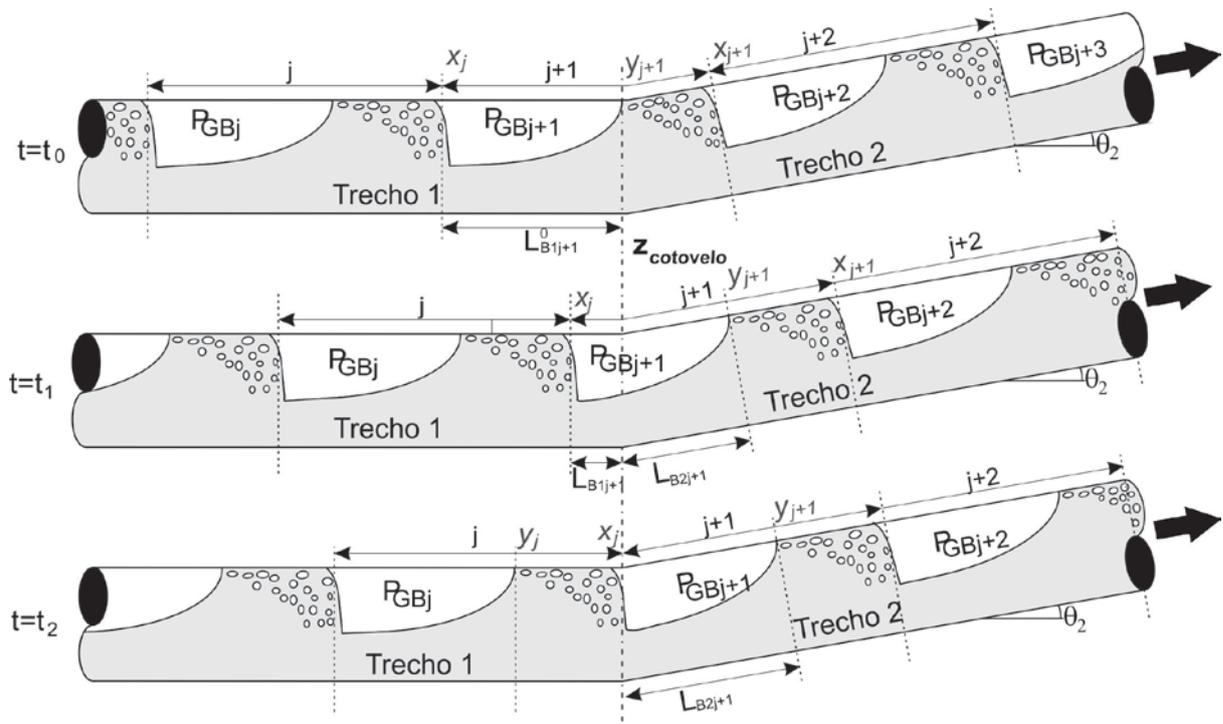


Figura 4-2- Passagem da bolha alongada pela região do cotovelo

O cálculo das frações da bolha alongada da célula unitária $j+1$ é feito de maneira semelhante ao realizado para o pistão de líquido. Da mesma maneira, o comprimento do pistão é dividido em duas partes, L_{B1j+1} e L_{B2j+1} , conforme apresentado na Figura 4-2, onde L_{B1j+1} e L_{B2j+1} são os comprimentos do pistão no primeiro e no segundo trecho.

No instante $t = t_0$, a frente da bolha y_{j+1} atinge o final do primeiro trecho ($Z_{cotovelo}$), L_{B1j+1} é igual ao comprimento total do pistão ($L_{B1j+1} = L_{Bj+1}^0$), e L_{B2j+1} é nulo.

No instante posterior de tempo, $t = t_1$, a frente da bolha (y_{j+1}) já passou pelo final do primeiro trecho e a frente do pistão (y_j), ainda não passou pelo final do primeiro trecho, portanto L_{B2j+1} é calculado pela diferença entre a frente da bolha e o final do primeiro trecho ($L_{B1j+1} = y_{j+1} - Z_{\text{cotovelo}}$), e L_{B1j+1} é calculado a partir da diferença entre o comprimento total da bolha no tempo anterior e a fração do comprimento do pistão que está no segundo trecho ($L_{B1j+1} = L_{Bj+1}^0 - L_{B2j+1}$).

No instante $t = t_3$, a frente da bolha alcançou o final do primeiro trecho, o comprimento total do pistão já está no segundo trecho, L_{B2j+1} é igual ao comprimento total do pistão $L_{B2j} = L_{Bj+1}$ e L_{B1j+1} é nulo.

Na Tabela 4-1 é apresentado o resumo do cálculo das frações dos comprimentos do pistão de líquido e da bolha alongada durante a passagem de um trecho horizontal para o trecho inclinado ascendente.

Tabela 4-1- Passagem da bolha alongada e pistão de líquido pela região do cotovelo

Comprimento	Trecho	Pistão atravessando a região do cotovelo	Bolha atravessando a região do cotovelo
		$y_j < Z_{\text{cotovelo}} \leq x_j$	$x_j < Z_{\text{cotovelo}} \leq y_{j+1}$
L_{Sj}	1	$L_{Sj}^0 - L_{S2j}$	L_{Sj}^0
	2	$x_j - Z_{\text{cotovelo}}$	0
L_{Bj+1}	1	0	$L_{Bj+1}^0 - L_{B2j+1}$
	2	L_{Bj+1}^0	$y_{j+1} - Z_{\text{cotovelo}}$

4.1.4 Modelagem numérica do modelo de Bolha

Na seção 3.3.2 foram mostrados o modelo de bolha desenvolvido por Taitel e Barnea (1990). As equações deste modelo são usadas para se calcular a altura do filme em função da distância a partir do nariz da bolha. Para a implementação numérica do modelo de bolha foi utilizado o modelo desenvolvido por Zwanziger (2007). A sequência de integração numérica da equação (3.17) é apresentada na Figura 4-3. A fim de resumir a metodologia apresentada no trabalho de Zwanziger

(2007), apresenta-se um algoritmo para o cálculo do comprimento e da fração de vazio da bolha.

- a) Assumir um valor de h_{LB} inicial $h_{LB}(z = 0) = 0,99D$.
- b) Calcular todos os parâmetros necessários para o cálculo do lado direito da equação (3.17) utilizando-se as equações apresentadas no Anexo A. Calcular a derivada de dh_{LB}/dz .
- c) Se $dh_{LB}/dz < 0$, assume-se outro valor da altura do filme inicial, $h_{LB}(z = 0) = 0,95D - \Delta h_{LB}$, com $\Delta h_{LB} = 0,0001D$, e repetem-se os passos a) b) e c).
- c). Caso contrário, calcula-se a nova posição de z , $\Delta z = \Delta h_{LB} / (dh_{LB}/dz)$, sendo $\Delta z = z_{n+1} - z_n$.
- d) Se $\Delta h_{LB} / (dh_{LB}/dz) \leq \Delta z_{max}$ então considera-se o incremento da altura do filme Δh_f como constante. O incremento do comprimento Δz é assumido como variável e calculado como $\Delta z = \Delta h_{LB} / (dh_{LB}/dz)$. Caso contrário o incremento do comprimento é constante e igual ao incremento do comprimento máximo $\Delta z = \Delta z_{max}$. O incremento da altura do filme é variável e determinado pela relação $\Delta h_{LB} = \Delta z_{max} / (dh_{LB}/dz)$. Observe-se a sequência da integração na Figura 4-3.
- e) Calcular a integral de R_{GB} , \bar{R}_{GB} , com a equação (3.19). Avalia-se a equação (3.18). Se a equação for satisfeita, a posição $z = L_B$. Caso contrário, continuar integrando a equação (3.19). Repetem-se os passos a) a e).

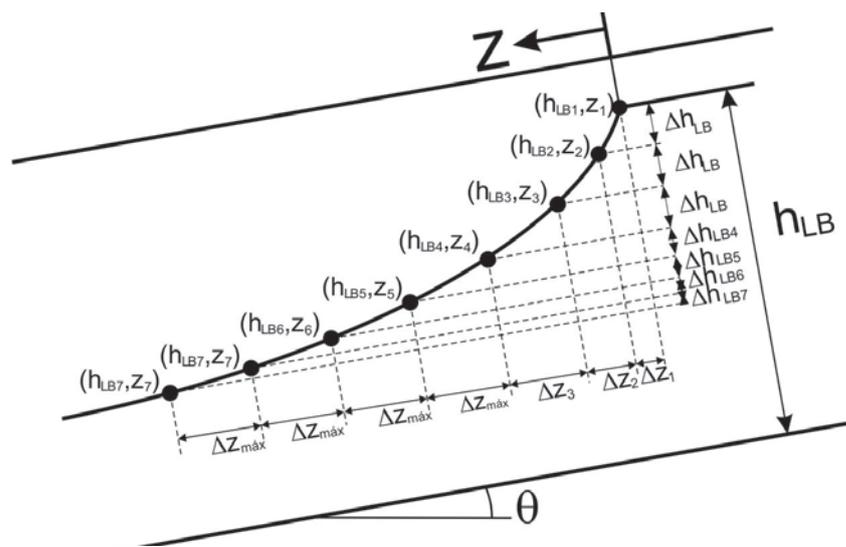


Figura 4-3- Sequência da integração do modelo de bolha desenvolvido por Zwanziger (2007)

Os fluxogramas do processo de integração do modelo da bolha são apresentados no Anexo C.

No modelo de seguimento de pistões $\overline{R_{GB}}$ torna-se simplesmente R_{GB} . Assim os valores obtidos de L_B e R_{GB} são os valores obtidos quando a célula unitária passa de um trecho para o outro.

4.2 Algoritmo de solução

Nesta seção apresenta-se o procedimento para a implementação do programa computacional. Primeiramente serão definidos os parâmetros de entrada; em seguida será explicado o início e o desenvolvimento da simulação. O diagrama de fluxo do algoritmo é mostrado na Figura 4-4.

4.2.1 Dados de entrada

Para começar a simulação, alguns parâmetros devem ser conhecidos. Entre estes estão os parâmetros hidrodinâmicos, a geometria do tubo e as propriedades dos fluidos.

- a) **Parâmetros hidrodinâmicos:** velocidades superficiais do líquido e do gás, pressão na saída da tubulação.
- b) **Configuração do duto:** diâmetro do tubo, comprimento total e ângulo de inclinação dos trechos.
- c) **Propriedades dos fluidos:** viscosidade e massa específica do gás e do líquido, tensão superficial.

4.2.2 Processo de início da simulação

A simulação se inicia com o tubo cheio de líquido, duas células unitárias são requeridas da lista de células. Estas células unitárias têm informações de velocidades superficiais (J_L e J_G), comprimentos de bolha e pistão (L_B e L_S) e frações volumétricas (R_{LS} e R_{GB}). A metodologia de cálculo da geração de lista é apresentada na seção 6.3.

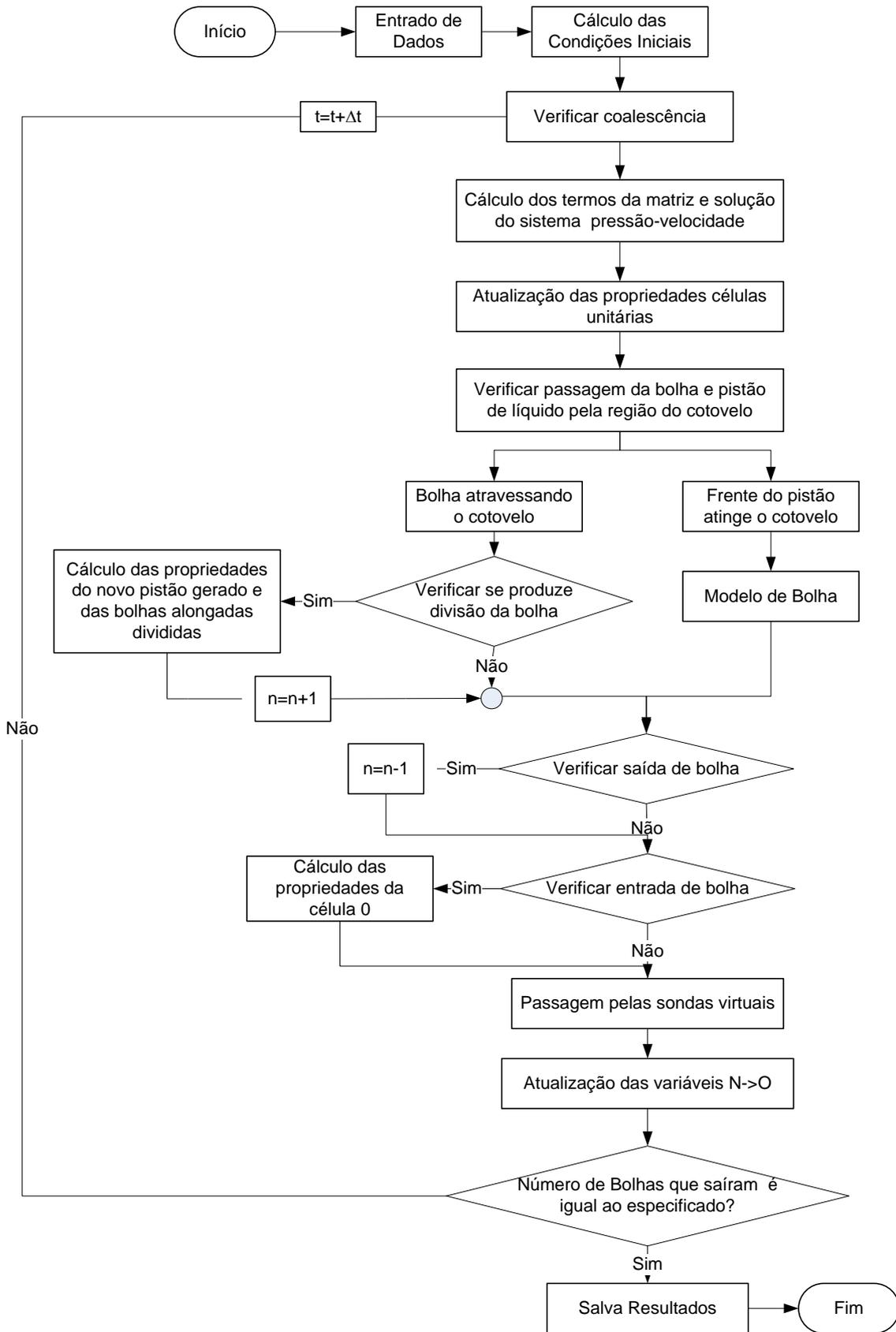


Figura 4-4 - Algoritmo de solução

O nariz da primeira célula está localizado na posição $z = 0$, enquanto o da segunda está localizado atrás dela, como apresentado na Figura 4-5. Nesse instante do tempo, tem-se um pistão de líquido de tamanho de toda a tubulação e uma bolha alongada está prestes a ingressar no domínio de cálculo.

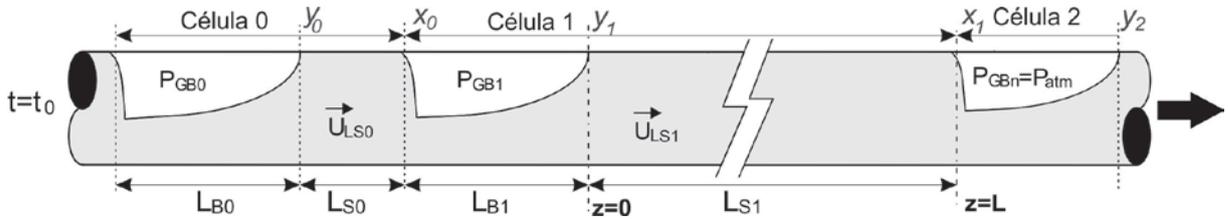


Figura 4-5- Representação do início da simulação

A Figura 4-5 representa o esquema de início da simulação, nessa tubulação existem três células unitárias denominadas Célula 0, Célula 1 e Célula 2. A Célula 2 é uma célula fictícia que não existe fisicamente e é introduzida com a finalidade de ter uma condição de contorno. A pressão desta célula é igual à pressão atmosférica ($P_{GBn} = P_{atm}$)

Os parâmetros da velocidade de líquido no pistão (U_{LS}) e a pressão da bolha (P_{GB}) devem ser conhecidos para cada instante de tempo da simulação. Estes parâmetros são calculados a partir da resolução da equação (4.17); no entanto é necessário conhecer estes parâmetros para o instante do tempo ($t=0$).

A P_{GB} e U_{LS} para o instante do tempo inicial são calculados a partir da consideração que no tempo de instante do tempo inicial o escoamento pode ser tratado como monofásico devido a que nesse instante de tempo a tubulação está preenchida somente com água como é mostrado na Figura 4-5.

Por outro lado a frente da bolha alongada da célula 1 está localizada no $z = 0$, e o comprimento do pistão na célula 1 é igual à tamanho do duto ($L_{S1}^0 = L$). A velocidade do pistão de líquido e a pressão da célula 1 é calculado a partir da seguinte equação para escoamento monofásico:

$$U_{LS1}^0 = J_1^0 - U_{DS1}^0 \left(\frac{1 - R_{LS1}^0}{R_{LS1}^0} \right) \quad (4.22)$$

$$P_{GB1}^0 = P_{atm} + 2C_{LS1}^0 \rho_L \frac{L_{S1}^0}{D} (U_{LS1}^0)^2 + \rho_L g L_{S1}^0 R_{LS1}^0 \text{sen}(\theta) \quad (4.23)$$

No caso da Célula 0, esta célula unitária está fora da tubulação, e os parâmetros da velocidade de líquido no pistão e da pressão desta célula são calculados através da seguinte relação:

$$U_{LS0}^0 = J_0^0 - U_{DS0}^0 \left(\frac{1 - R_{LS0}^0}{R_{LS0}^0} \right) \quad (4.24)$$

$$P_{GB0}^0 = P_{GB1}^0 + 2C_{LS0}^0 \rho_L \frac{L_{S0}^0}{D} (U_{LS0}^0)^2 + \rho_L g L_{S0}^0 R_{LS0}^0 \text{sen}(\theta) \quad (4.25)$$

Uma vez determinados P_{GB}^0 e U_{LS}^0 para as células 1 e 2 o sistema pressão-velocidade pode ser resolvido para os seguintes instantes de tempo.

4.2.3 Desenvolvimento da simulação

Uma vez que na tubulação haja pelo menos três bolhas no seu interior, é verificada a existência de coalescência de bolhas dentro da tubulação. Em seguida é calculado o sistema pressão-velocidade e são encontradas as variáveis novas de U_{LS}^N e P_{GB}^N . A seguir, são atualizados os parâmetros auxiliares (comprimento da bolha e do pistão e as velocidades de deslocamento das superfícies de controle, entre outras variáveis).

Após esta etapa, avalia-se a passagem da célula unitária pela região do cotovelo, e quando da passagem da bolha alongada é verificada a divisão da bolha alongada; se a frente do pistão atinge a região da mudança é executado o modelo de bolha para calcular os novos parâmetros do escoamento. Em cada instante de tempo é verificada a entrada e saída das bolhas alongadas.

Os dados das variáveis obtidos na simulação são salvos em sondas virtuais, apresentadas na seguinte seção. Em seguida é incrementado um passo do tempo Δt , os dados são atualizados e as variáveis no tempo antigo são substituídas pelas

variáveis no tempo novo. O processo é repetido até que o critério de parada da simulação seja satisfeito. Este critério é o número de bolhas saindo da tubulação. Caso o critério de parada não seja satisfeito o tempo é incrementado e inicia-se uma nova iteração. Caso contrário, a simulação termina e todos os parâmetros armazenados nas sondas virtuais são salvos em arquivos.

4.2.4 Processo de entrada das células unitárias

O processo de entrada das células unitárias é mostrado na Figura 4-6. Nessa figura U_{LS0}^N é utilizada como parâmetro de contorno do sistema pressão-velocidade. No instante do tempo $t=t_N$, a frente do nariz da bolha 1 está encostada na posição ($z=0$). Nesse instante de tempo as propriedades da célula 0 ($J_L, J_G, L_B, L_S, R_{LS}$ e R_{GB}) são introduzidas através da lista de entrada. Além disso, a U_{LS} da célula 0 é calculada a partir das equações (4.24).

No tempo $t=t_{N+1}$, a bolha 1 se deslocou e está ingressando na tubulação ($y_1 > 0$ e $x_0 < 0$), nesse instante de tempo é atualizado o valor de U_{LS} para a célula 0 já que este parâmetro é de contorno. No instante do tempo $t=t_{N+2}$, a bolha 1 já ingressou completamente na tubulação e a frente do pistão 0 está localizada no início da tubulação ($x_0=0$).

No tempo $t=t_{N+3}$, uma parte do pistão 0 está ingressando na tubulação ($x_0 > 0$ e $y_0 < 0$). Um instante de tempo depois, em $t=t_{N+4}$, todo o comprimento do pistão 0 está localizado na tubulação, e uma nova célula é obtida da lista de entrada, a qual é mostrada na Figura 4-6 com linhas pontilhadas na região da bolha alongada. Nesse instante de tempo as células são renumeradas, a célula 0 passa ser célula 1, a célula 1 passa a ser célula 2, e assim sucessivamente até preencher todas as células que estão dentro da tubulação. A nova célula requerida é chamada célula 0 e os parâmetros desta nova célula são introduzidas a partir da lista de entrada.

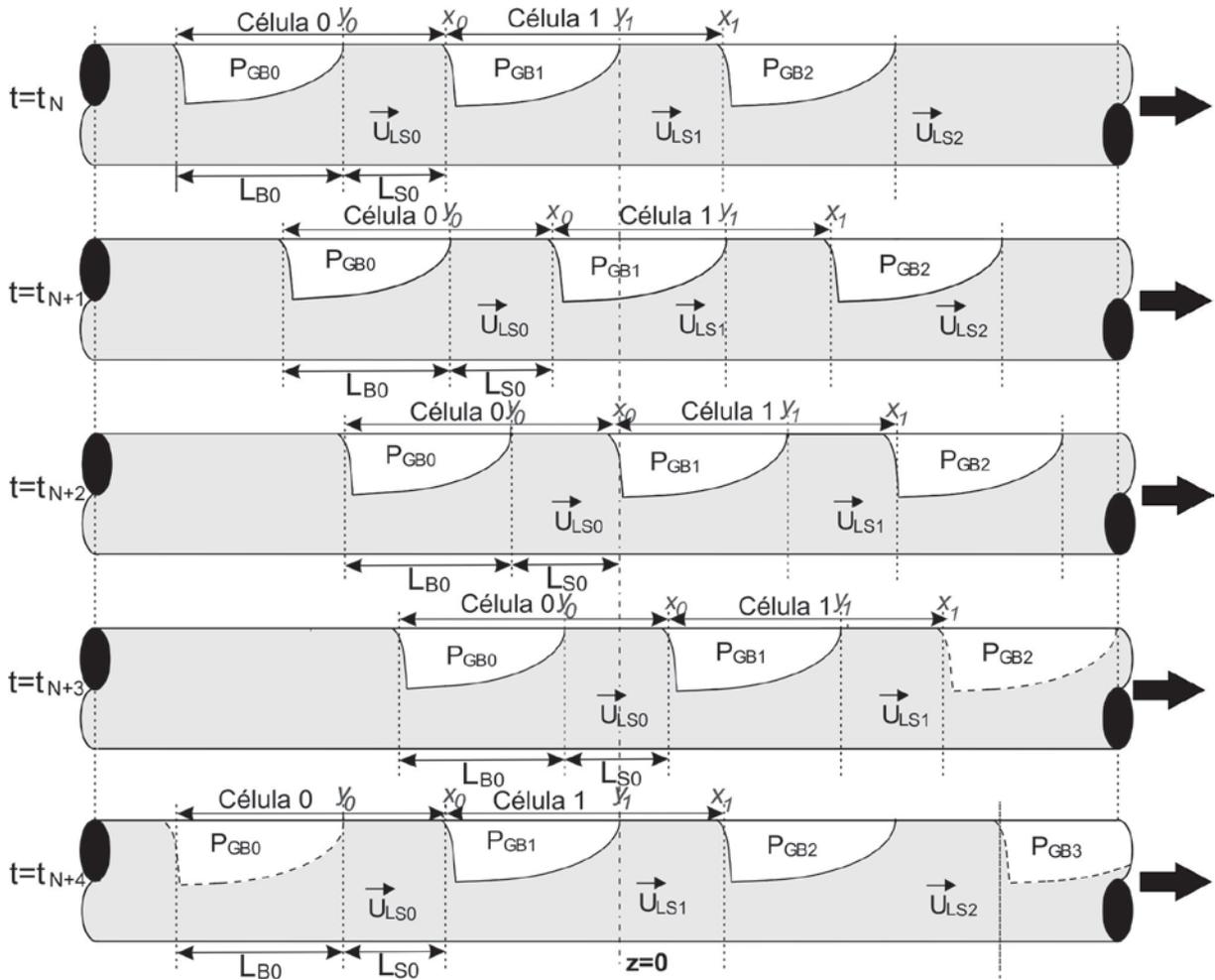


Figura 4-6- Processo de entrada de células unitárias no domínio de cálculo

4.2.5 Processo de saída das células unitárias

O processo de saída das bolhas alongadas é representado na Figura 4-7. No tempo $t=t_N$, o nariz da bolha n está localizado na posição $z=L$. Nesse instante de tempo a pressão da bolha n é considerada igual à pressão da saída imposta como de condição de contorno ($P_{GBn}^N = P_{atm}$). A partir desse instante do tempo, o sistema pressão-velocidade é resolvido apenas da célula 1 até a célula $n-1$. Caso a célula n saia do domínio do cálculo as velocidades da frente da bolha (dy_n/dt) e da traseira (dx_{n-1}/dt) não são calculadas. É considerado que a velocidade da frente da bolha alongada n é igual à da anterior, $n-1$, o que implica que o comprimento do pistão n L_{Sn-1} é constante.

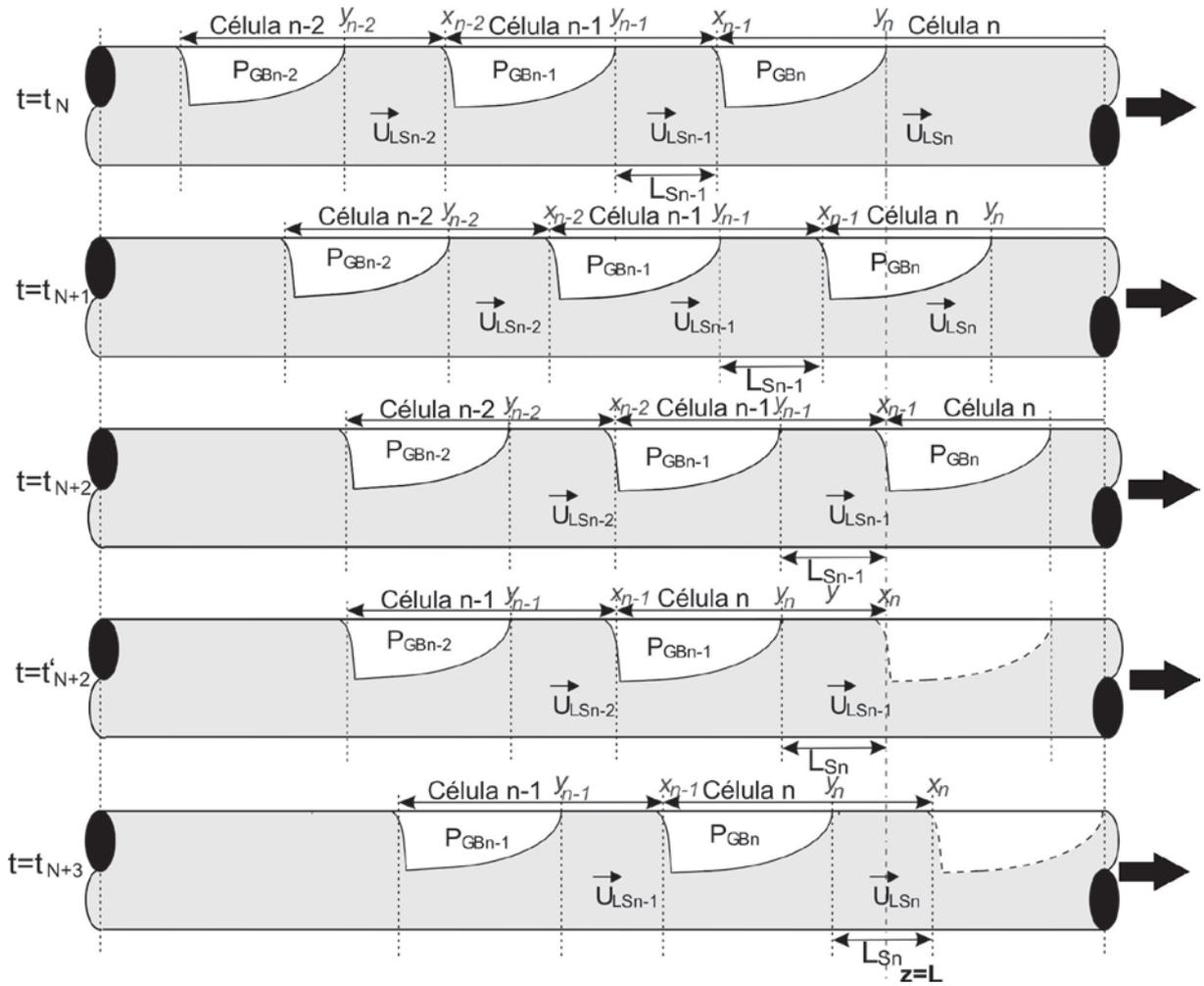


Figura 4-7- Processo de saída de células unitárias no domínio de cálculo

No instante $t=t_{N+1}$, a bolha alongada está atravessando a saída, o sistema pressão-velocidade é resolvido da célula 1 até a $n-1$. Na passagem da bolha alongada pela saída o comprimento do pistão $n-1$ é considerado constante.

No instante $t=t_{N+2}$, a bolha n terminou de sair do domínio de cálculo, e a frente do pistão $n-1$ está localizada no final da tubulação ($X_{n-1}=L$). Nesse instante de tempo a bolha n é eliminada do domínio de cálculo e o sistema é renumerado: a célula n é considerada célula n , como é observado no instante do tempo $t=t'_{N+2}$.

No instante $t=t_{N+3}$, o pistão de líquido está saindo da tubulação e este comprimento é considerando constante. Isto ocasiona que o comprimento da tubulação seja estendido e a pressão na saída seja modificada em função da pressão atmosférica como é mostrado nas equações (4.26) e (4.27). Este processo

é repetido até que o pistão de líquido termine de sair da tubulação, e quando isto ocorre o processo acima descrito para o instante do tempo $t=t_N$ é repetido.

$$P_{GBn} = P_{atm} - (x_n - L) \left(2 \frac{C_{LSn}}{D} \rho_L (U_{LSn})^2 + \rho_L g R_{LSn} \text{sen}(\theta) \right) \quad (4.26)$$

$$x_n = y_n + L_{Sn} \quad (4.27)$$

4.3 Sondas virtuais

As sondas virtuais são sondas de monitoramento dos parâmetros do escoamento em golfadas. As sondas utilizadas neste trabalho são: euleriana, lagrangeana e de fotografia.

4.3.1 Sonda euleriana

As sondas eulerianas são sondas que armazenam o valor de todos os parâmetros da célula unitária que está atravessando um determinado ponto da tubulação. No programa são implementados oito pontos de medição localizados ao longo da tubulação, sendo que uma dessas sondas é localizada no cotovelo. Com os parâmetros obtidos pelas sondas eulerianas, obtém-se os valores médios de todos os parâmetros em cada ponto de medição, bem como as funções densidade de probabilidade (PDF), que mostram as distribuições estatísticas destes parâmetros.

4.3.2 Sonda lagrangeana

As sondas lagrangeanas são sondas que acompanham uma célula unitária ao longo de toda sua passagem pela tubulação, armazenando todos os parâmetros em cada instante do tempo. Este tipo de sonda avalia as oscilações típicas do escoamento em golfadas.

4.3.3 Sonda instantânea

Neste tipo de sonda, os valores dos parâmetros de todas as células unitárias em um instante do tempo são armazenados, como se fosse uma fotografia tirada naquele instante com a finalidade de conhecer a evolução dos parâmetros das células unitárias em um determinado instante de tempo. Este tipo de sonda pode armazenar várias fotos em diferentes instantes do tempo.

4.4 Comentários Finais

Neste capítulo foi apresentada a modelagem numérica do problema em questão, as equações governantes foram discretizados pelo método de diferenças finitas, obtendo um sistema de equações que é resolvido pelo método TDMA. Além disso, foi apresentada a modelagem numérica do modelo da Bolha, assim como o algoritmo de solução. No capítulo seguinte é apresentada a metodologia experimental.

5 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada a metodologia experimental desenvolvida para a obtenção de dados para o escoamento em padrão de golfadas com uma leve mudança de direção. Inicialmente é apresentada uma descrição da bancada experimental desenvolvida. A seguir, apresenta-se uma descrição detalhada do sensor resistivo utilizado na bancada, assim como o tratamento dos dados do sensor resistivo. E por último é mostrado o sistema de aquisição de imagens.

5.1 Descrição do circuito experimental

Paralelamente aos estudos numéricos, buscou-se desenvolver simulações experimentais do escoamento em golfadas com leve mudança de direção. O objetivo dessas simulações experimentais não é, entretanto, realizar uma extensa análise experimental do escoamento em golfadas com leve mudança de direção, mas unicamente é comparar as simulações numéricas executadas.

A bancada experimental foi desenvolvida nas instalações do Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Uma representação esquemática do circuito experimental montado é apresentada na Figura 5-1. Este circuito é composto por linhas de água e de ar que conduzem o escoamento até o misturador (xi), onde as fases são misturadas antes de entrarem na linha bifásica, que é composta por uma tubulação de acrílico transparente de 9.2m e com 26 mm de diâmetro. Ao final do circuito as fases são separadas, o gás é liberado para a atmosfera e o líquido retorna ao reservatório (i).

A água é transportada do reservatório (i) ao circuito através de uma bomba centrífuga (ii) acionada por um inversor de frequência (iii). O reservatório é de material plástico e tem uma capacidade de 300 litros. A bomba centrífuga é da marca FABO modelo BCIE602 de 30CV de potência.

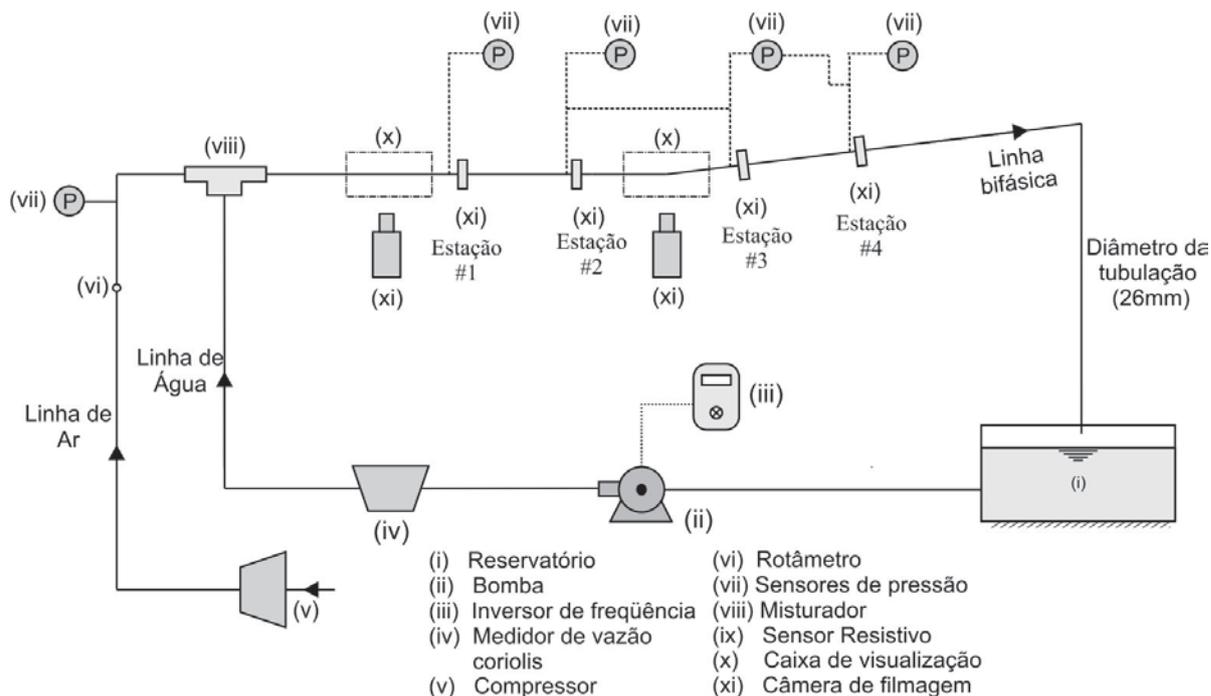


Figura 5-1- Esquema do circuito experimental desenvolvido

O suprimento de ar ao sistema ocorre pelo reservatório de ar de 800 litros, que alimenta um compressor (v). O compressor é da marca *PEG* modelo *NBP-10* com um motor de potência de 2HP.

Os medidores de vazão estão localizados em ambas as linhas de alimentação, o que possibilita a medição das vazões das fases antes da mistura. Para a medição da vazão de água são empregados dois medidores de vazão do tipo Coriolis (iv) para diferentes faixas de vazões. As características dos medidores de vazão são mostradas na Tabela 5-1.

Tabela 5-1- Dados dos medidores de vazão de água

MARCA/MODELO	FAIXA	INCERTEZA
<i>OPTIMASS/7300</i>	1-10 lt/s	±0,1%
<i>MICRO MOTION/F050S</i>	0-1,5 lt/s	±0,1%

Para a medição da vazão de ar são utilizados três rotômetros da marca *Reotest Haake* (vi), cujas características são apresentadas na Tabela 5-2. Para a medição da

vazão dos rotômetros é considerada uma pressão constante de 2 bares na saída de tanque do compressor.

Tabela 5-2 - Dados dos medidores de vazão de ar

MARCA/MODELO	FAIXA	INCERTEZA
<i>Reotest Haake/96039</i>	70-260 lt/h	±0,5%
<i>Reotest Haake /96044</i>	320-3200 lt/h	±0,5%
<i>Reotest Haake /96049</i>	700-800 lt/h	±0,5%

É necessário conhecer a velocidade superficial de gás na entrada da seção de teste (Estação 1), pois este dado é um parâmetro de entrada no programa desenvolvido. Quando o escoamento transita pela tubulação, o gás se expande e a velocidade superficial de gás tende a aumentar. A correção da velocidade superficial é dada pela equação (5.1) Uma explicação mais detalhada do cálculo dessa equação é apresentada no Anexo C, assim como as curvas de calibração dos sensores de vazão.

$$j_{G1} = \frac{P_1 T_0}{P_0 T_1} \frac{Q_{G0}}{A} \quad (5.1)$$

onde os subscritos 0 referem-se o transdutor de pressão na linha de ar ou Estação 0 e o subscrito 1 refere-se à pressão na Estação 1 da linha bifásica.

Para a medição da temperatura são utilizados termômetros resistivos do tipo PT100. Estes termômetros já estão instalados dentro dos transdutores de pressão.

A linha bifásica é constituída por uma tubulação horizontal seguida de uma tubulação inclinada ascendente de 7°. Nesta linha são definidas as quatro estações de medição como é mostrado na Figura 5-2. Em cada estação de medição são colocados transdutores de pressão (ix) e sensores gêmeos resistivos (xi).

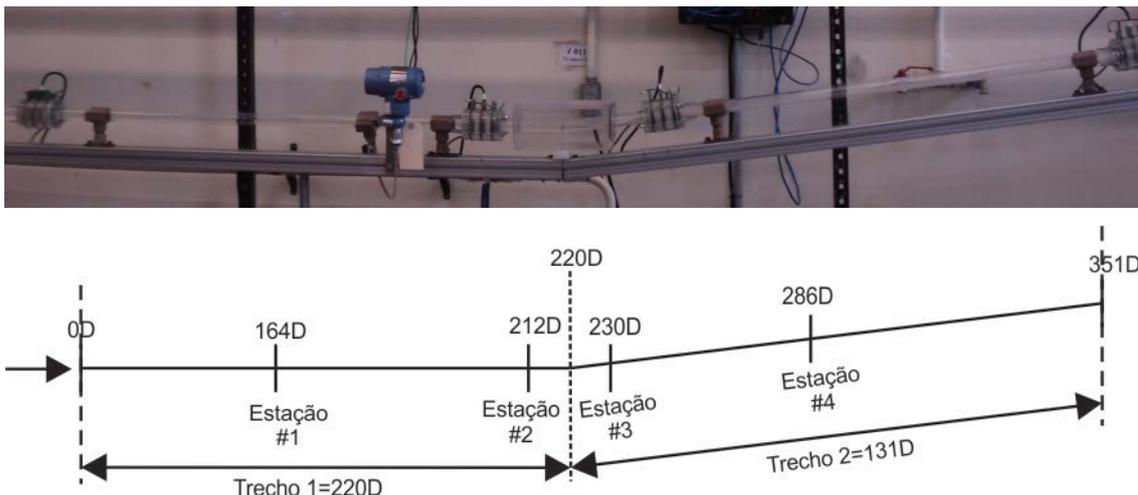


Figura 5-2- Foto da instalação das estações de medição (acima), Esquema da distribuição das estações de medição (abaixo).

A Figura 5-2 apresenta a foto da instalação das quatro estações de medição na bancada e a localização destas estações de medição. A Estação 1 se localiza em $z=164D$ do misturador, a Estação 2 é localizada um pouco antes da região do cotovelo ($z = 212D$), a Estação 3 é localizada um pouco depois do cotovelo ($z = 230D$) e a estação 4 é localizada $z=286D$.

Nas Estações 0, 1 e 2 são localizados transdutores de pressão manométricos, nas Estações 3 e 4 são localizados transdutores diferenciais de pressão. As características dos transdutores de pressão são apresentadas na Tabela 5-3. Uma explicação mais detalhada dos sensores gêmeos resistivos é apresentada na seção 5.2.

Tabela 5-3 - Dados dos transdutores de pressão

ESTAÇÃO DE MEDIDA	MARCA/MODELO	FAIXA	INCERTEZA
Estação 0	Rosemount/3051	0-150 Psi	$\pm 0,1\%$
Estação 1	Rosemount/3051	0-150 Psi	$\pm 0,1\%$
Estação 2	Rosemount /2051	0-7,5 Bar	$\pm 0,1\%$
Estação 3	Rosemount /2051	0-2,5 in H ₂ O	$\pm 0,1\%$
Estação 4	Smar/LD302	0-20 inH ₂ O	$\pm 0,1\%$

São colocadas duas câmeras de filmagem de alta velocidade (xii) na tubulação bifásica, a primeira na Estação 1 e a segunda na região do cotovelo. Os detalhes do esquema de montagem da filmagem do escoamento e a metodologia de filmagem são apresentados na seção 5.4.

O circuito experimental conta com um sistema de aquisição de sinais através de uma rede de protocolo *FieldBus*. Esta rede conecta os transdutores de pressão, temperatura e vazão a uma placa de aquisição tipo PCI da marca *National Instruments*. Esta placa converte os sinais analógicos em digitais e logo envia os sinais analógicos ao computador. No laboratório do LACIT foi desenvolvido um *software* em *LabVIEW*[®] para monitorar os parâmetros. O painel de testes de *software* desenvolvido pode ser observado na Figura 5-4. Neste painel são monitoradas as velocidades superficiais de cada fase e as pressões em cada estação de medição. Além disso, é mostrada a variação das velocidades superficiais de líquido e de gás com relação ao tempo.

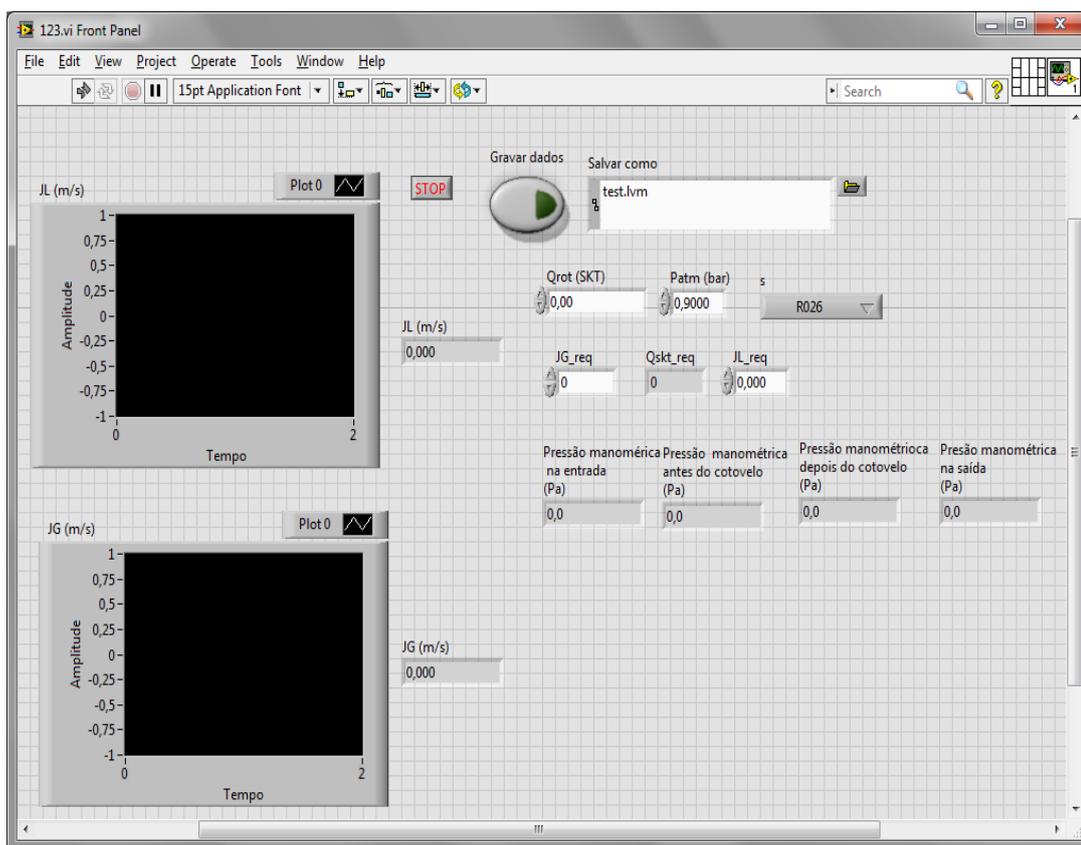


Figura 5-3 - Painel do *software* para monitoramento das pressões e as velocidades superficiais de cada fase

5.2 Sensor gêmeo resistivo

Os sensores gêmeos resistivos foram desenvolvidos por Machado et. al. (2013) no laboratório do LACIT/UTFPR. Estes sensores foram instalados nas quatro estações de medição da linha bifásica da bancada experimental. O sensor resistivo é composto por três placas de circuito impresso, flanges e *o-rings* entre as placas de circuito impresso, como são mostrados na Figura 5-4.

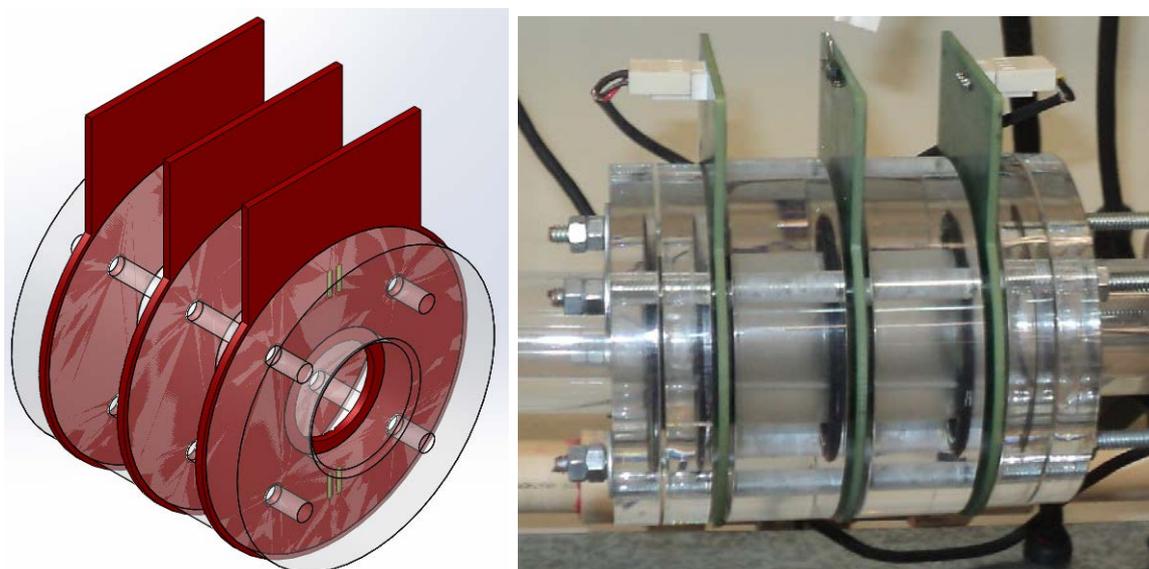


Figura 5-4 - Desenho do sensor gêmeo resistivo (esquerda) e sensor gêmeo resistivo instalado (direita)

A Figura 5-4 mostra o desenho feito em *SolidWorks* do sensor gêmeo resistivo e sua instalação na bancada experimental. Os flanges foram feitos de acrílico e as placas de circuito impresso (PCI) foram fabricadas com fibra de vidro com impressão de cobre através do processo padrão para confecção de PCI. A placa de circuito central do sensor gêmeo resistivo está conectada ao potencial nulo (aterramento) com a finalidade de evitar a interferência dos sinais entre as placas das extremidades. As placas de circuito contêm dois filamentos de 0,12 mm de diâmetro fabricados em aço inoxidável; um dos filamentos envia um sinal de excitação ao escoamento que transita por ele e o outro filamento recebe o sinal, como é mostrado na Figura 5-5. O espaçamento entre os filamentos é de 3 mm.



Figura 5-5- Placa de circuito

O princípio de funcionamento de uma das placas de circuito impresso das extremidades baseia-se no envio, por um dos fios da placa, de um sinal de excitação bipolar de $\pm 2,5$ V de amplitude e frequência de 1,5 kHz ao escoamento que transita por ele enquanto o outro fio recebe o sinal de resposta. A tensão é máxima quando o tubo está cheio de água e mínima quando ele está vazio (cheio de ar). A intensidade da tensão elétrica medida varia entre estes dois níveis.

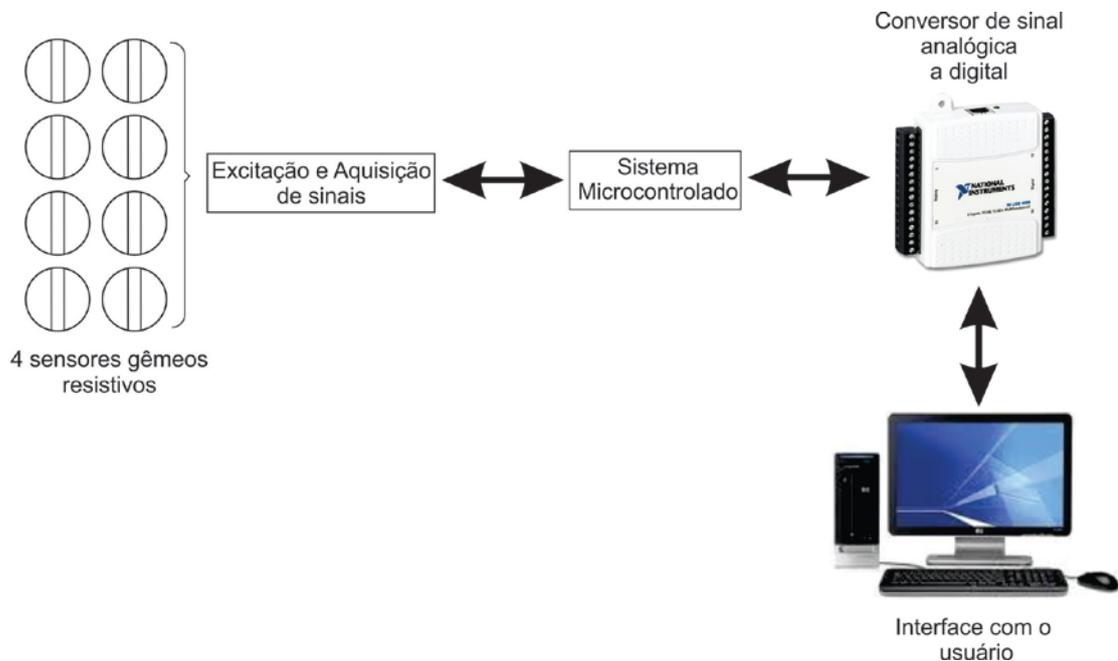


Figura 5-6- Diagrama de funcionamento do sistema

A Figura 5-6 mostra o diagrama de funcionamento do sistema. Um sinal de excitação é enviado através de umas das placas de circuito impresso do sensor gêmeo resistivo, enquanto o outro filamento recebe o sinal excitado que é processado por um microcontrolador. O sinal analógico resultante é convertido em sinal digital com a finalidade de ser tratado por um programa computacional em linguagem *LabVIEW*[®]. O conversor de sinais utilizado é da *National Instruments* modelo PCI 6229.

5.3 Extração dos parâmetros

As medições realizadas pelo sensor gêmeo resistivo chegam ao computador na forma de sinais de tensão. Estas tensões medidas no sensor são capturadas por um programa feito em *LabVIEW*[®] e armazenadas na memória do computador. Os parâmetros que precisam ser extraídos desses sinais são: fração de vazio, velocidade de translação da bolha, os comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido e a frequência.

A fração de vazio não pode ser determinada diretamente, portanto a fração de vazio é calculada a partir da correlação entre o nível do líquido e a tensão elétrica, sendo que a relação entre estes dois últimos parâmetros é linear. A tensão tem um valor mínimo quando a altura do filme ($h_{LB}(t)$) é zero e um valor máximo quando a altura do filme é igual ao diâmetro da tubulação, devido ao fato que a água conduz a corrente elétrica e o ar não. Para a calibração da altura do filme é utilizada a relação linear entre a tensão e a altura do filme. Esta relação é apresentada na equação (5.2).

$$\frac{h_{LB}(t)}{D} = \frac{V(t) - \bar{V}_v}{\bar{V}_c - \bar{V}_v} \quad (5.2)$$

onde $V(t)$ é a tensão em um instante de tempo e \bar{V}_v e \bar{V}_c são as tensões quando a tubulação está vazia e cheia de água, respectivamente.

O \bar{V}_v é determinado preenchendo-se a tubulação somente com ar e a média dos valores de tensão obtidos em cada passo de tempo e é calculada pela equação (5.3).

$$\bar{V}_v = \frac{1}{N_t} \sum_{k=0}^{k=N_t-1} V_v(t) \quad (5.3)$$

onde N_t é o número de dados e t é o tempo.

Para a determinação de \bar{V}_c a tubulação é preenchida com água e a média de tensão em cada passo de tempo é calculada pela equação (5.4).

$$\bar{V}_c = \frac{1}{N_t} \sum_{k=0}^{k=N_t-1} V_c(t) \quad (5.4)$$

As medidas de tubo cheio e vazio devem ser feitas cada vez que se vai utilizar a bancada experimental. Deve-se verificar a temperatura da água no reservatório em cada teste de medida, certificando-se que sua variação esteja entre $\pm 3^\circ\text{C}$, pois a resistividade de água varia com a temperatura e esta variação pode levar a uma medida errada do sensor gêmeo resistivo.

A Figura 5-7 ilustra o resultado do procedimento da altura do filme discreto acima. O sinal varia entre um valor próximo a unidade e outro próximo a um valor constante. O valor próximo à unidade é dado quando a região do pistão de líquido de escoamento em golfadas é captada pelo sensor resistivo; por outro lado o sinal é diferente da unidade quando a bolha alongada é capturada pelo sensor resistivo.

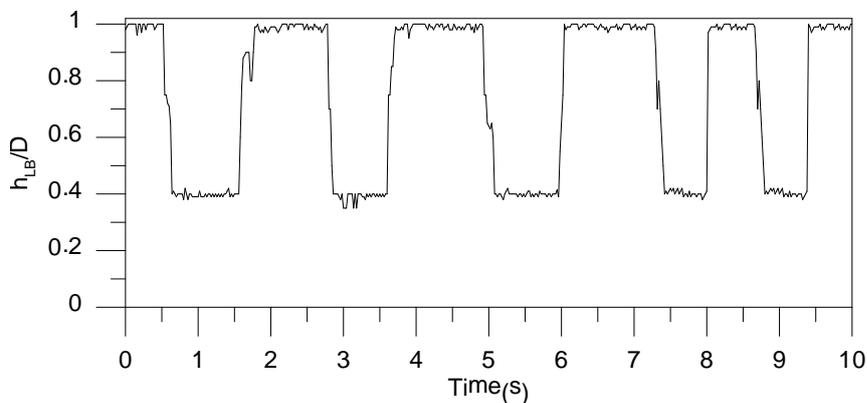


Figura 5-7 - Série temporal da altura de líquido no escoamento em golfadas
 Depois de medir as tensões em cada instante do tempo, o próximo passo consiste em calcular a fração de vazio. Para isso parte-se da Figura 5-8.

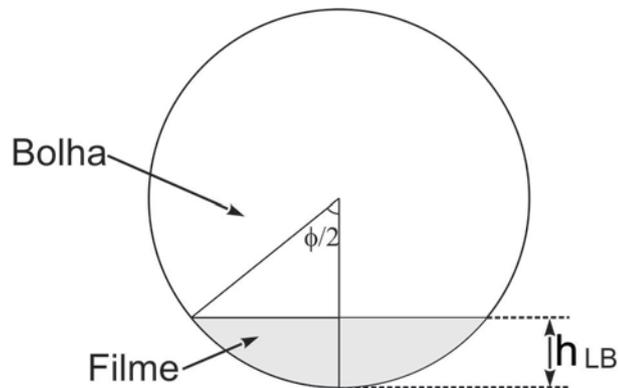


Figura 5-8- Altura do filme de líquido

O cálculo da fração de vazio é calculado a partir das relações geométricas da Figura 5-8, onde as equações resultantes são mostradas nas equações (5.5) e (5.6).

$$\phi(t) = 2 \arccos \left(1 - 2 \frac{h_{LB}(t)}{D} \right) \quad (5.5)$$

$$R_{GB}(t) = \frac{2\pi - \phi(t) + \text{sen}(\phi(t))}{2\pi} \quad (5.6)$$

Os comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido são calculados com o sinal do Sensor 1; para o cálculo da velocidade da bolha alongada é utilizado o sinal dos dois sensores. Os sinais dos dois sensores em função da fração de vazio são mostrados na Figura 5-9. Nessa figura ilustram-se os dois sinais recebidos pelo sensor gêmeo resistivo, onde a análise dos parâmetros característicos do escoamento é baseada no nível de água com relação ao tempo. Para determinar que parte do sinal do Sensor 1 corresponde à bolha alongada e ao pistão de líquido é traçada uma linha horizontal chamada linha de fator de corte (LFC), onde todo sinal acima desta linha corresponde à bolha alongada; caso contrário o sinal corresponde ao pistão de líquido

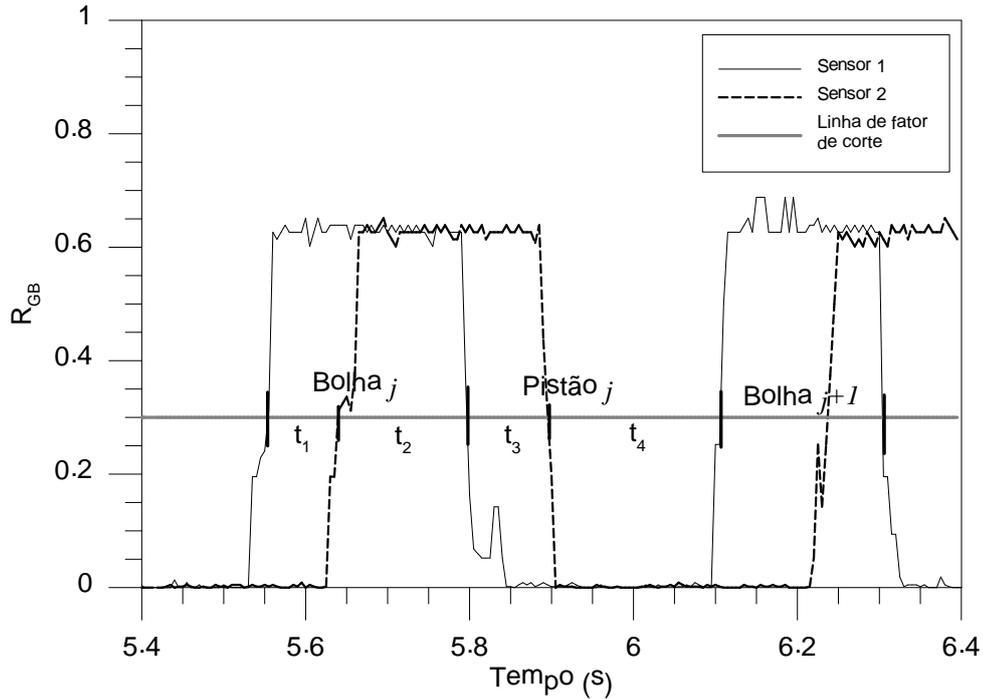


Figura 5-9- Análise dos parâmetros característicos do escoamento baseado na altura do líquido dos sinais do sensor gêmeo resistivo

A linha de fator de corte (LI_{FC}) da Figura 5-9 depende do fator de corte (FC) e o cálculo da LI_{FC} é efetuado a partir das equações (5.7) e (5.8), respectivamente. Se o FC tem um valor igual à unidade a LI_{FC} é igual ao valor máximo da fração de vazio, e no caso que o FC tenha um valor de zero a LI_{FC} é igual ao valor mínimo da fração de vazio. Dessa maneira é analisado o melhor FC para o processamento dos sinais, e a seção 6.2.1 trata desta análise.

$$LI_{FC1} = \min(R_{GB1}) + FC(\max(R_{GB1}) - \min(R_{GB1})) \tag{5.7}$$

$$LI_{FC2} = \min(R_{GB2}) + FC(\max(R_{GB2}) - \min(R_{GB2})) \tag{5.8}$$

onde os subscritos 1 e 2 correspondem ao Sensor 1 e Sensor 2, respectivamente.

A velocidade da frente da bolha alongada ou a velocidade da translação da bolha (U_{Tj}) é calculada pela seguinte relação:

$$U_{Tj} = \frac{\Delta L_{Se}}{t_1} \quad (5.9)$$

onde ΔL_{Se} representa a distância entre as duas placas de circuito do sensor gêmeo resistivo e t_1 representa a diferença de tempo entre a detecção da frente da bolha alongada entre os sinais recebidos do sensor gêmeo resistivo.

O comprimento do pistão é calculado a partir das velocidades de translação da bolha e deslocamento traseira da bolha alongada j e é dado pela equação (5.10).

$$L_B = U_{Tj}(t_1 + t_2) \quad (5.10)$$

onde $(t_1 + t_2)$ é a diferença de tempo entre a detecção da frente da bolha e a traseira da bolha pelos sinais recebidos.

O comprimento do pistão de líquido é calculado a partir da velocidade de translação da bolha $j+1$ e a velocidade de deslocamento da bolha traseira j .

$$L_S = U_{Tj+1}(t_3 + t_4) \quad (5.11)$$

onde $(t_3 + t_4)$ é a diferença de tempo entre a detecção da traseira da bolha j e a frente da bolha $j+1$ do sinal recebido.

A frequência das bolhas alongadas (f) é calculada pela equação (5.12).

$$f = \frac{1}{t_5} = \frac{1}{(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)} \quad (5.12)$$

onde t_5 é a diferença de tempo de detecção da traseira da bolha j e a traseira da bolha $j+1$.

5.4 Aquisição de imagens

Na região do cotovelo foram colocadas duas câmeras de alta velocidade. A primeira na Estação 1 e a segunda na região do cotovelo. A finalidade da primeira

câmera é fazer uma verificação da velocidade de translação calculada pelo sensor resistivo e a calculada pela câmera de alta velocidade. Para o cálculo da velocidade de translação da bolha alongada e dos comprimentos dos pistões e da bolha é utilizada a metodologia desenvolvida por Amaral et. al. (2013).

O objetivo da filmagem do escoamento bifásico na região do cotovelo é determinar se houve divisão da bolha. Esta divisão será observada com a câmera de filmagem de alta velocidade para diferentes valores de velocidade superficial de líquido e de gás na primeira estação. A modelagem matemática prevê a ocorrência da divisão da bolha alongada e, portanto, é necessário verificar se ela realmente ocorre.

A Figura 5-10 apresenta o esquema de filmagem do escoamento na região do cotovelo. O esquema é composto por uma câmera de filmagem (iii), uma interface com o usuário (i), uma lâmpada (ii) e uma caixa de visualização (iv). A lâmpada deve estar colocada de maneira que a região da filmagem tenha uma correta iluminação onde as duas fases do escoamento bifásico possam ser apreciadas.

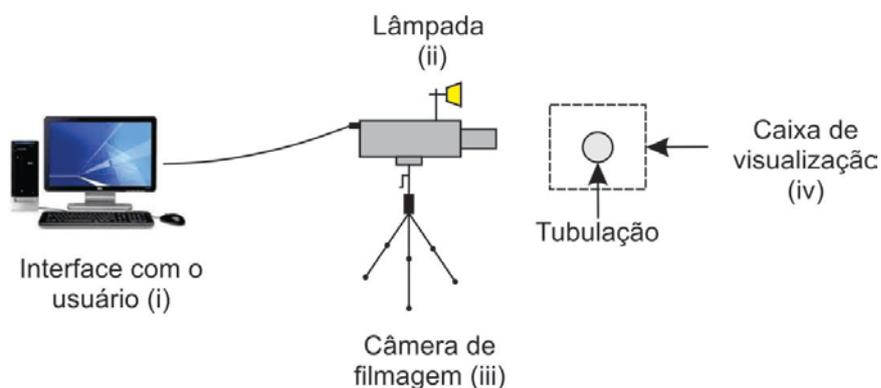


Figura 5-10 - Esquema do aparato para a filmagem do escoamento.

As câmeras de filmagem são *Motion Pro X3* de alta velocidade e têm uma resolução máxima de 1280x1204 *pixels* e uma velocidade de filmagem de 1000 fps (*frames per second*). A caixa de visualização é de acrílico e está cheia de água, para reduzir a refração da luz. A caixa tem dimensões de 240x120x100mm.

Na caixa de visualização é afixada uma régua tal como mostrado na Figura 5-11 de 6 cm do comprimento. Por outro lado a câmera de visualização na região do cotovelo é localizada de maneira que a câmera visualize somente 12 cm do

comprimento da câmera de visualização, onde 5 cm de visualização correspondem ao trecho horizontal e os outros 7 cm correspondem ao trecho inclinado ascendente.

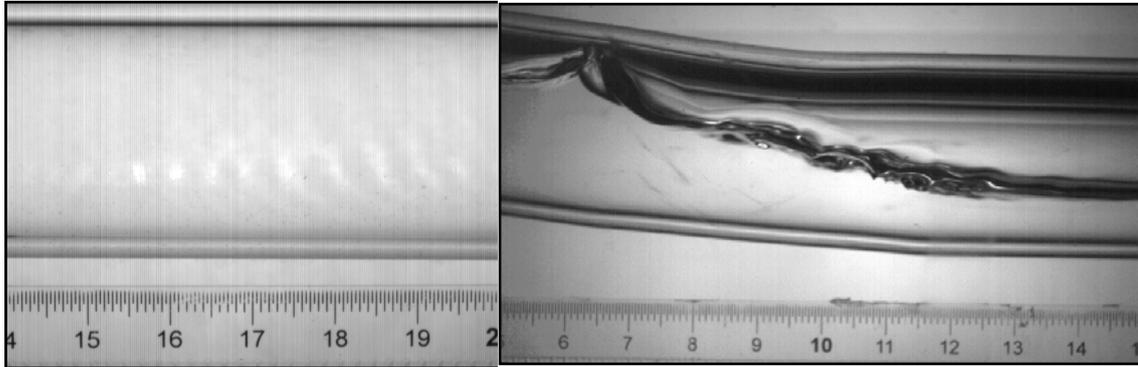


Figura 5-11- Quadro da filmagem de câmera de alta velocidade na Estação 1 (esquerda) e na região do cotovelo (direita)

Uma vez determinado o quadro de filmagem é calculada a resolução da imagem em MP² (megapixels²). A resolução da imagem do quadro da primeira câmera é 1144x544 MP² e do quadro da segunda câmera é de 1136x640 MP². O sentido de colocar a régua no quadro de filmagem é ter uma equivalência entre o tamanho de imagem em relação à resolução com a finalidade de medir a velocidade da bolha alongada como é mostrada na Figura 5-12.

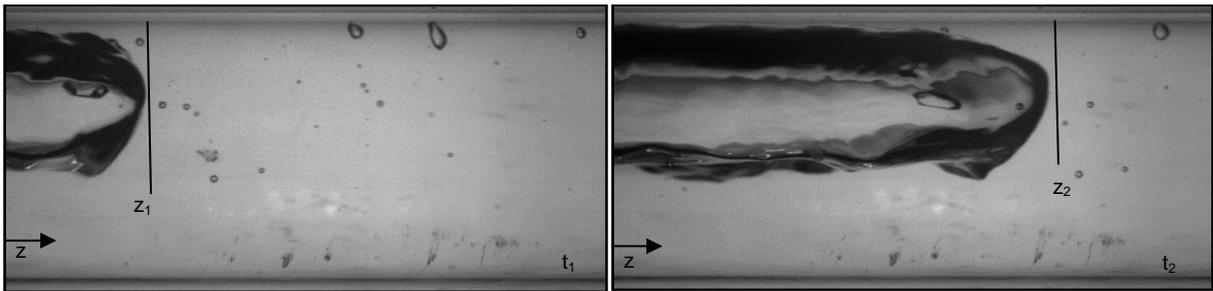


Figura 5-12- Cálculo da velocidade da translação da bolha.

O cálculo da velocidade de translação da bolha é calculado através da seguinte equação:

$$U_T = \frac{\Delta z}{M_t} \left(\frac{M_2 - M_1}{t_2 - t_1} \right) \quad (5.13)$$

onde Δz é o tamanho da imagem em metros, M_t é o comprimento horizontal do quadro de filmagem em MP, M_1 e M_2 é a distância que está localizada a frente das bolhas com respeito ao eixo-z, para os tempos t_1 e respectivamente. No caso apresentado M_t é 1144MP e Δz é 0,06m.

As imagens obtidas nas duas câmeras de alta velocidade serão analisadas no capítulo referente aos resultados com a finalidade de determinar a velocidade de translação da bolha e determinar se ocorre a divisão da bolha na região do cotovelo, respectivamente.

5.5 Comentários Finais

No presente capítulo foi apresentada a bancada experimental detalhando os sensores utilizando para o monitoramento dos parâmetros do escoamento bifásico, onde foram definidas as quatro estações de medição. Foi explicado detalhadamente o funcionamento do sensor gêmeo resistivo, assim como o processamento de seus sinais. Por último foi mostrada a metodologia de aquisição de imagens da câmera de alta velocidade. No capítulo seguinte os resultados do presente trabalho serão apresentados.

6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos testes experimentais e as simulações numéricas do escoamento em golfadas com uma leve mudança de direção. Primeiramente, será apresentada a grade de testes experimentais, seguidos dos resultados experimentais obtidos na bancada experimental. A metodologia da geração da lista na entrada será apresentada na sequência. E, por fim, comparar-se-ão os resultados numéricos com os dados experimentais em função de curvas PDF e valores médios.

6.1 Grade de testes

Foram utilizadas quatro seções de testes experimentais para medir os parâmetros característicos do escoamento em golfadas. Tais seções de testes são chamadas “Estações”; foram também utilizadas oito seções de testes numéricos. As seções de teste experimentais e numéricas são apresentadas na Figura 6-1.

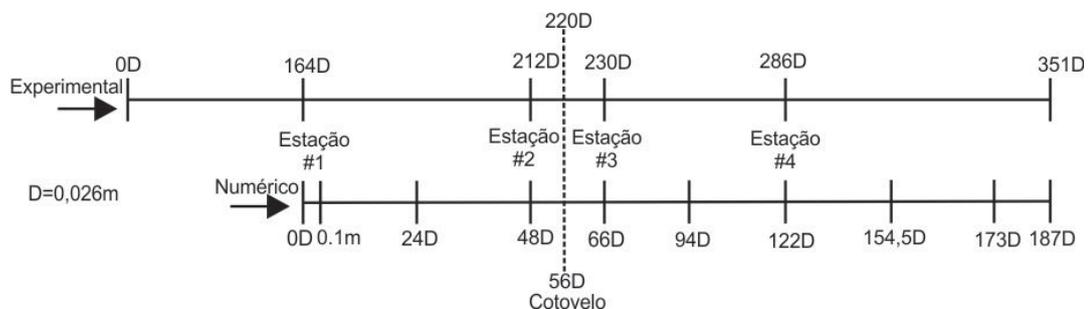


Figura 6-1-Representação das seções de teste experimental e numérica para escoamento em golfadas com uma leve mudança de direção

Na Figura 6-1 cada linha vertical é uma seção de teste, onde são calculadas a velocidade de translação da bolha, pressão e comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido.

Os testes experimentais foram feitos para 16 casos de escoamento em padrão de golfadas ar-água. A grade de teste é representada pela Tabela 6-1, que contém a

velocidade superficial de líquido (j_L) e de gás (j_G) e a velocidade da mistura (J). As siglas A@W (*Air at water*) são utilizadas para identificar o escoamento ar-água.

Tabela 6-1 - Grade de testes experimentais

	j_L [m/s]	j_G [m/s]	J [m/s]
A@W#1	0,500	0,356	0,856
A@W#2	0,700	0,217	0,917
A@W#3	0,750	0,533	1,283
A@W#4	1,000	0,300	1,300
A@W#5	1,000	0,717	1,717
A@W#6	1,000	1,034	2,034
A@W#7	1,200	0,219	1,419
A@W#8	1,250	0,835	2,085
A@W#9	1,500	0,306	1,806
A@W#10	1,500	0,673	2,173
A@W#11	1,500	1,070	2,570
A@W#12	1,700	0,224	1,924
A@W#13	2,000	0,390	2,390
A@W#14	2,000	0,638	2,638
A@W#15	2,000	1,277	3,277
A@W#16	2,500	0,410	2,910

6.2 Apresentação dos resultados experimentais

Primeiramente, para se extrair corretamente os parâmetros de escoamento no tratamento dos sinais é determinado o melhor fator de corte. Uma vez que este é determinado, calculam-se os parâmetros característicos de escoamento: velocidade de translação da bolha, fração de vazio e os comprimentos de bolha alongada e pistão de líquido. Em seguida é analisada a velocidade de translação da bolha e frequência da bolha alongada com relações experimentais. E por último é analisado

o fenômeno físico que ocorre quando o escoamento em golfadas transita pela região do cotovelo.

6.2.1 Análise do fator de corte

Na Figura 6-2 e Figura 6-3 apresentam-se os resultados de valores médios e PDFs para A@W#4 ($J_L=0,500$ e $J_G=0,356$) para os fatores de corte de 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35.

Na Figura 6-2 observam-se os resultados médios para A@W#4. A linha pontilhada nessa figura indica a posição onde se produz a mudança de direção. Os resultados médios de pressão e de velocidade de translação da bolha alongada quase não variam e são independentes do fator de corte escolhido. Por outro lado os resultados médios do comprimento da bolha alongada e do pistão de líquido variam bem pouco quando se varia o fator de corte. Para maiores fatores de corte os comprimentos da bolha médios diminuem e os comprimentos da bolha alongada aumentam nas quatro estações de medição.

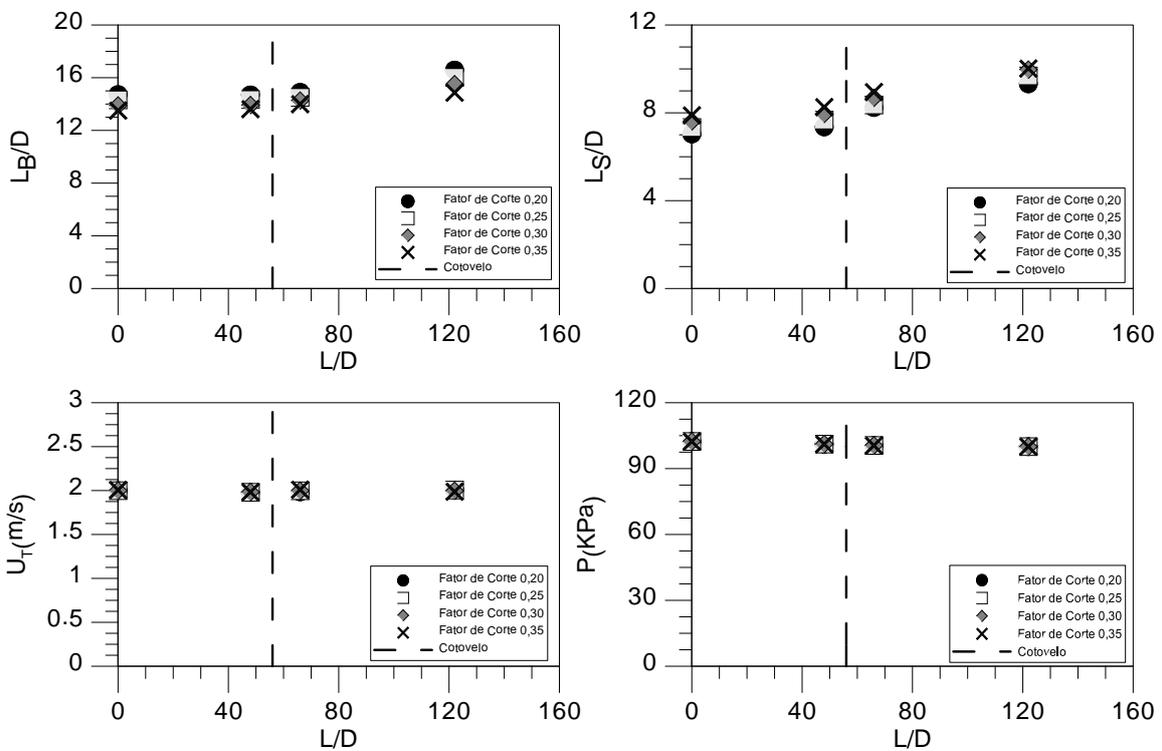


Figura 6-2- Resultados médios para A@W#4 ($j_L=1,000$ e $j_G=0,300$)

Na Figura 6-3- PDFs para A@W#4 são mostrados que os PDFs para A@W#4 variam bem pouco com o fator de corte escolhido. Para os outros casos da grade de teste os gráficos de valores médios e PDFs apresentam as mesmas relações descritas. No Apêndice B são mostrados os casos A@W#2, A@W#3, A@W#5 e A@W#15.

Como pôde-se observar quando é variado o fator de corte os parâmetros descritos variam bem pouco. Foi escolhido o fator de corte de 0,30, devido a que este fator apresenta uma menor uma menor discrepância no cálculo da velocidade da translação da bolha com respeito à correlação do Bendiksen.

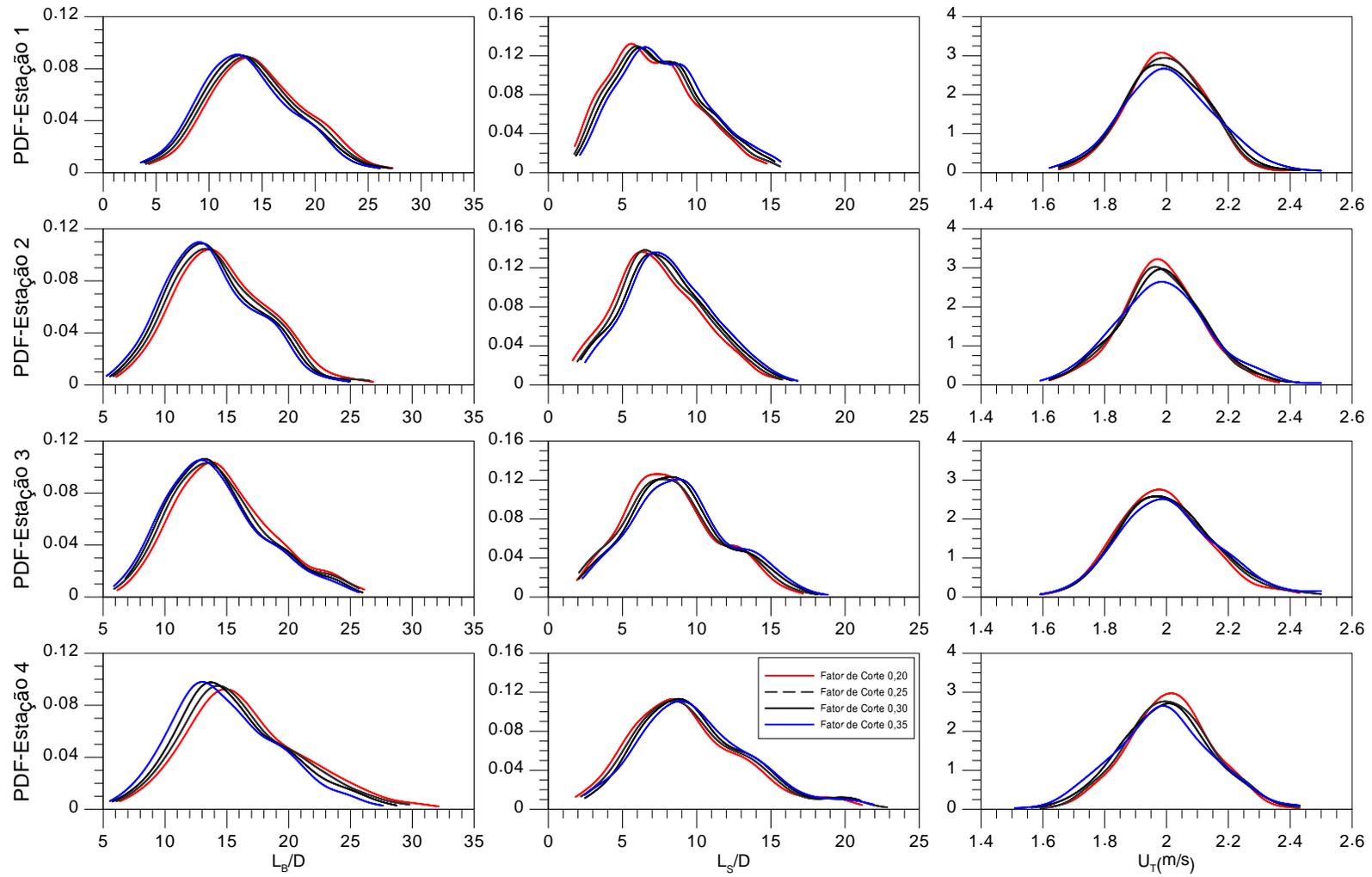


Figura 6-3- PDFs para A@W#4

6.2.2 Velocidade de translação da bolha

Com o fator de corte escolhido na seção anterior é calculada a velocidade de translação da bolha. Esta velocidade é comparada com a velocidade calculada pela câmera de alta velocidade e com a relação de Bendiksen (1984), respectivamente. Esta comparação das velocidades é apresentada na Figura 6-4. A velocidade de translação da bolha pela relação de Bendiksen (1984) é calculada a partir das propriedades dos fluidos e das velocidades superficiais de líquido e de gás, tal como é apresentado na seção 3.2.1.

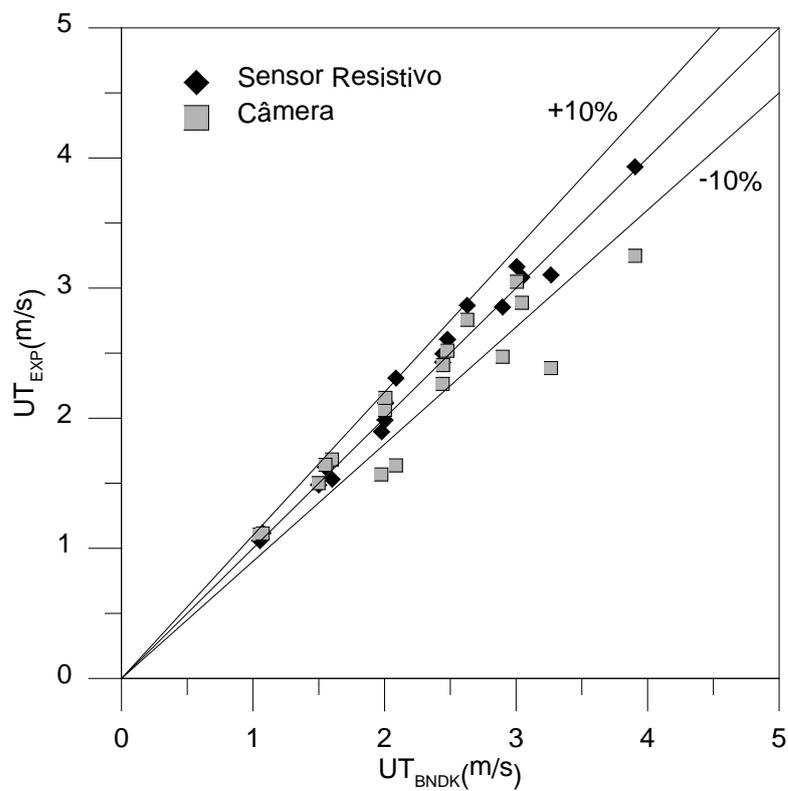


Figura 6-4- Comparação da velocidade de translação da bolha experimental com Bendiksen

Na Figura 6-4 observa-se que as velocidades de translação da bolha determinada pela relação de Bendiksen e pelo sensor resistivo diferem por menos de 10%. Por outro lado a comparação da velocidade de translação da bolha calculada com a câmera de alta velocidade com a relação de Bendiksen tem pontos que diferem em mais de 10%. Este erro deve-se ao fato que o software de

tratamento da imagem tem dificuldade para determinar o nariz da bolha alongada quando o pistão de líquido é muito areado.

6.2.3 Frequência da célula unitária

De maneira similar ao estudo da velocidade de translação da bolha, a frequência da célula unitária é analisada utilizando-se correlações da literatura, sendo que estas correlações são comparadas com as frequências da célula unitária determinadas com o sensor resistivo na estação 1. A Tabela 6-2 mostra os modelos para o cálculo da frequência da célula unitária.

Tabela 6-2 - Modelos para o cálculo da frequência da célula unitária do escoamento em golfadas

Modelo	Equação
Gregory e Scott (1969)	$f = 0,0226 \left[\frac{j_L}{J} \left(\frac{2,02}{D} + Fr_j^2 \right) \right]^{1,2}$
Heywood e Richardson (1979)	$f = 0,0434 \left[\frac{j_L}{J} \left(\frac{2,02}{D} + Fr_j^2 \right) \right]^{1,02}$

onde Fr_j é número de Froude e D é o diâmetro do tubo.

A frequência da célula unitária é normalizada em função do número de Strouhal (fD/J_G) e é comparada com os modelos de Gregory e Scott(1969) e Heywood e Richardson(1979), como é mostrada na Figura 6-4. Nessa figura é observada uma tendência exponencial, onde para valores $j_G/J > 0,4$ os resultados experimentais de frequência batem com os resultados das correlações, caso contrário os valores experimentais saem maiores que os resultados das correlações. A frequência é inversamente proporcional à velocidade superficial de gás, isto é, quando a frequência aumenta a velocidade superficial diminui e quando a frequência decresce a velocidade superficial aumenta. Como conclusão, observa-se que os resultados da frequência da célula unitária apresentam uma boa concordância com os resultados das correlações apresentadas.

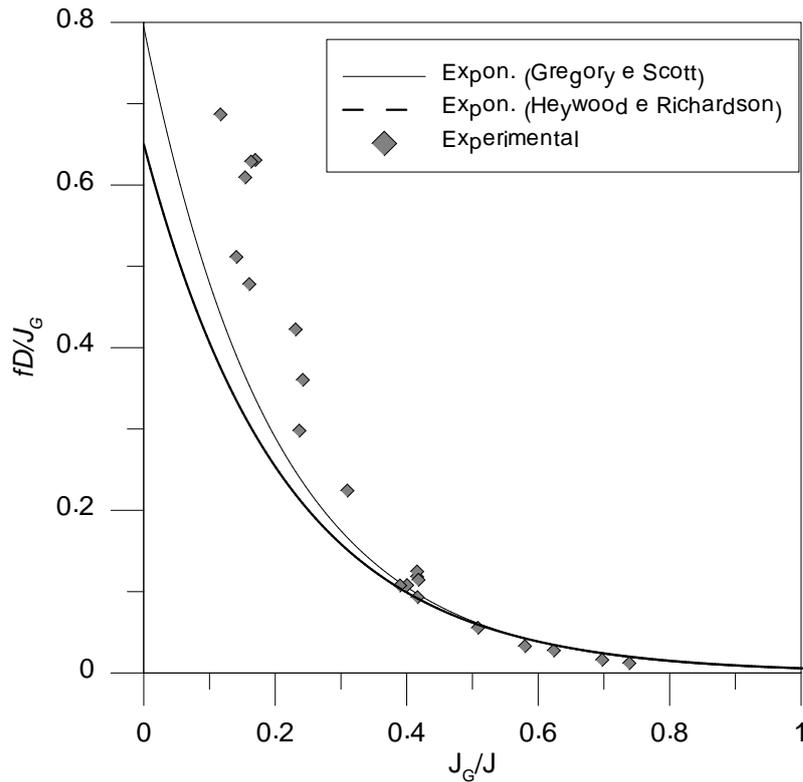


Figura 6-5 – Distribuição da frequência da célula unitária em relação à velocidade superficial do gás

6.2.4 Análise do escoamento na região de mudança de direção

Um dos objetivos da aquisição de imagens do escoamento na região do cotovelo é analisar se e como ocorre divisão da bolha alongada quando esta atravessa a região do cotovelo. Os detalhes da metodologia foram apresentados na seção 5.4.

As Figura 6-6 e Figura 6-7 mostram a filmagem do escoamento para o caso de $j_L=0,250$ e $j_G=0,343$ e para o caso de A@W#1.

A Figura 6-6 apresenta um exemplo da divisão da bolha alongada. No instante do tempo (a) mostra-se a passagem da bolha alongada pela região do cotovelo. No tempo (b) observa-se que a altura do filme se incrementa. No tempo (c) é mostrado que a bolha alongada está prestes a se quebrar. E por último no tempo (d) observa-se que a bolha alongada finalmente se quebra.

A Figura 6-7 mostra-se outro exemplo onde ocorre a divisão da bolha alongada para o teste A@W#1. Neste teste observa-se uma bolha de menor comprimento que

no caso da Figura 6-6. No tempo (a) a bolha alongada está ingressando na região da filmagem. No tempo (b), observa-se que a cauda da bolha alongada é bem fina. No instante do tempo (c) se mostra a quebra da bolha alongada e que a cauda da bolha alongada se divide em três partes. Por último no tempo (d) se ilustra a passagem das bolhas quebradas pela região do cotovelo.

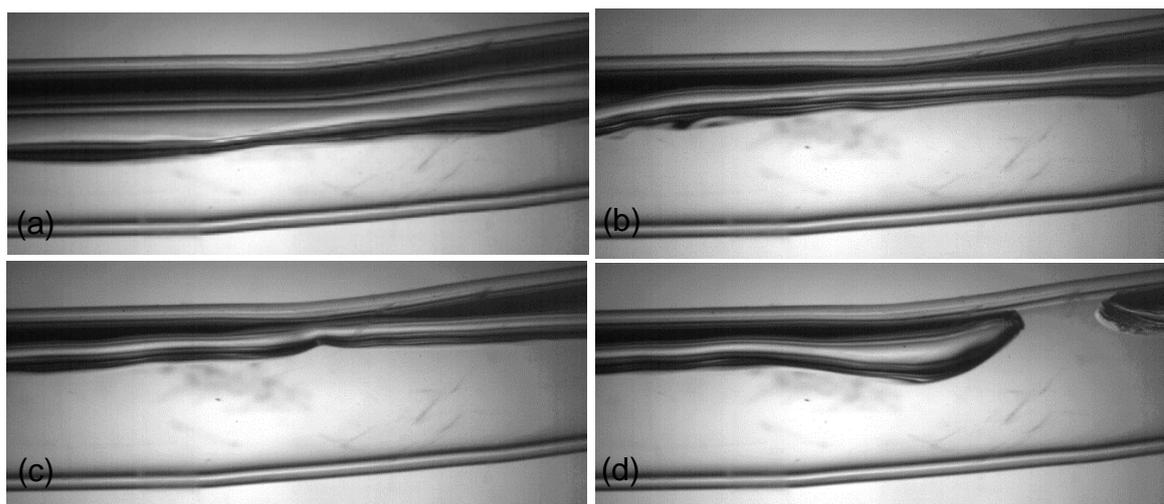


Figura 6-6 - Filmagem da passagem do escoamento em golfadas pela região do cotovelo para $j_L=0,250$ e $j_G=0,343$

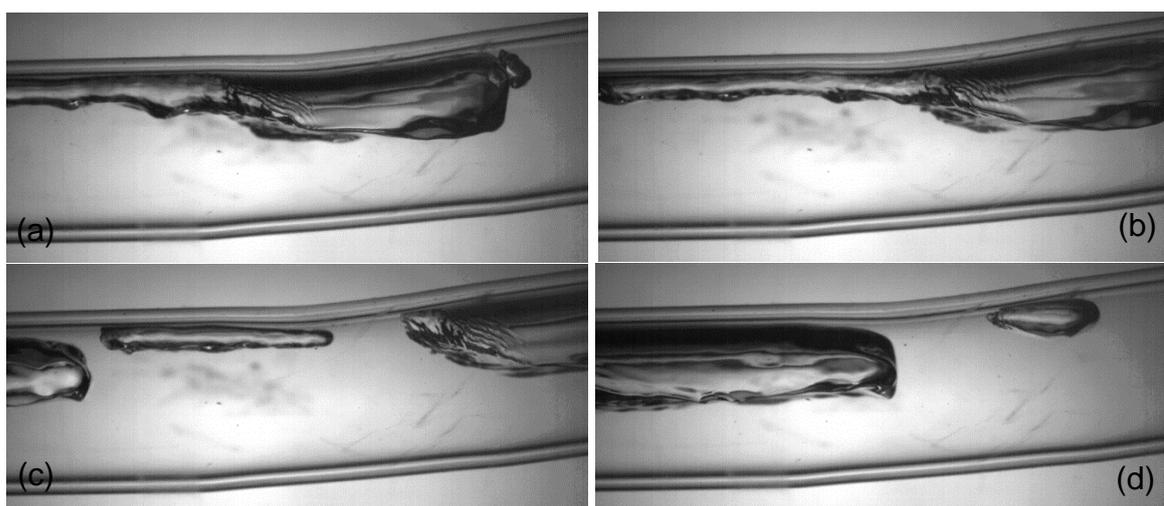


Figura 6-7- Filmagem da passagem do escoamento em golfadas pela região do cotovelo para A@W#1 ($j_L=0,500$ e $j_G=0,356$)

A divisão da bolha alongada obedece ao critério de instabilidade de Kelvin-Helmoltz (K-H), que ocorre devido à perturbação do movimento entre as camadas de líquido e gás quando a bolha alongada atravessa a região do cotovelo. Os mecanismos que provocam esta perturbação são, por um lado, as forças gravitacionais e por outro as tensões superficiais que tendem a estabilizar o escoamento. Este movimento das duas camadas cria uma força da pressão de sucção sobre a onda, devido ao efeito de Bernoulli, o que tende a dividir a bolha alongada. Isto faz com que a leitura da pressão do transdutor de pressão na Estação 3 seja menor que na Estação 4, quando se produz a divisão da bolha alongada.

Foi observado que a quebra da bolha alongada ocorre no teste A@W#1. Na maioria dos testes a queda da pressão entre os transdutores de pressão estação a estação é positiva. No entanto, nos testes onde a divisão da bolha ocorre, a queda da pressão entre as Estações 3 e 4 é negativa.

6.3 Metodologia de geração da lista na entrada

O modelo matemático *slug tracking* para seguimento de pistões precisa de uma lista de entrada, a qual é propagada ao longo da tubulação com a finalidade de calcular os principais parâmetros do escoamento em golfadas. A lista de entrada contém parâmetros geométricos e propriedades da célula unitária. Esta lista está composta por: velocidade superficial de gás (j_L), velocidade superficial de líquido (j_G), comprimento da bolha alongada (L_B), comprimento do pistão de líquido (L_S), fração de vazio da bolha alongada (R_{GB}) e fração de líquido no pistão (R_{LS}). A lista na entrada é gerada a partir dos dados experimentais da Estação 1.

Os comprimentos da bolha alongada, comprimento do pistão de líquido e a fração de vazio da bolha alongada foram calculados com o sensor resistivo. Por outro lado considera-se um pistão aerado na entrada, sendo que a fração de líquido no pistão é igual à unidade.

$$R_{LS0}^{Nj} = 1 \quad (6.1)$$

onde Nj é o número da célula unitária, e o subscrito 0 indica os parâmetros na entrada.

As velocidades superficiais de líquido e gás são determinadas com o medidor de Coriolis e o rotâmetro, respectivamente. No entanto estas velocidades superficiais são determinadas para cada instante de tempo Δt e não para cada célula unitária. Assim, considera-se que a velocidade superficial de líquido é constante para todas as células unitárias.

$$j_{L0}^{Nj} = \frac{\sum_1^{Nj} j_L}{Nj} \quad (6.2)$$

Considera-se que a velocidade superficial do gás j_{G0}^N varia para cada célula unitária e a velocidade superficial do gás é calculada a partir da equação do balanço de massa dada por:

$$j_{G0}^{Nj} = U_{T0}^{Nj} R_{GB0}^{Nj} \frac{L_{B0}^{Nj}}{L_U^{Nj}} \quad (6.3)$$

Na Tabela 6-3 é mostrada a lista de entrada gerada a partir dos dados experimentais, estes dados são ingressados no programa *Slug Tracking*, esses dados entram em sequência.

Tabela 6-3 Condição inicial de entrada para escoamento ar-água

j_{G0}	j_{L0}	L_{B0}	L_{S0}	R_{GB0}	R_{LS0}
0,6933	1,0001	0,3411	0,2208	0,5612	1,0000
0,6725	1,0001	0,2985	0,1460	0,5609	1,0000
0,3397	1,0001	0,1084	0,1699	0,4085	1,0000
0,9815	1,0001	0,4145	0,0892	0,5588	1,0000
0,8824	1,0001	0,4803	0,2289	0,6105	1,0000
0,6415	1,0001	0,2671	0,2282	0,5301	1,0000
0,8078	1,0001	0,3049	0,1146	0,5462	1,0000
0,8520	1,0001	0,4972	0,2109	0,6101	1,0000

6.4 Resultados numéricos

Nesta seção é apresentada a comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais para escoamento bifásico ar-água em padrão de golfadas com uma leve mudança de direção para as condições A@W#1, A@W#5, A@W#8 e A@W#11; os resultados para as demais testes são mostrados no Anexo A.

6.4.1 Valores médios ao longo do duto

As Figura 6-8, Figura 6-9, Figura 6-10, e Figura 6-11 apresentam os resultados médios ao longo da tubulação para as simulações numéricas e os experimentos. Nestas figuras são apresentadas as variações dos comprimentos da bolha alongada e do pistão, velocidade de translação da bolha e pressão ao longo das estações de medida distribuídas ao longo da tubulação, e linhas verticais tracejadas indicando a região do cotovelo. As variações das médias do pistão de líquido e da bolha alongada estão diretamente ligadas aos fenômenos da coalescência de líquido, o efeito geométrico e o acúmulo de líquido na região do cotovelo, sendo que este último fenômeno produz a geração do novo pistão e o crescimento do pistão precedente.

Na Figura 6-8 é observado um decremento da média do comprimento da bolha e um incremento do pistão de líquido da Estação 2 à Estação 3. Estas variações estão ligadas ao acúmulo de líquido na região da mudança. O decremento da média da bolha alongada é devido à quebra da bolha alongada na região do cotovelo ocasionada pelo acúmulo de líquido. Por outro lado, o incremento da média do pistão de líquido é devido também ao acúmulo de líquido .

A Figura 6-8 mostra que as simulações numéricas e os testes experimentais capturam o fenômeno de coalescência da quebra da bolha alongada e o incremento da média do pistão de líquido. A quebra da bolha foi filmada na região do cotovelo, e foi apresentada anteriormente na Figura 6-7. No entanto o modelo matemático não captura bem a média no comprimento do pistão e na bolha alongada na última estação de medição. As comparações dos resultados numéricos e experimentais variam com uma discrepância menor que 12.75%, com exceção da comparação dos resultados do comprimento da bolha e do pistão de líquido têm uma discrepância de 19.6% e 19.3%, respectivamente.

O incremento da média do comprimento do pistão de líquido entre a Estação 2 à Estação 3 é mostrado nas Figura 6-9, Figura 6-10, e Figura 6-11. Tal incremento pode ser ocasionado pelo fenômeno do acúmulo de líquido na região do cotovelo.

O incremento da média do comprimento da bolha alongada quando o escoamento muda de trecho é devido ao fato da bolha alongada aumentar sua velocidade ao passar de um trecho horizontal a um trecho inclinado ascendente. Por outro lado este incremento também pode ser ocasionado pelo fenômeno de coalescência das bolhas alongadas. Este incremento da média da bolha alongada é observado nas Figura 6-9, Figura 6-10, e Figura 6-11.

Nas Figura 6-9, Figura 6-10 e Figura 6-11 mostram uma boa concordância com os testes experimentais e os resultados apresentam uma discrepância menor de 9.6%, com exceção da Estação 4 na qual a simulação numérica e os testes experimentais mostram uma maior discrepância nos resultados de comprimento médio da bolha alongada e no pistão de líquido na quarta estação. Na Figura 6-9 a discrepância dos resultados numéricos e experimentais do comprimento do pistão é 11.9%. Na Figura 6-10 esta discrepância é de 20.5% e na Figura 6-1 esta discrepância é 19.4%.

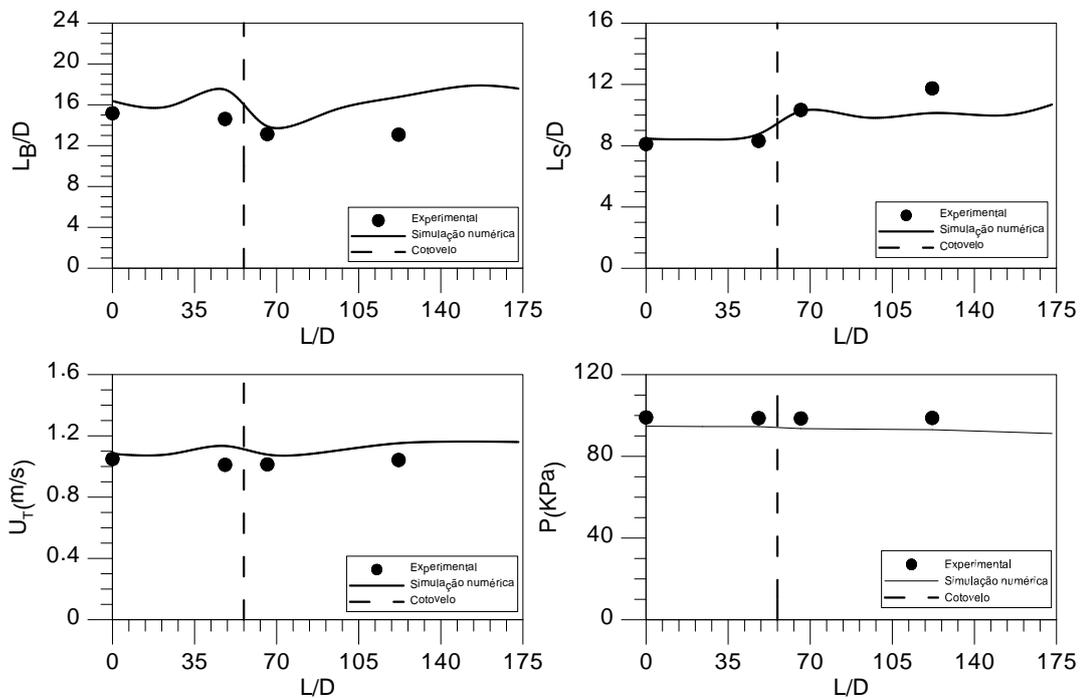


Figura 6-8-Resultados médios para A@W#1 ($j_L=0,500$ e $j_G=0,356$)

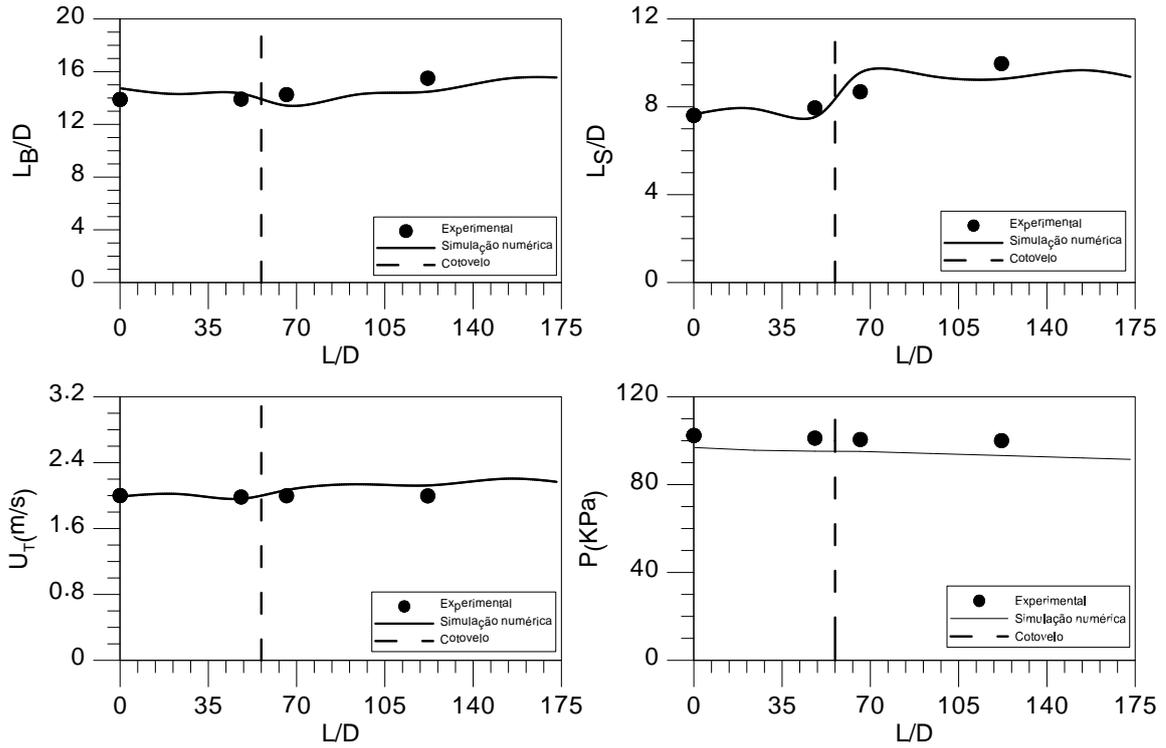


Figura 6-9-Resultados médios para A@W#5 ($j_L=1,000$ e $j_G=0,717$)

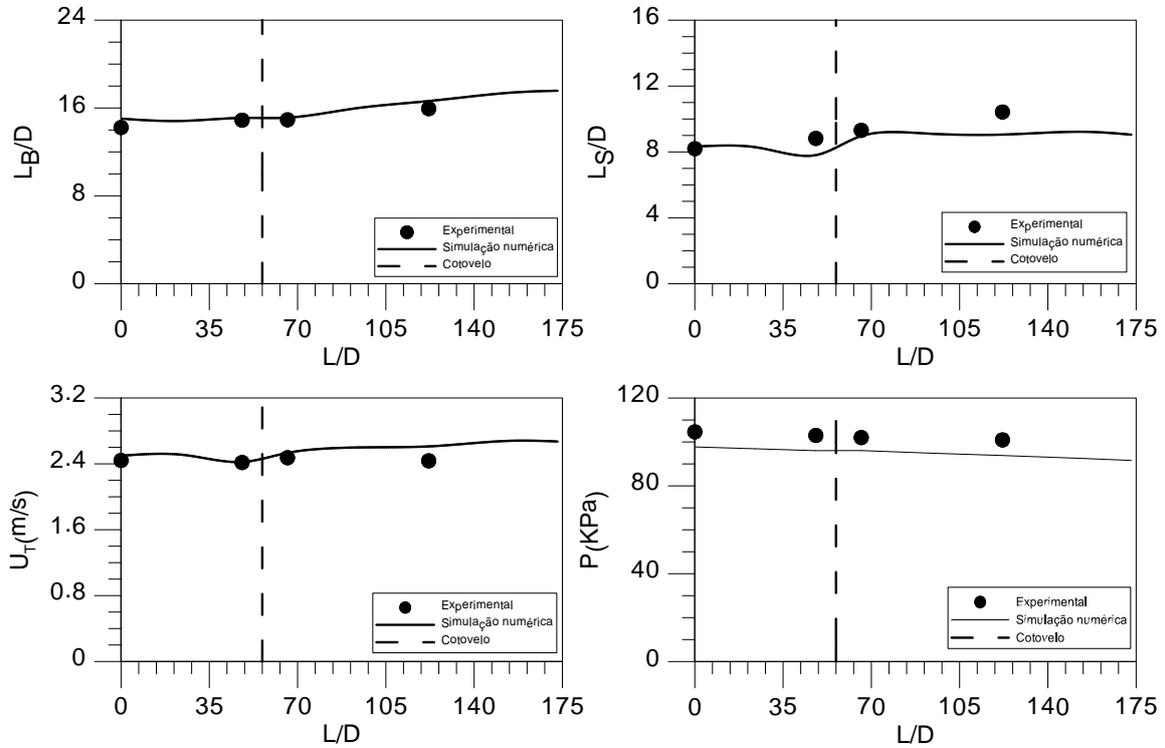


Figura 6-10-Resultados médios para A@W#8 ($j_L=1,250$ e $j_G=0,835$)

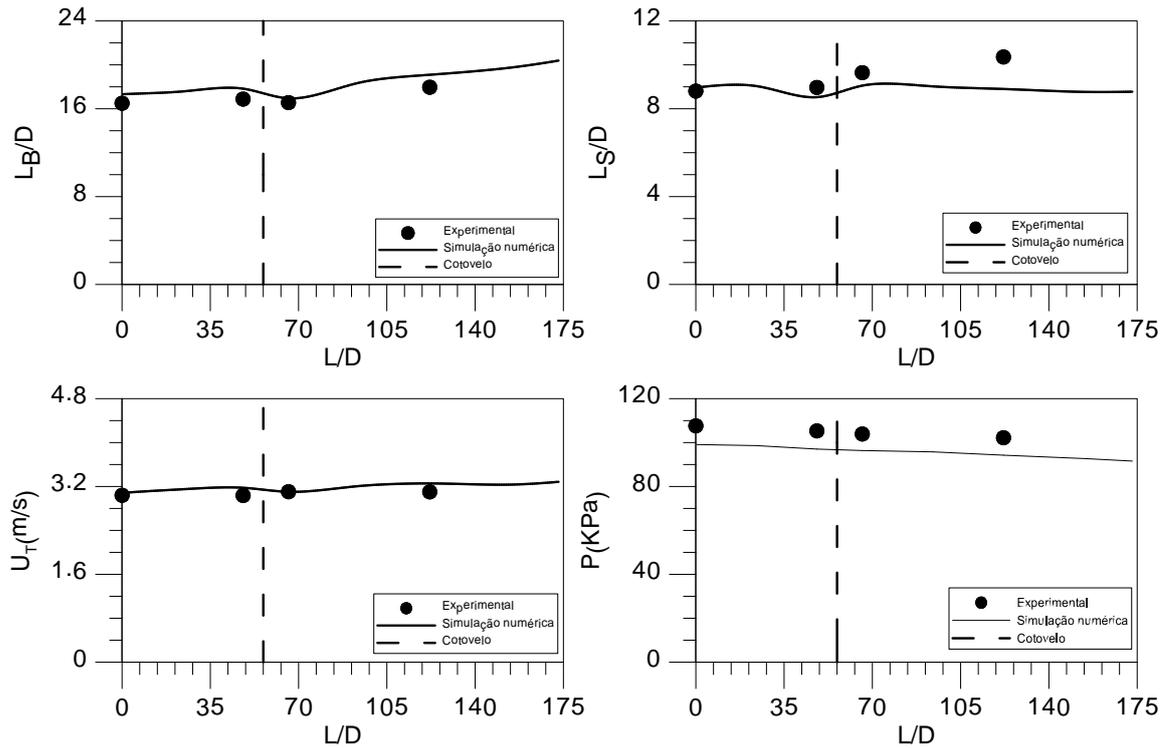


Figura 6-11-Resultados médios para A@W#11 ($j_L=1,500$ e $j_G=1,070$)

Os resultados experimentais e das simulações numéricas das médias do comprimento da bolha, do pistão da velocidade de translação da bolha e da pressão mostram que o modelo desenvolvido captura o fenômeno da mudança de direção. No entanto, os resultados das médias do comprimento da bolha alongada e do pistão de líquido apresentam uma maior diferença como máximo um 20%.

6.4.2 PDFs ao longo do duto

Nas Figura 6-12, Figura 6-13, Figura 6-13 e Figura 6-15, são apresentadas as funções de densidade de probabilidade (PDF) dos comprimentos do pistão de líquido, bolha alongada e da velocidade de translação da bolha em cada seção de teste. São apresentados os resultados para as estações 2, 3 e 4.

A Figura 6-12 apresenta o caso A@W#1, no qual ocorre a quebra da bolha alongada. Os resultados experimentais e numéricos das distribuições de comprimento do pistão da Estação 2 e Estação 3 ficam bem próximos. Por outro lado os resultados o comprimento do pistão na Estação 4 os resultados numéricos e experimentais ficam similares. No entanto, os resultados das simulações numéricas

e os testes experimentais para o comprimento da bolha nas Estações 2, 3 e 4 variam um pouco.

Nos casos Figura 6-13, Figura 6-13 e Figura 6-15 verifica-se que os resultados da simulação numérica e experimental dos comprimentos da bolha e do pistão são similares.

Nos resultados experimentais para os quatro casos apresentados, as velocidades de translação das bolhas e as distribuições experimentais têm uma maior frequência em torno da média. No entanto, este efeito não ocorre nos resultados da simulação numérica, e os resultados ficam mais espalhados em comparação aos experimentais.

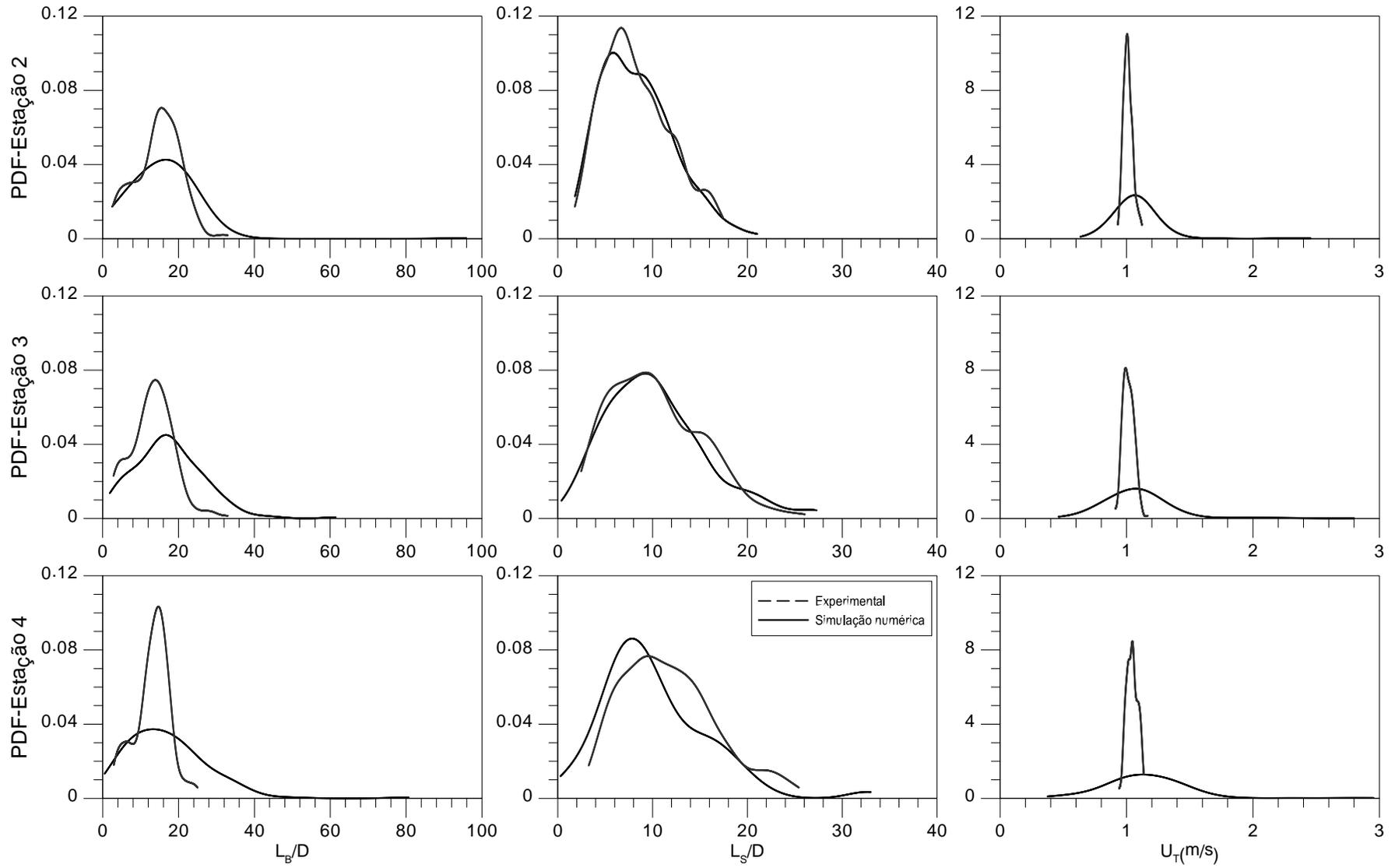


Figura 6-12-PDFs para A@W#1 ($j_L=0,500$ e $j_G=0,356$)

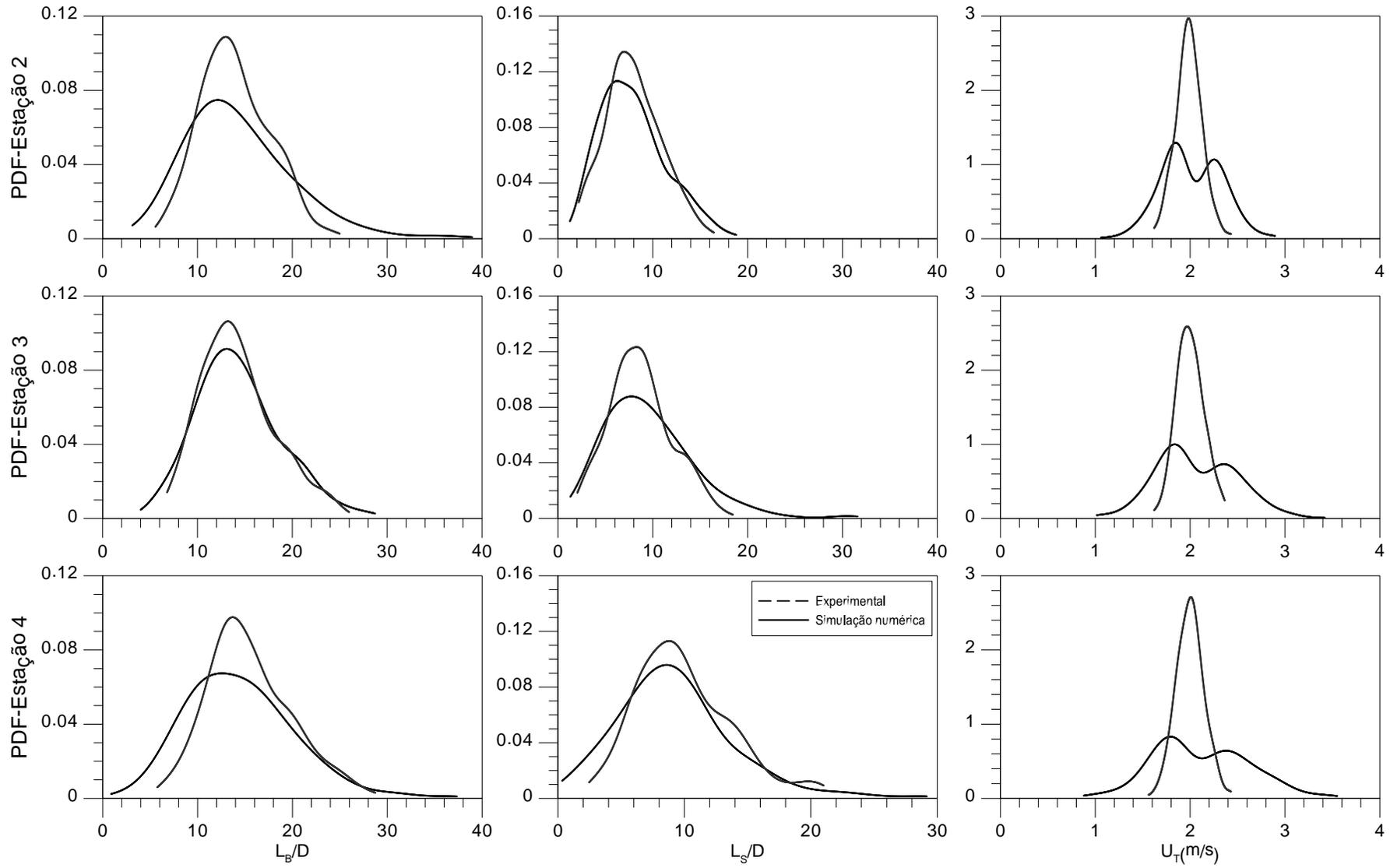


Figura 6-13-PDFs para A@W#5 ($j_L=1,000$ e $j_G=0,717$)

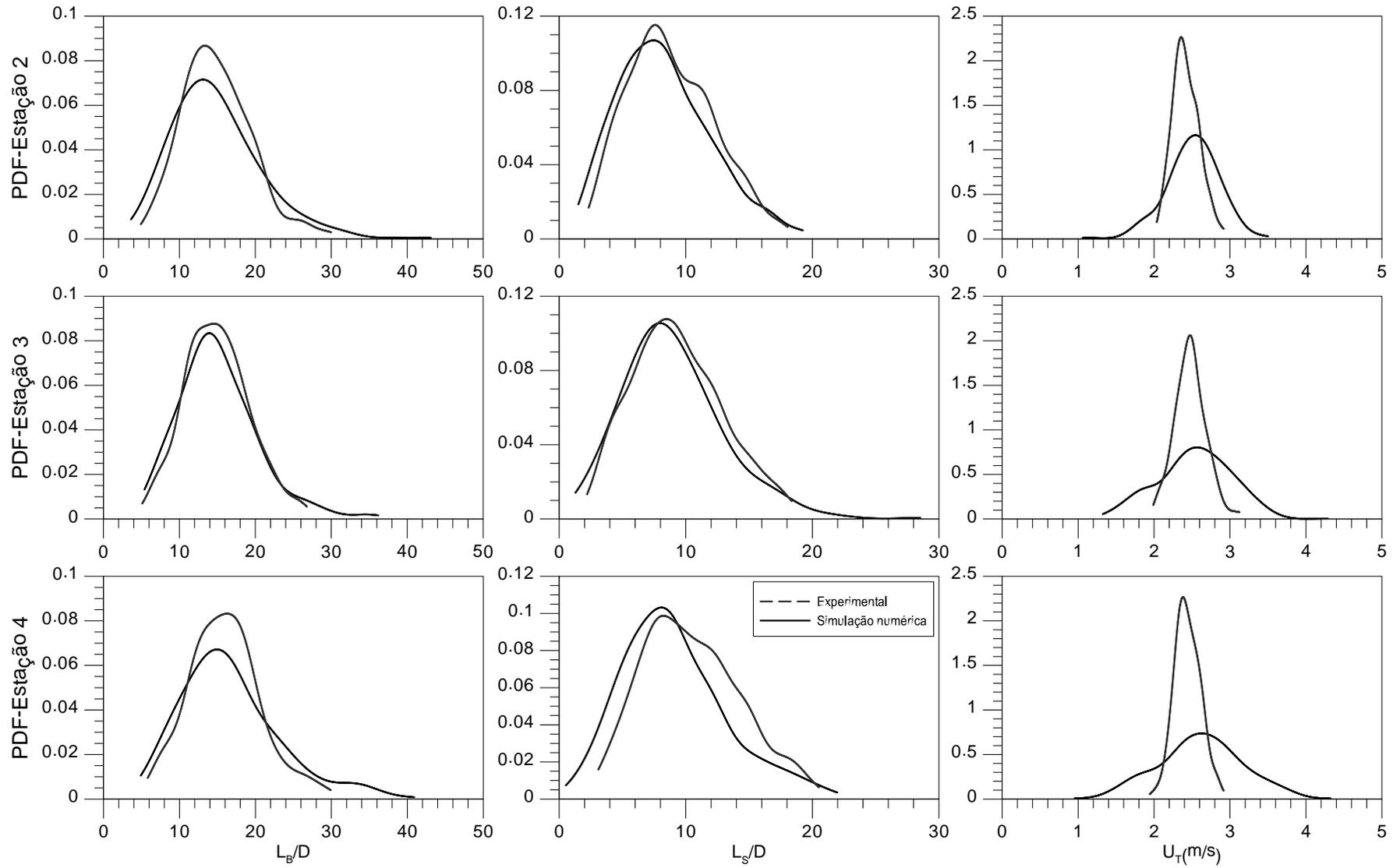


Figura 6-14-PDFs para A@W#8 ($j_L=1,250$ e $j_G=0,835$)

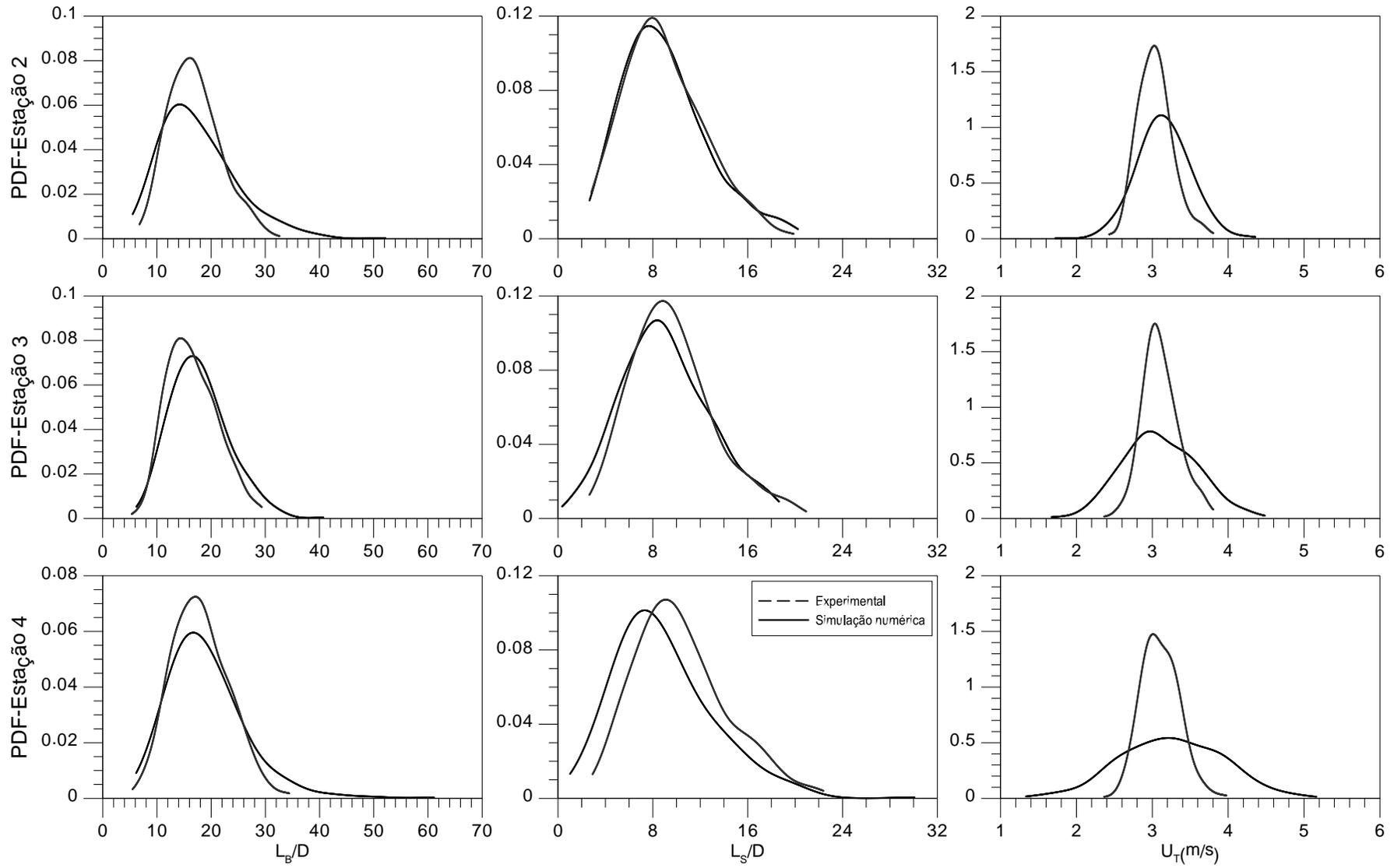


Figura 6-15-PDFs para A@W#11($j_L=1,500$ e $j_G=1,070$)

6.5 Comentários Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos do trabalho em questão. Foi escolhido o melhor fator de corte para o tratamento dos dados experimentais. Também foi apresentada a metodologia de dados de entrada do programa *Slug Tracking*. E, por último, foram apresentados a comparação dos resultados experimentais e os testes experimentais. No próximo capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo numérico-experimental do escoamento em padrão de golfadas com uma leve mudança de direção. O estudo foi feito para uma tubulação horizontal seguida de uma tubulação inclinada ascendente de 7°.

Foi desenvolvido um aprimoramento do modelo de seguimento dos pistões apresentado por Rodrigues (2009), com a finalidade ampliar a capacidade do modelo para prever o comportamento do escoamento quando se produz uma leve mudança de direção na tubulação. O modelo foi implantado utilizando-se a linguagem orientada a objetos Fortran90.

Desenvolveu-se um estudo experimental utilizando o circuito experimental do LACIT/UTFPR. Para extrair os parâmetros característicos do escoamento bifásico líquido-gás, foram utilizados sensores resistivos instalados em quatro estações de medição. Para a verificação do correto funcionamento dos sensores foi colocado uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens posicionada na primeira estação de medida. Também foi colocada outra câmera de alta taxa de aquisição de imagens na região do cotovelo com a finalidade de monitorar o comportamento do escoamento na região da mudança.

Os resultados experimentais e numéricos foram analisados em termos de parâmetros médios e PDFs, nas quatro estações de medição. A evolução desses parâmetros permite a visualização dos efeitos concorrentes como é a coalescência das bolhas ao longo da tubulação e a quebra da bolha alongada na região do cotovelo.

Observou-se experimental e numericamente um decremento do comprimento da bolha alongada na região da mudança de direção em um ponto da grade de testes, sendo que este decremento pode ser devido à quebra da bolha ocasionado pelo acúmulo de líquido na região do cotovelo. No caso em que este acúmulo de líquido não quebre a bolha alongada, tal acúmulo é levado pelo pistão precedente, ocasionando um incremento do pistão na região do cotovelo.

Observou-se experimental e numericamente em outros casos da grade de testes um incremento do comprimento da bolha alongada na região da mudança de direção, sendo que tal incremento pode ser ocasionado pelo fenômeno de

coalescência das bolhas alongadas e o fenômeno geométrico. O primeiro desses fenômenos é ocasionado pela interação das bolhas alongadas e o segundo é ocasionado pelo incremento da velocidade de translação da bolha, o que ocasiona a expansão do comprimento da bolha alongada.

Observou-se experimentalmente que os resultados dos PDFs das velocidades tem uma maior frequência em torno da média e os resultados das velocidades das simulações numéricas ficam mais espalhados quando comparados aos resultados experimentais.

Os resultados experimentais e numéricos na região do cotovelo mostraram que o modelo matemático desenvolvido captura o fenômeno do acúmulo de líquido na região do cotovelo e o efeito geométrico quando o escoamento transita pela região da mudança de direção.

Por fim, o modelo de seguimento de pistões de escoamento em golfadas com uma leve mudança de direção pode ser utilizado como ferramenta para o bom dimensionamento de equipamentos na indústria do petróleo. Ressalte-se a potencial utilização do presente trabalho como referência para trabalhos futuros, objetivando modelar escoamentos bifásicos com diferentes inclinações ao longo da trajetória do duto de transporte.

Em função dos resultados alcançados no presente trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

- Analisar o modelo desenvolvido para outro ângulo de inclinação do segundo trecho e para outras configurações espaciais, com a finalidade de observar o que ocorre fisicamente quando o escoamento muda de direção.
- Analisar o modelo para uma maior faixa de valores de velocidades superficiais de líquido e gás.
- Testar o modelo desenvolvido para outros fluidos com maior viscosidade como petróleo, glicerina, entre outros.

PRODUÇÃO CIENTÍFICA NO PERÍODO (Março 2011 – Setembro 2013)

ARTIGOS EM CONGRESSO:

Título: An Experimental Study on the Development of Gas-Liquid Slug Flows with Direction Change

Autores: Víctor E. L. Parra, Cristiane Cozin, Fausto A. A. Barbuto, Rigoberto E. M. Morales, Carlos A. F. Amaral, Marco J. da Silva

Publicado: 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)

Local: Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil

Data: 03-17 de Novembro de 2013

Resumo: *Slug flow is the most common flow pattern occurring in the transportation of gas-liquid two-phase mixtures in pipes. This flow pattern is characterized by the alternation of liquid slugs and elongated bubbles whose lengths and velocities change in space and time. Slight direction changes in pipe inclination make these liquid slugs to grow or, quite often, generate new ones by bubble break-up. Other phenomena, as deceitful as intriguing and fascinating, may happen upon the change in direction at some specific in situ liquid and gas flow rate combinations. Briefly stated, slug flow is rather complex pattern worthy of a careful and detailed study. An experimental work aimed at capturing the essence of these flows and their physical behaviour was carried out. A transparent, 1-inch OD pipe with 9 metres of length and a direction change of 7 degrees upward was used to carry an air-water mixture at different flow rates, all within the slug flow occurrence zone. Four probing stations with parallel resistive wire sensors were installed at pre-defined positions along the pipe. The objective of these sensors was to measure important flow parameters such as the bubble and slug lengths velocities and lengths and the gas and liquid volume fractions. High speed cameras to capture the whole transit of the slug units were positioned at two observation stations, one at a horizontal section and another at the very point where direction change occurred. The images captured by this camera brought out misleading behaviours that signal processing alone could not explain. Data signals from the experiment were recorded to large mass storage media, thus*

building a quite extensive data base. The PDF technique was used to analyze the flow data, revealing peculiar and noteworthy results.

Título: Numerical simulation of slight direction changes in two-phase flows using a slug tracking model

Autores: Carlos L. Bassani, Marco G. Conte, Victor E. L. Parra, César D. Perea M, Cristiane Cozin, Rigoberto E. M. Morales.

Publicado: 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering.

Local: Rio de Janeiro, Brazil.

Data: 18-22 de Novembro de 2012

Resumo: Slug flow in pipes is a quite common flow pattern occurring in many industrial applications, most notably in the transportation of two-phase mixtures of oil and natural gas in offshore pipelines. The slug flow pattern is characterized by intermittent liquid slugs and elongated bubbles, whose lengths and velocities change in space and time. Hilly terrain effects influence flow parameters due to slight direction changes on the sea floor, making slugs to grow or generating new ones. These changes affect the pressure drops and are paramount in the design of production facilities. The present work introduces a mathematical model for the liquid accumulation due to horizontal-to-slightly inclined direction changes, analyzing only the slug growth. The aforementioned model attempts to describe the phase fraction changes in the liquid slug and in the elongated bubble and is coupled to a lagrangian slug tracking model for the prediction of hydrodynamic parameters. The results were compared to experimental data, and a good agreement has been obtained.

8 REFERÊNCIAS

- Amaral, C. E., Alves, R. F., da Silva, M., Arruda, L., Dorini, L., Morales, R., et al. (2013). Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows. *Flow Measurement and Instrumentation*.
- Al-Safran, E. M., Sarica, C., Zhang, H., & Brill, J. (2005). Investigation of slug flow characteristic in valley of a hilly terrain pipeline. *International Journal of Multiphase Flow*, 31, 337-357.
- Al-Safran, E., Taitel, Y., & Brill, J. P. (2004). Prediction of slug distribution along a hilly terrain pipeline using slug tracking model. *Journal of Energy Resources Technology*, 126(1), 54-62.
- Barbosa, F. (2010). *Estudo do escoamento bifásico padrão golfadas de líquido na transição vertical ascendente-horizontal utilizando um modelo slug-tracking*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Barnea, Y., & Taitel, Y. (1993). A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 19(5), 829-838.
- Bendiksen, K. (s.d.). An Experimental Investigation of the Motion of Long Bubbles in Inclined Tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 10(4), 467-483.
- Conte, M. G., Bassani, C. L., Perea Medina, C., Scorsim, Ó. B., do Amaral, C. E., & Morales, R. E. (2011). Numerical analysis of slug flow for slight changes of direction using slug tracking model. *CILAMCE*.
- De Henau, V., & Raithby, G. D. (1995). A study of terrain-induced slugging in two-phase flow pipelines. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(3), 365-379.
- Dukler, A. E., & Hubbard, M. G. (1975). A model for gas-liquid slug flow in horizontal and nearhorizontal tubes. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 14(4), 337-347.
- Diogo T. Machado, Felipe C. C. L. Hidelbrando, Leonardo Lipinski. (2013). *Sistema Multicanal de Sensor Resistivo para medição do Escoamento Bifásico*. Universidade Tecnológica Federal de Paraná, Curitiba.

- Fagundes Neto, R. C. (1999). *Dynamique de poches de gaz isolées en écoulement permanent et non permanent horizontal T*. Institut National Polytechnique de Toulouse, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, France.
- Fernandes, R. C. (1983). Hydrodynamic model for gás-liquid slug flow in vertical tubes. *American Institute for Chemical Engineers Journal*, 29(6), 981-989.
- Flanklin, E. (2004). *Modelagem numérica para seguimento dinâmico de bolhas em escoamento intermitente horizontal gás-líquido*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Hill, T. J., Nelson, C. J., & Bailey, R. S. (1996). Multiphase production through hilly terrain pipeline in Cusiana Oilfield, Colombia. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition held Denver*, 319-334.
- Mandal, T. K., Bhuyan, M. K., Das, G., & Das, P. (2008). Effect of undulation on gas-liquid two-phase flow through a horizontal pipeline. *Chemical Engineering Research and Design*, 86, 269-278.
- Nydal, O. J., & Banerjee, S. (1995). Dynamic slug tracking simulations for gas-liquid flow in pipeline. *Chemical Engineering Science*, 141, 13-39.
- Pachas, A. A. (2011). *Influência das condições iniciais e relações de fechamento para a simulação do escoamento bifásico em golfadas*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- Rodrigues, H. (2009). *Simulação numérica do escoamento bifásico gás líquido no padrão de golfadas utilizando um modelo lagrangeano de seguimento de pistões*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- Taitel, Y., & Barnea, D. (1990a). Two phase slug flow. *Advances in Heat Transfer*, Harnett J. P. and Irvine Jr. T. F., 20, 83-132.
- Taitel, Y., & Barnea, D. (1990b). A consistent approach for calculating pressure drop in inclined slug flow. *Chemical Engineering Science*, 45(5), 199-1206.
- Taitel, Y., & Barnea, D. (1998). Effect of gas compressibility on a slug tracking model. *Chemical Engineering Science*, 53(11), 2089-2097.
- Taitel, Y., & Barnea, D. (2000). Slug-Tracking model for hilly pipelines. *SEP Journal*, 5(1), 102-109.

- Wallis, G. B. (1969). *One dimensional-two-phase flow*. New York: McGraw-Hil.
- Wood, D. (1991). Mechanistic modeling of terrain-induced slugs in gas/condensate lines. *In: Proceedings of BHRG Multiphase Conference*.
- Yoshisawa, C. J. (2005). *Estudos de modelos para a forma das bolhas em um escoamento intermitente padrão golfadas*. Universidade Federal de Paraná, Curitiba.
- Zheng, G. H., Brill, J. P., & Shoham, O. (1995). An Experimental Study of two-phase slug flow in hilly terrain pipelines. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Washington*, 233-239.
- Zheng, G., Brill, J., & Taitel, Y. (1994). Slug flow behavior in a hily terrain pipeline. *International Journal Multiphase Flow*, 20(1), 63-79.
- Zwanziger, M. (2007). *Inversão de um modelo de célula unitária para medições dos fluxos bifásicos de gás e líquido em escoamento no padrão intermitente*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

APÊNDICE A - FATORES DE CORTE DE ESCOAMENTO EM GOLFADAS

Neste apêndice quatro fatores de corte são apresentados e analisados com o objetivo de escolher o melhor sinal para o sensor gêmeo resistivo. Os fatores de corte utilizados são 0,35; 0,30; 0,25 e 0,20. Com essa finalidade são mostradas as curvas de valores médios e PDF para os quatro fatores de corte testados.

A1) Curvas de valores médios

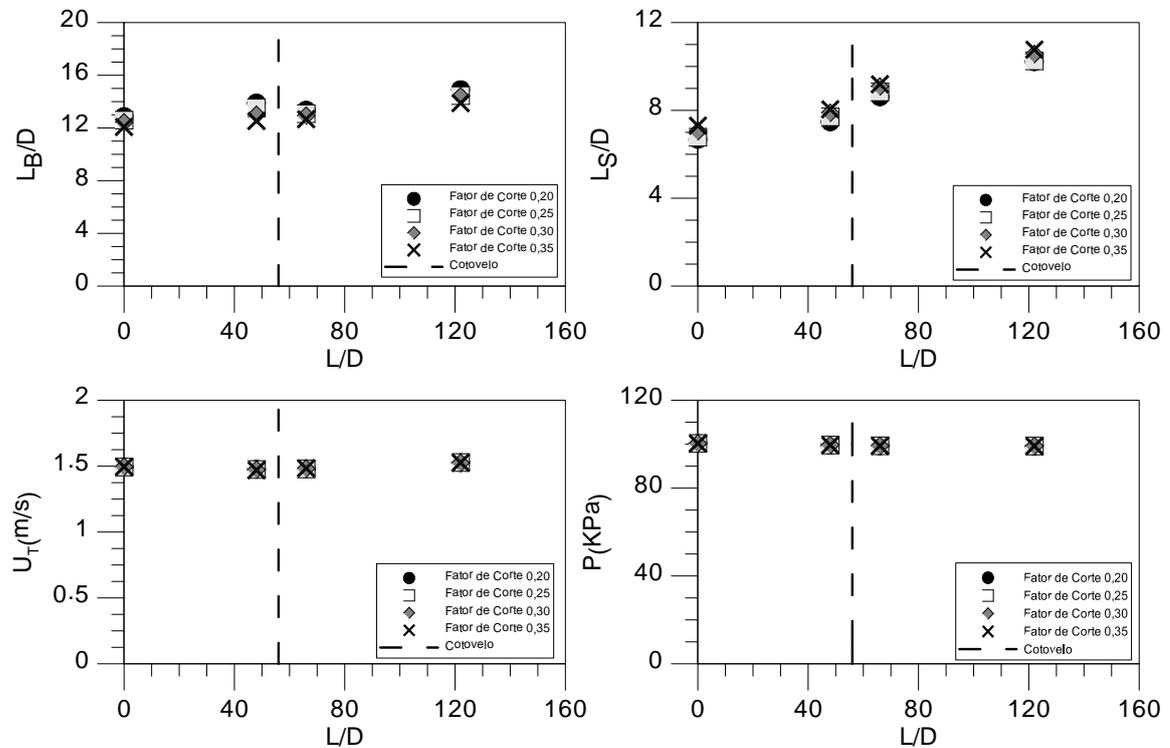


Figura A- 1-Resultados médios para A@W#2 ($j_L=0,700$ e $j_G=0,217$)

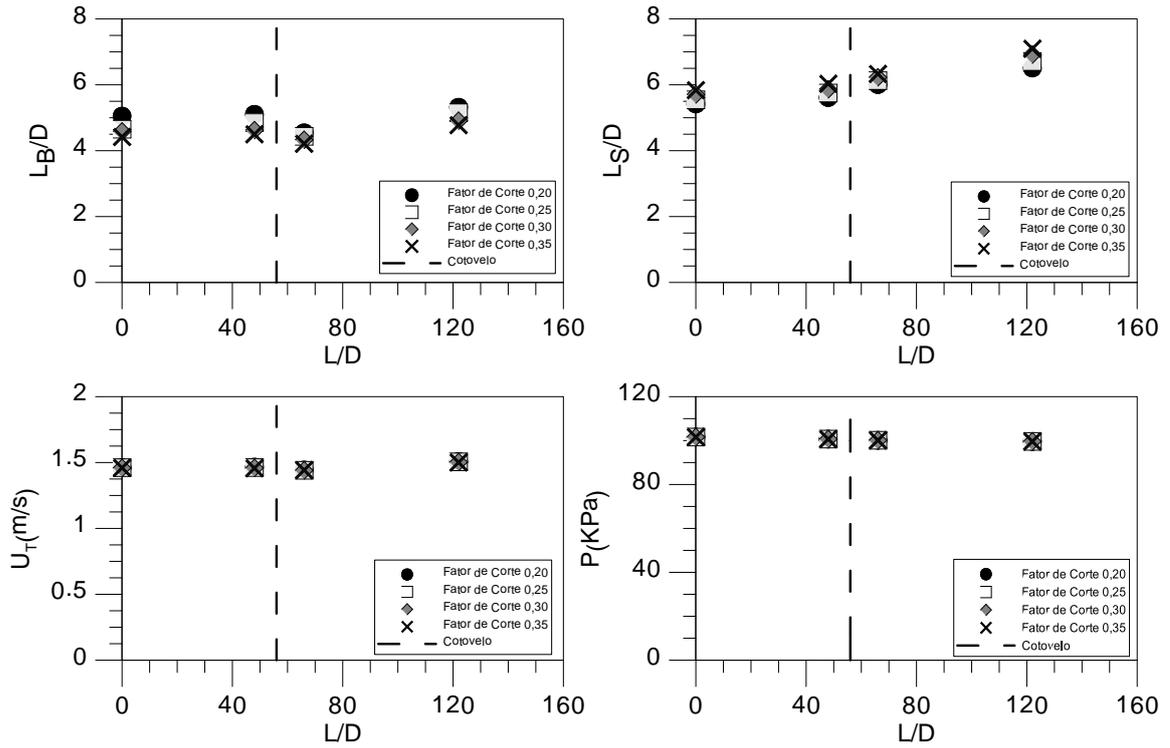


Figura A- 2-Resultados médios para A@W#3 ($j_L=0,750$ e $j_G=0,533$)

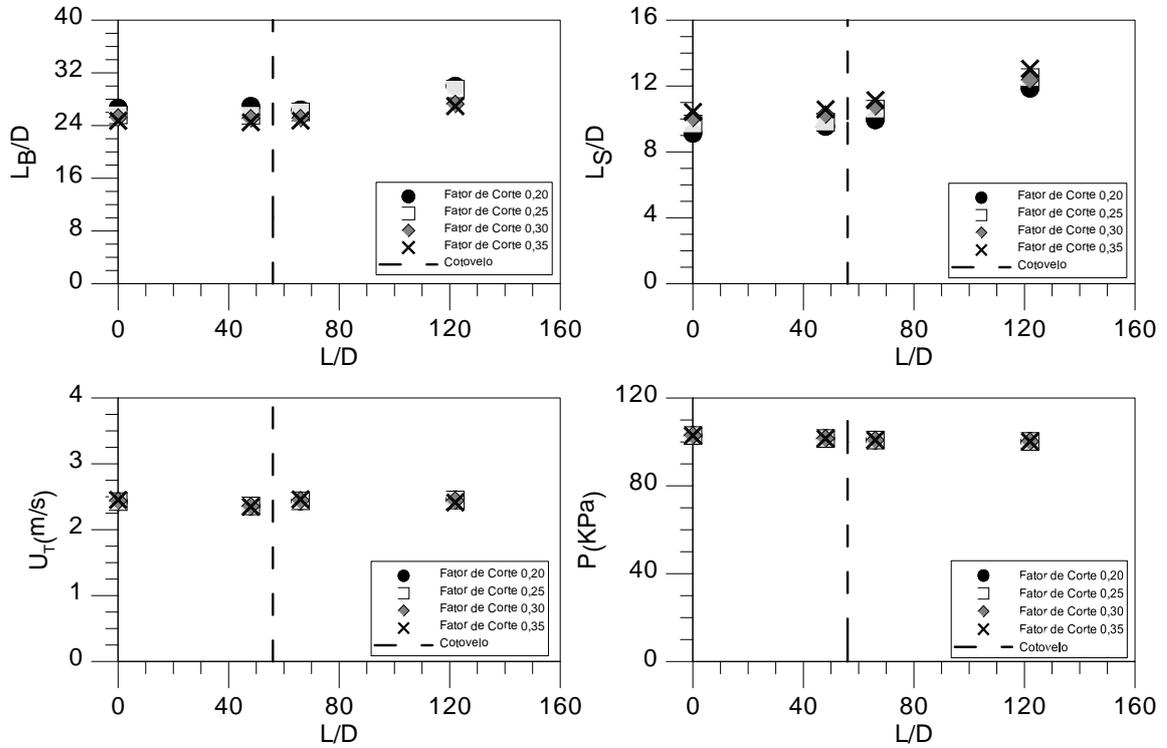


Figura A- 3-Resultados médios para A@W#5 ($j_L=1,000$ e $j_G=0,717$)

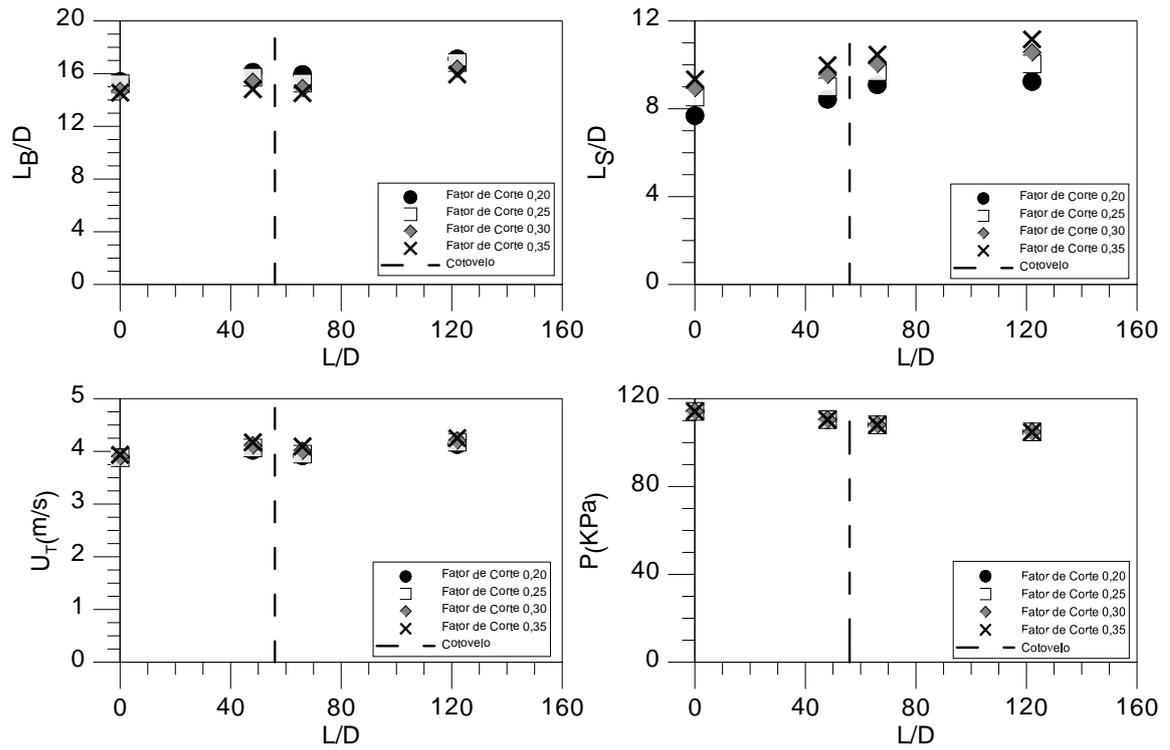


Figura A- 4-Resultados médios para A@W#15 ($j_L=2,000$ e $j_G=1,277$)

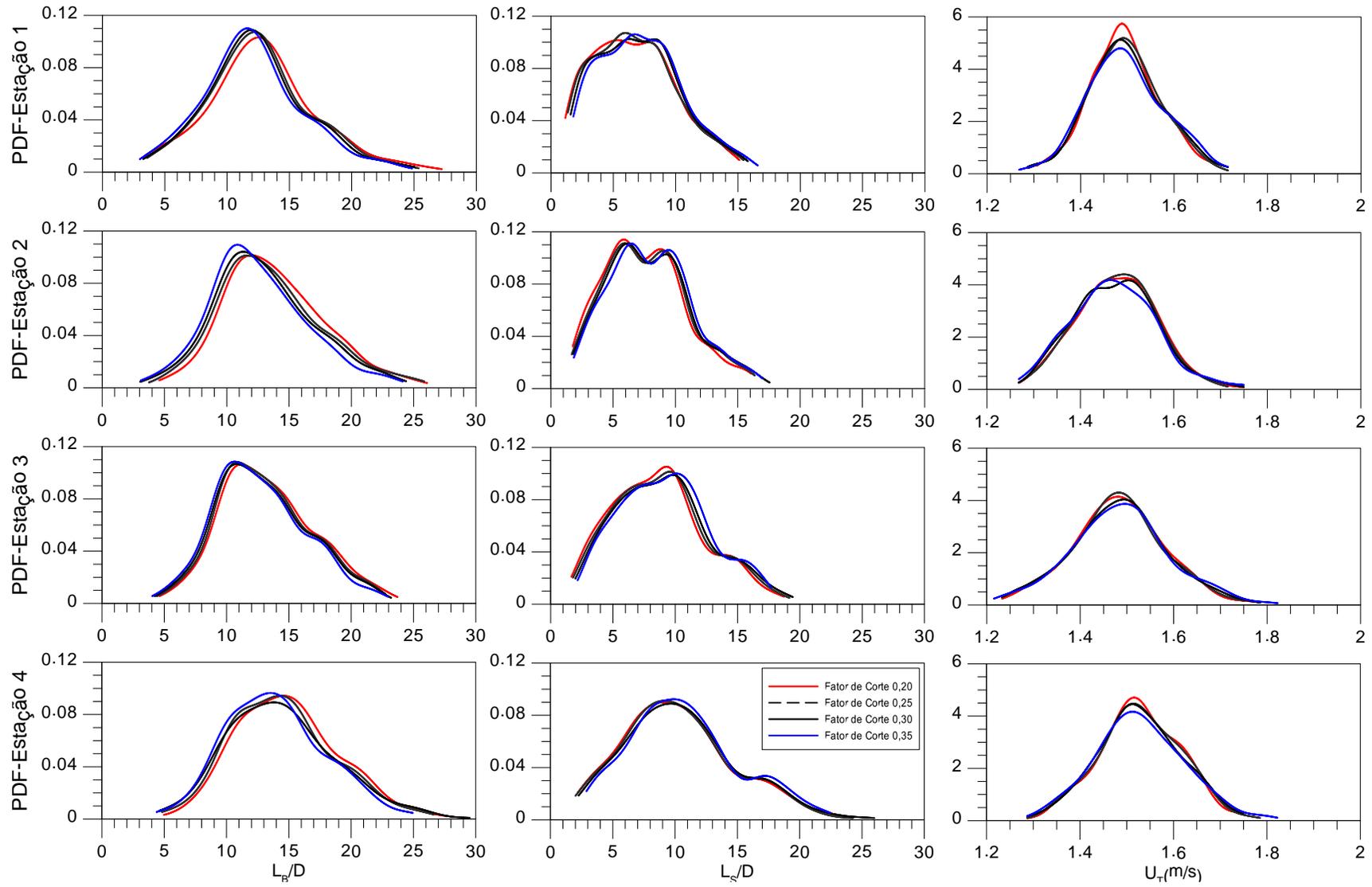


Figura A- 5- PDFs para A@W#2 ($j_L=0,700$ e $j_G=0,217$)

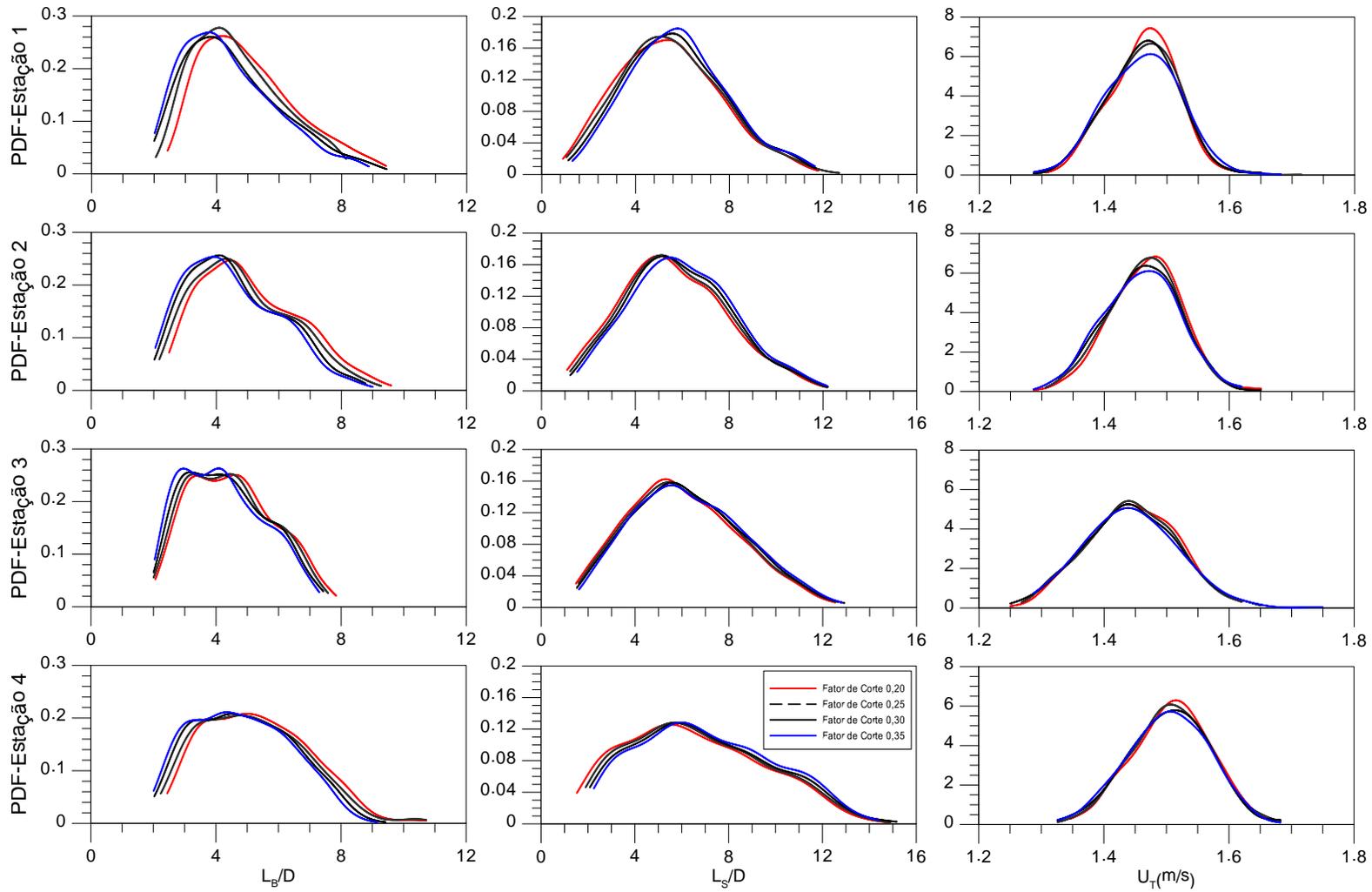


Figura A- 6- PDFs para A@W#3 ($j_L=0,750$ e $j_G=0,533$)

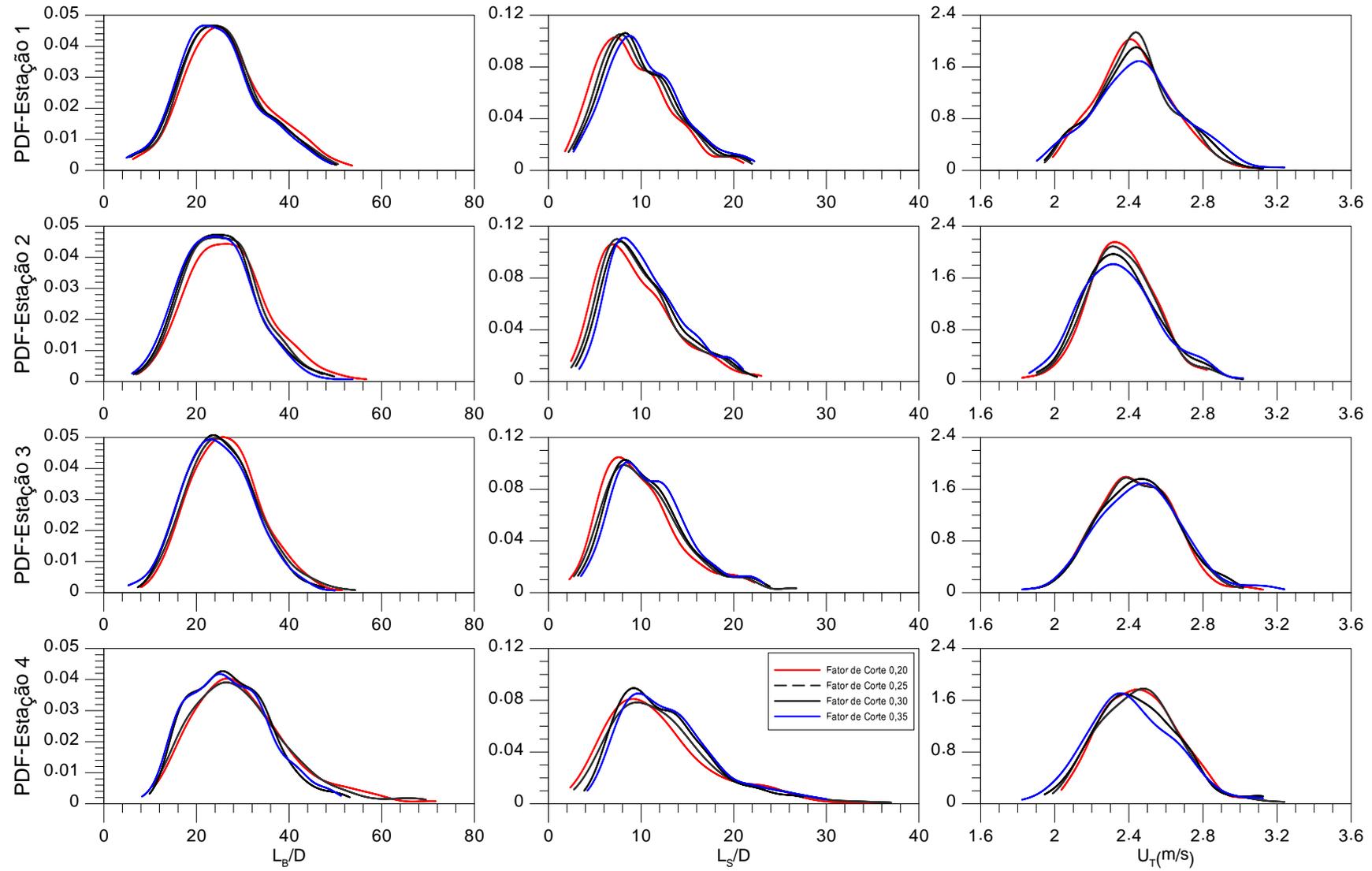


Figura A- 7- PDFs para A@W#5 ($j_L=1,000$ e $j_G=0,717$)

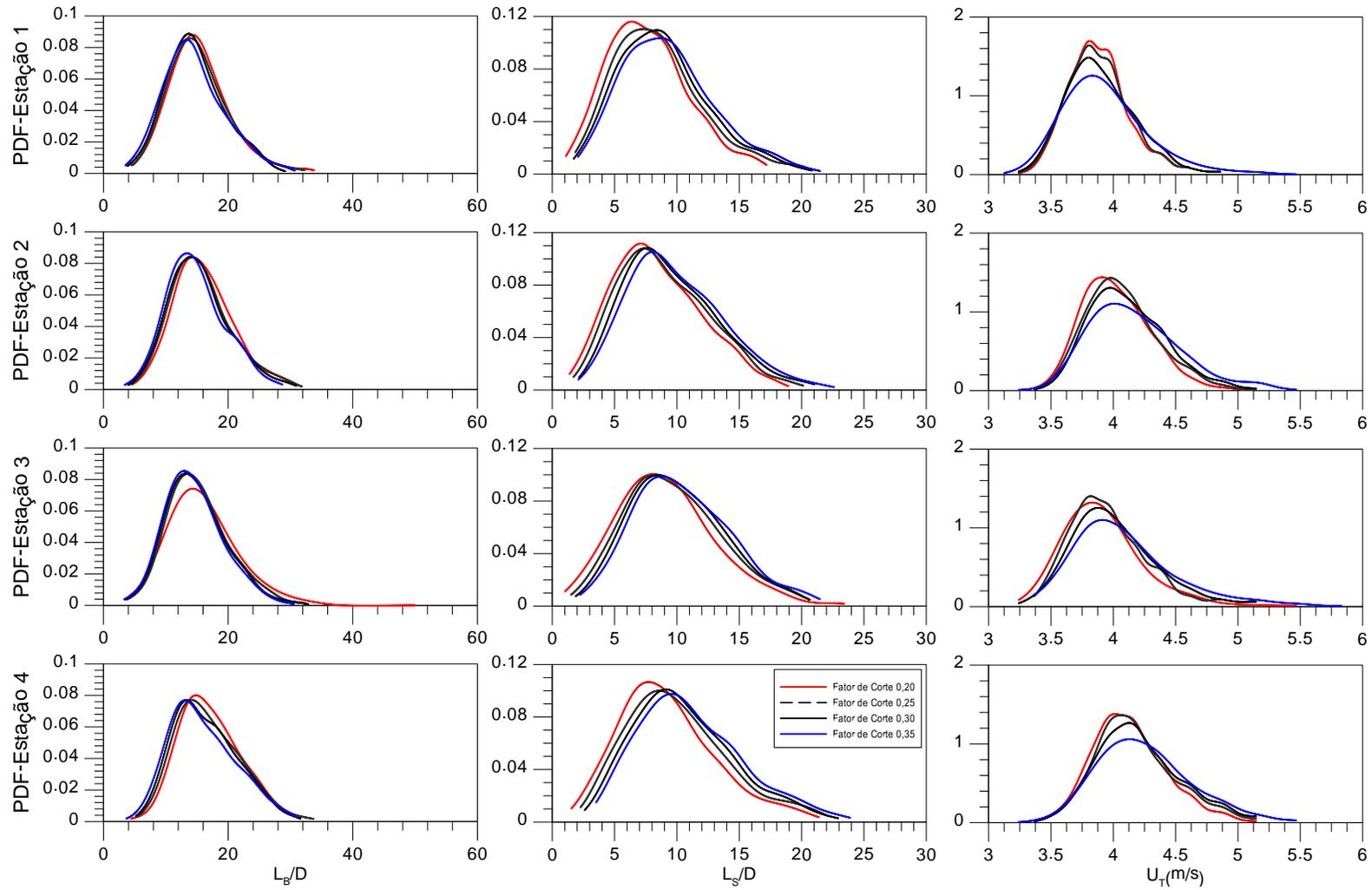


Figura A- 8- PDFs para A@W#15 ($j_L=2,000$ e $j_G=0,410$)

APÊNDICE B – RESULTADOS PARA ESCOAMENTO EM GOLFADAS COM UMA LEVE MUDANÇA DE DIREÇÃO

Este apêndice apresenta os resultados médios e PDFs obtidas para escoamento em golfadas com uma leve mudança de direção que não foram abordados nos capítulos de resultados. De forma geral, os resultados aqui apresentados são semelhantes aos do capítulo que trata dos resultados.

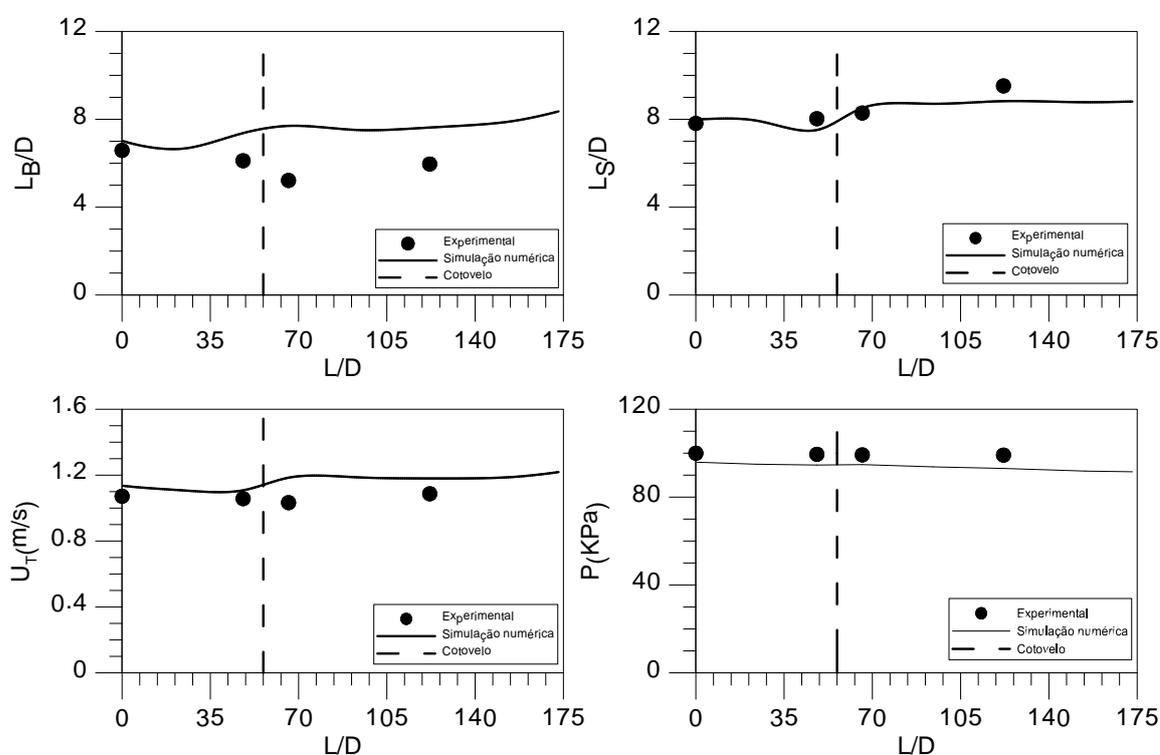


Figura B- 1-Resultados médios para A@W#2 ($j_L=0,700$ e $j_C=0,217$)

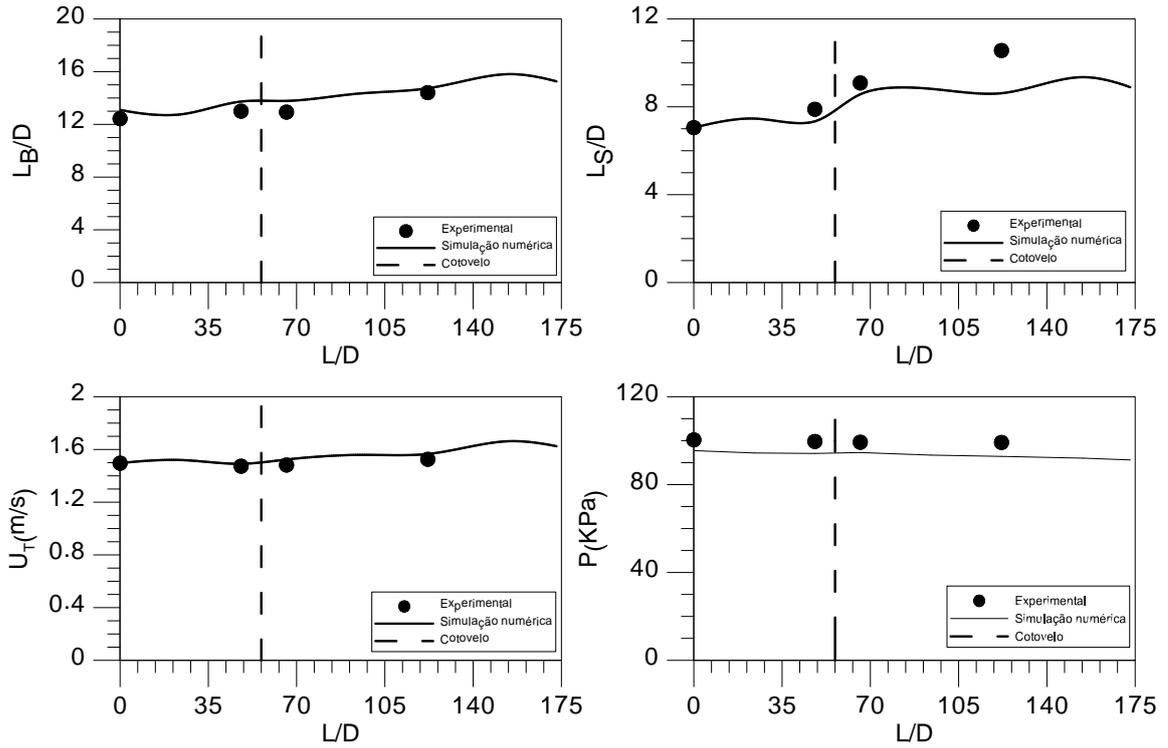


Figura B- 2-Resultados médios para A@W#3 ($j_L=0,750$ e $j_G=0,533$)

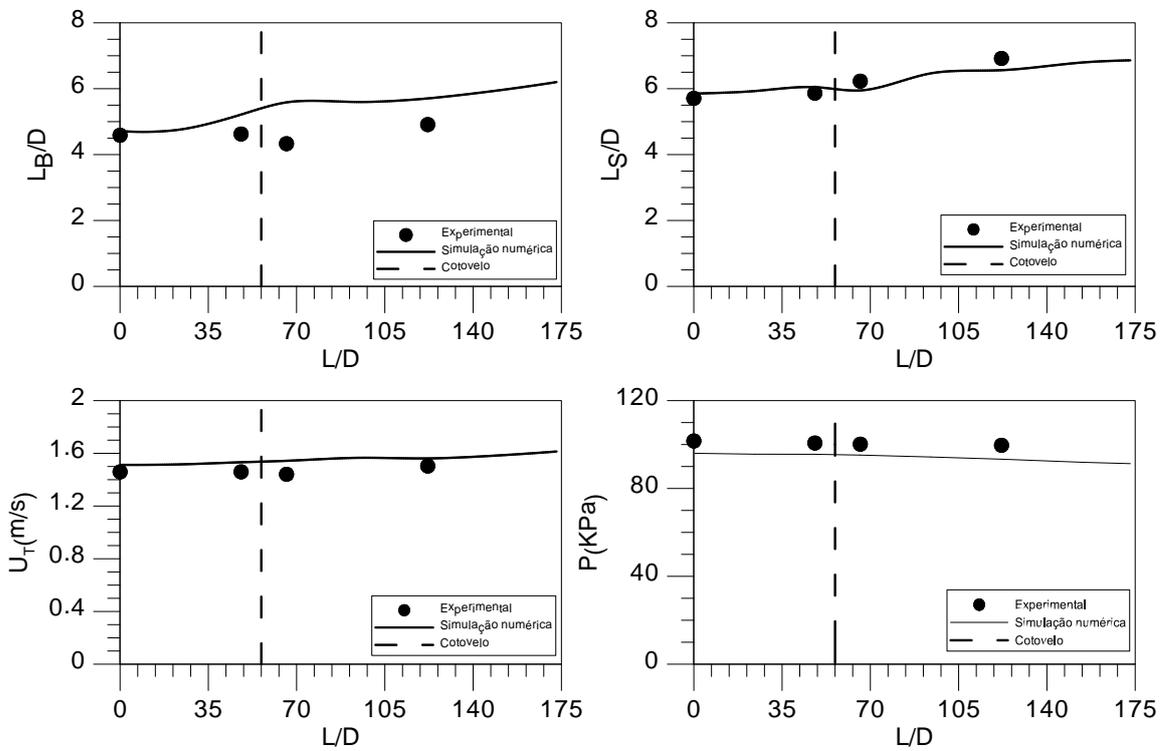


Figura B- 3-Resultados médios para A@W#4 ($j_L=1,000$ e $j_G=0,300$)

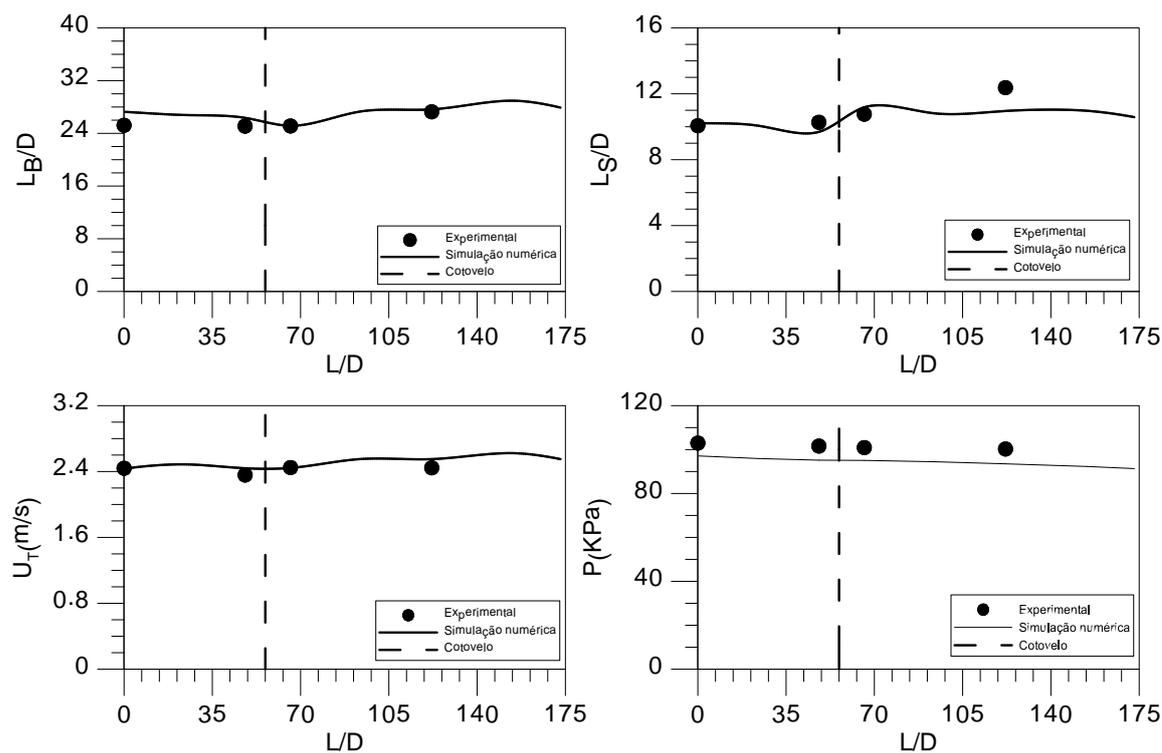


Figura B- 4-Resultados médios para A@W#6 ($j_L=1,000$ e $j_G=1,034$)

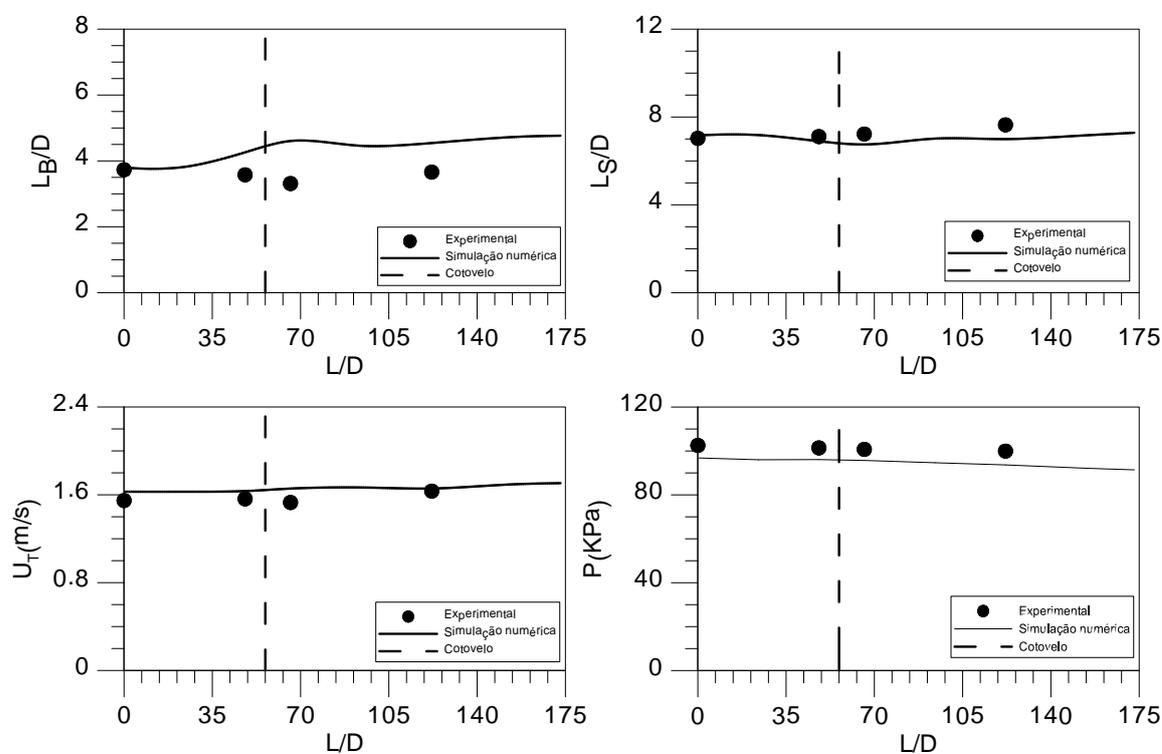


Figura B- 5-Resultados médios para A@W#7 ($j_L=1,200$ e $j_G=0,219$)

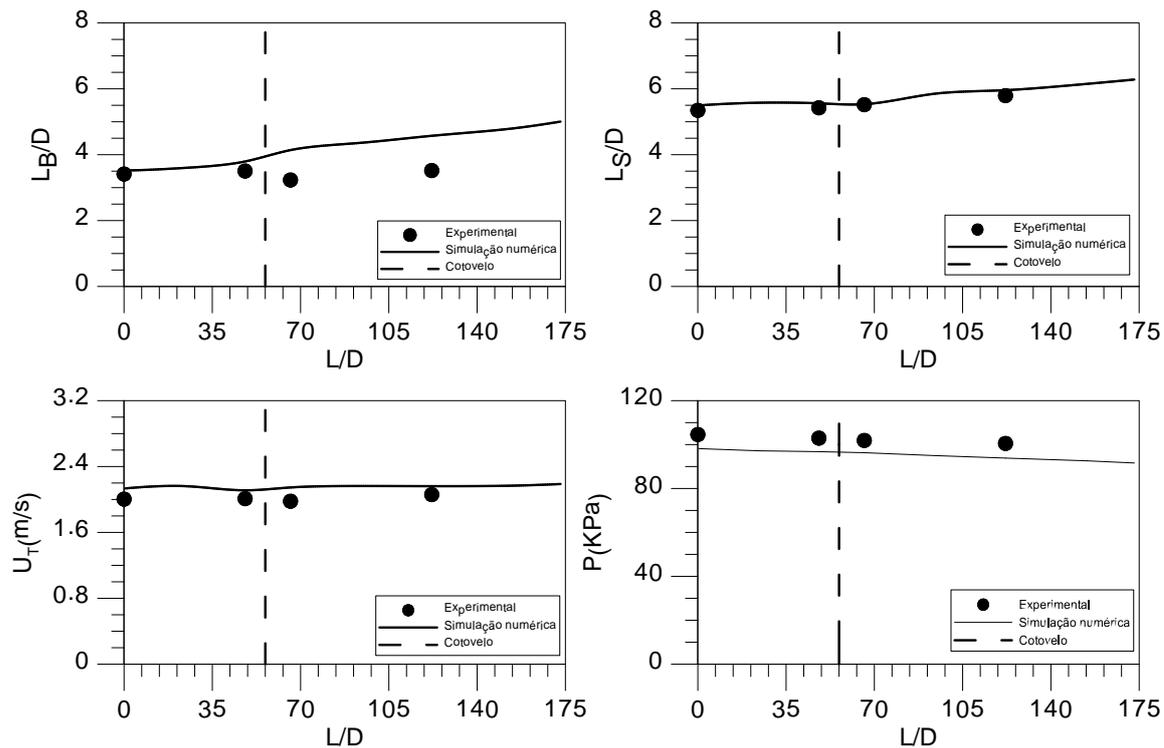


Figura B- 6-Resultados médios para A@W#9 ($j_L=1,500$ e $j_G=0,306$)

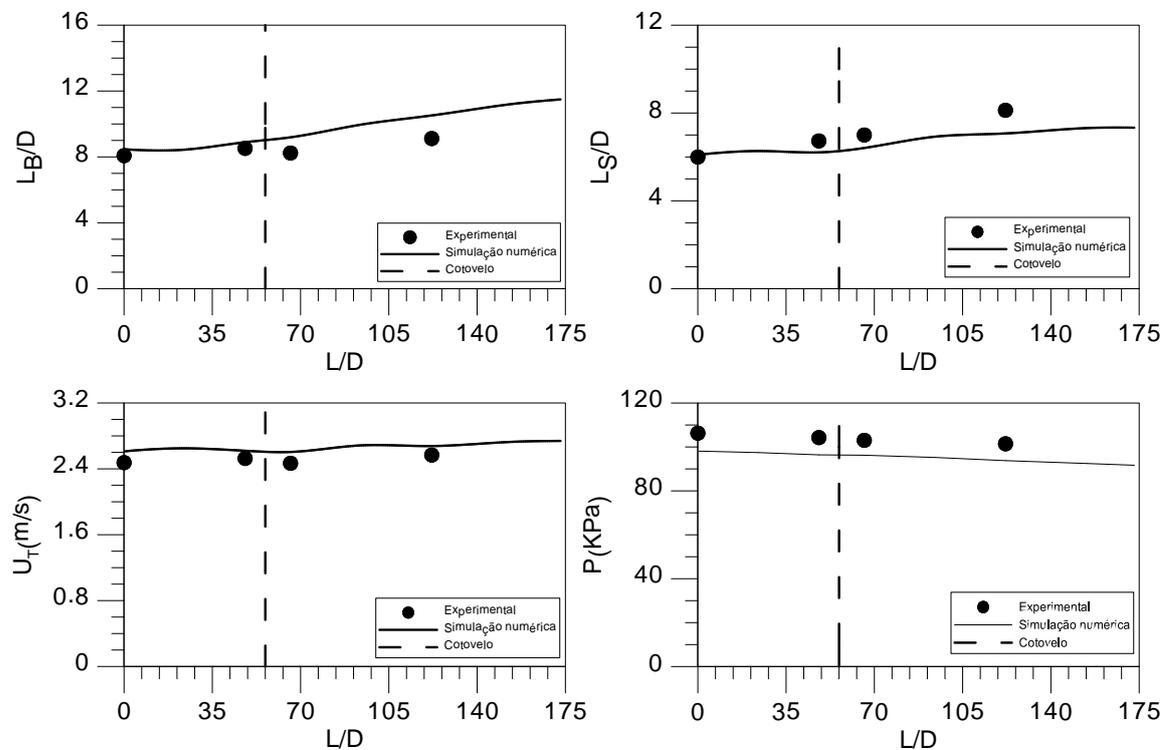


Figura B- 7-Resultados médios para A@W#10 ($j_L=1,500$ e $j_G=0,673$)

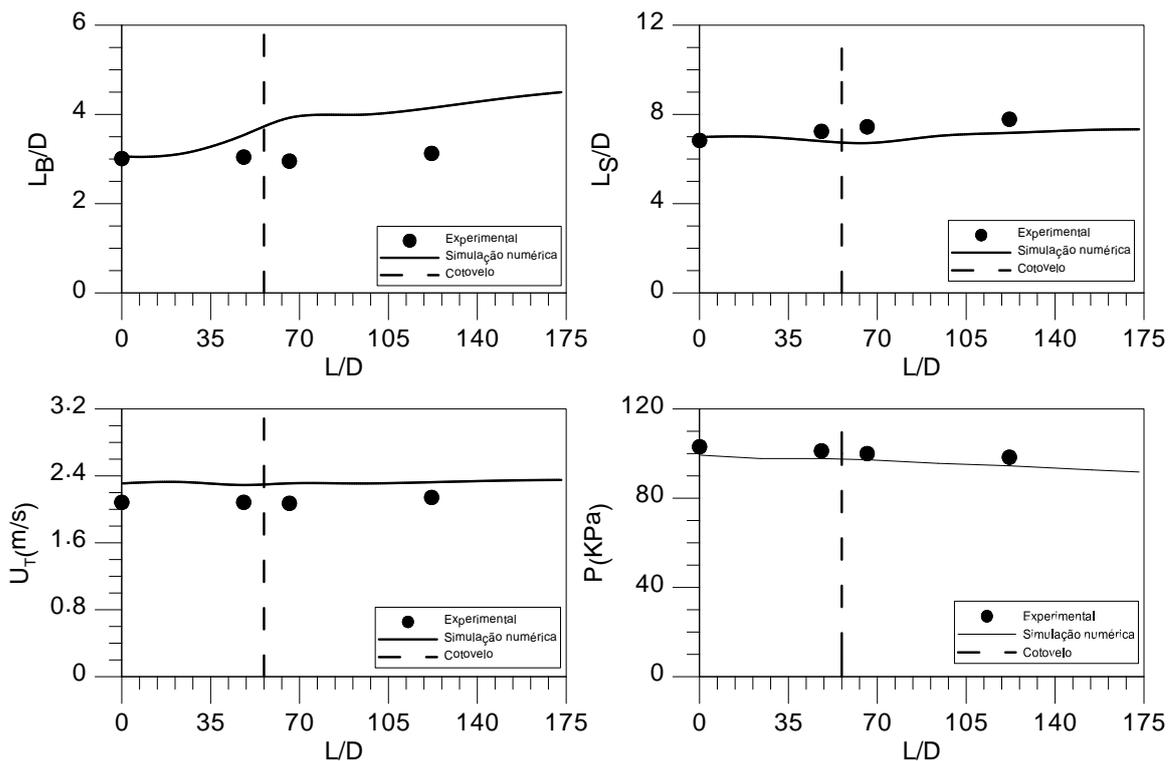


Figura B- 8-Resultados médios para A@W#12 ($j_L=1,700$ e $j_G=0,244$)

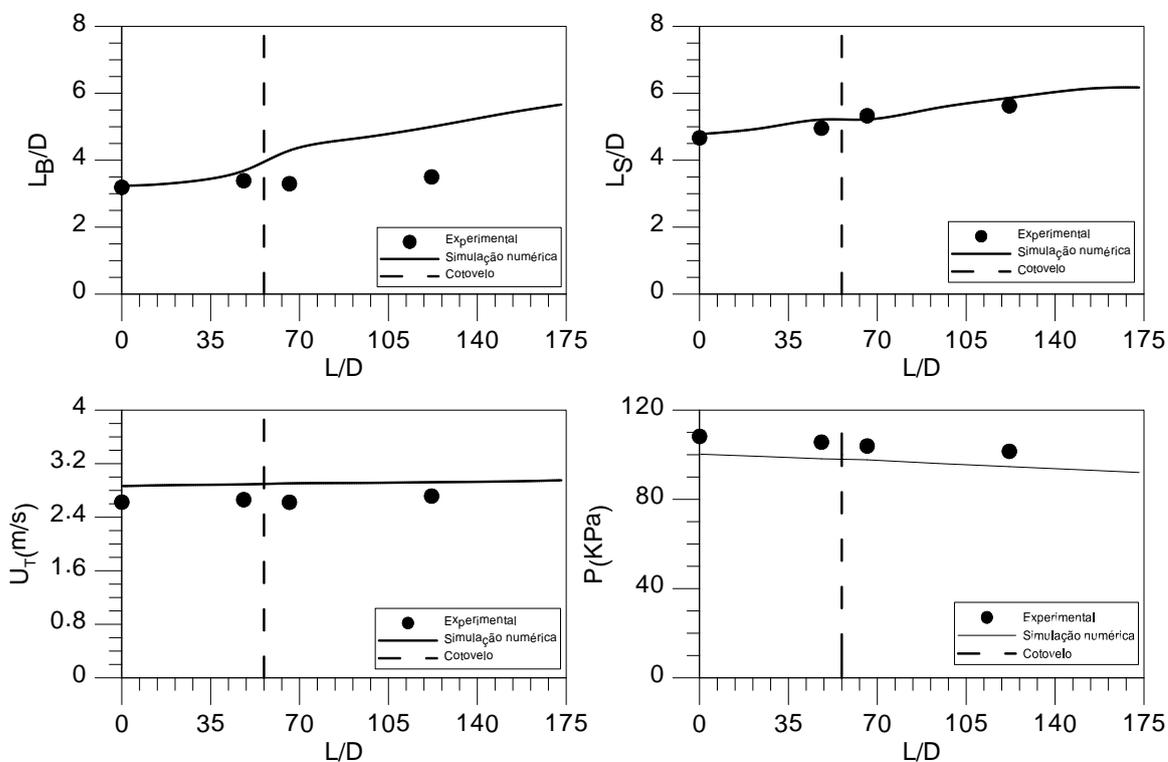


Figura B- 9-Resultados médios para A@W#13 ($j_L=2,000$ e $j_G=0,390$)

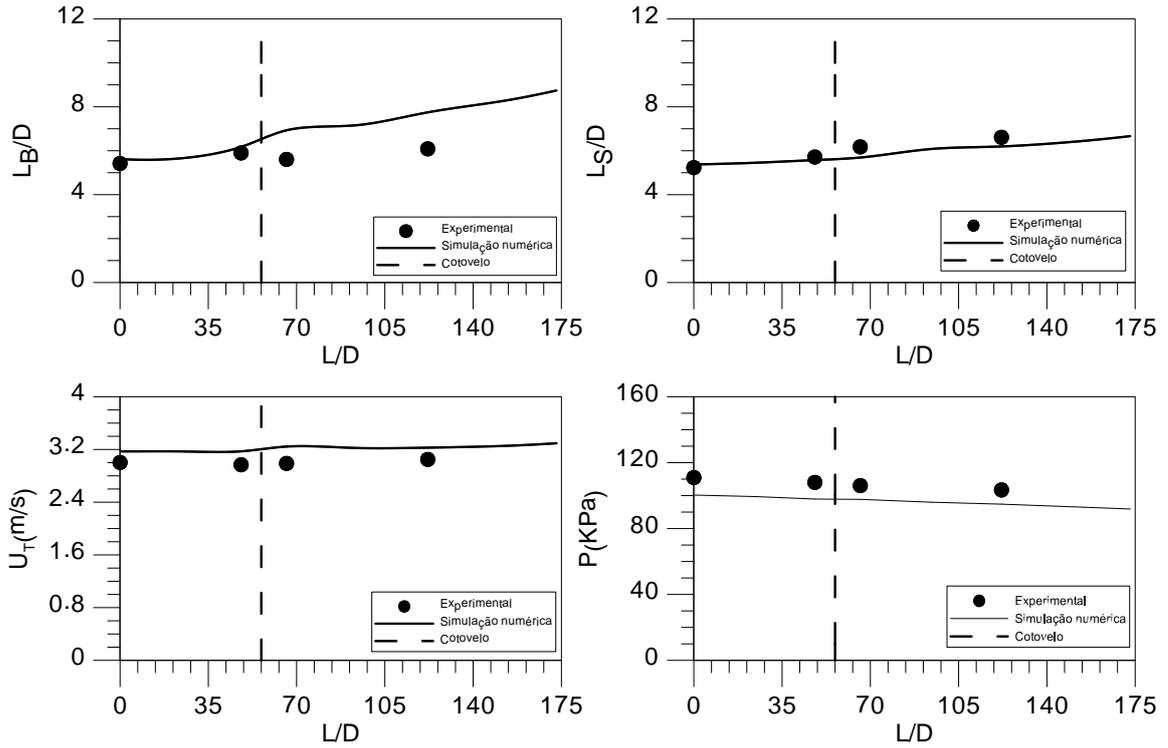


Figura B- 10-Resultados médios para A@W#14 ($j_L=2,000$ e $j_G=0,638$)

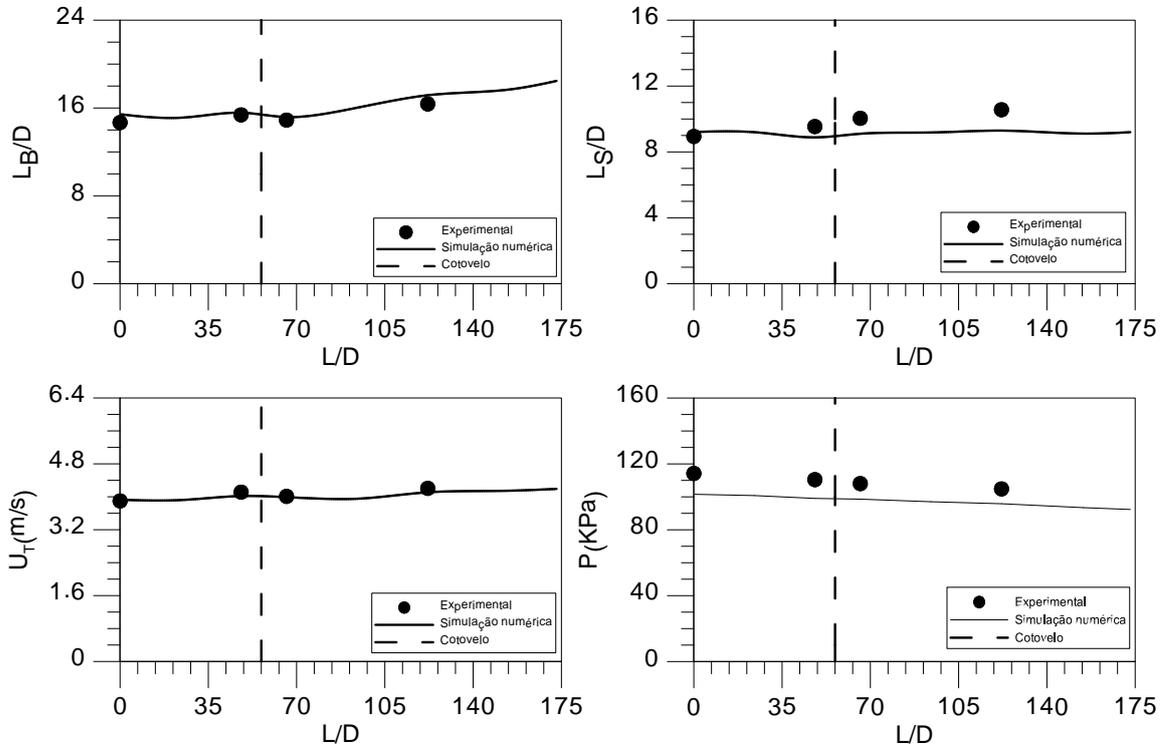


Figura B- 11-Resultados médios para A@W#15 ($j_L=2,000$ e $j_G=1,277$)

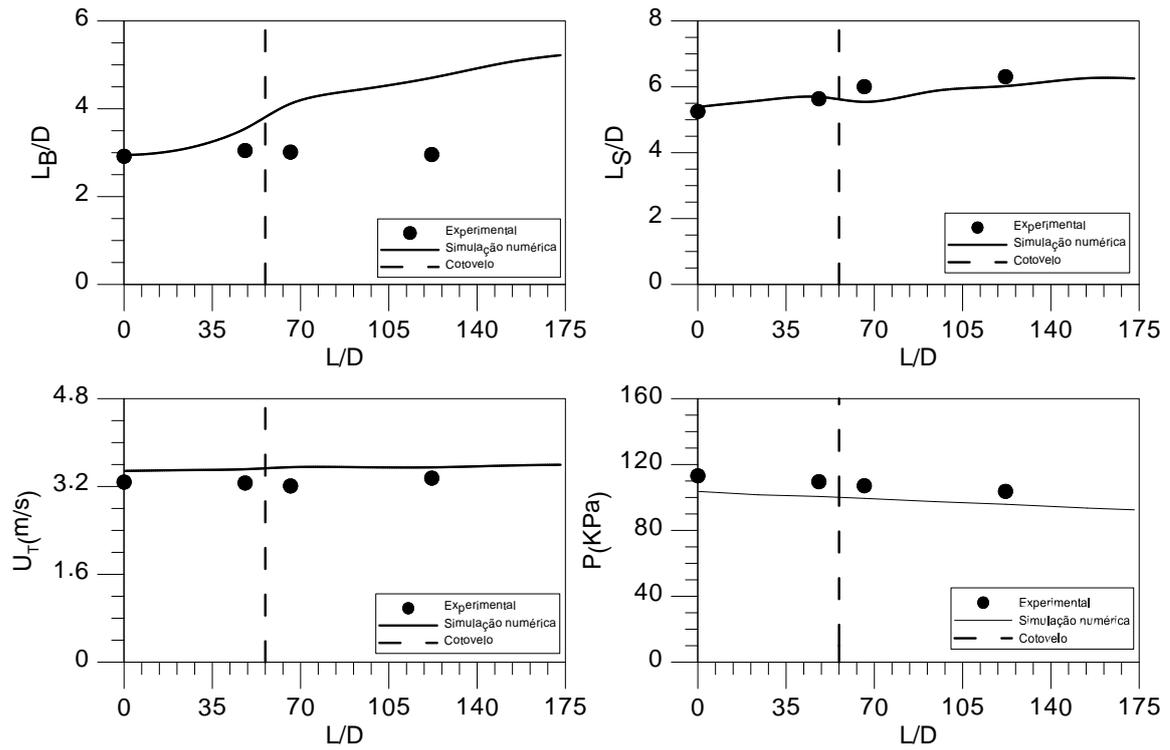


Figura B- 12-Resultados médios para A@W#16 ($j_L=2,500$ e $j_G=0,410$)

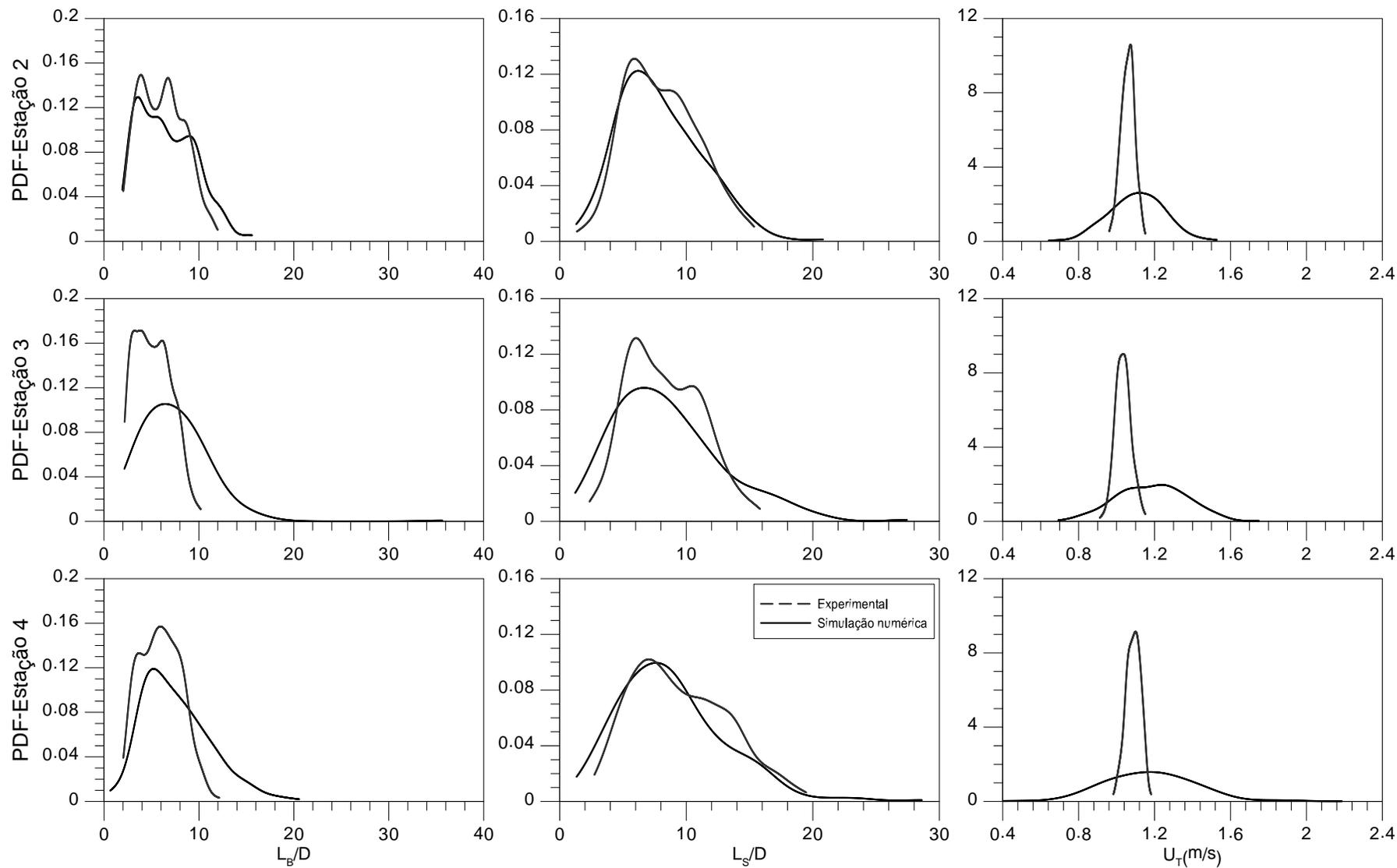


Figura B- 13-PDFs para A@W#2 ($j_L=0,700$ e $j_G=0,217$)

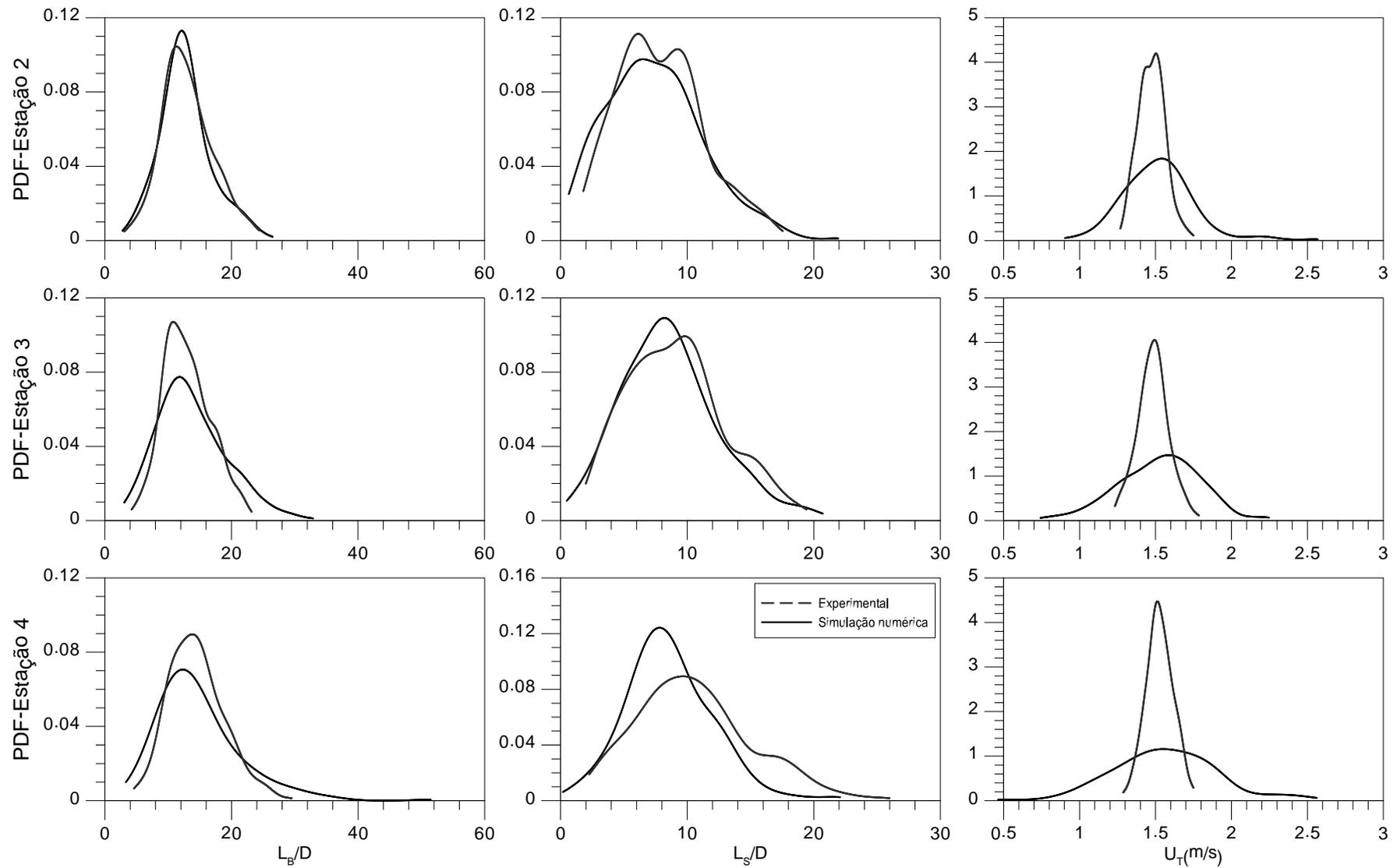


Figura B- 14-PDFs para A@W#3 ($j_L=0,750$ e $j_G=0,533$)

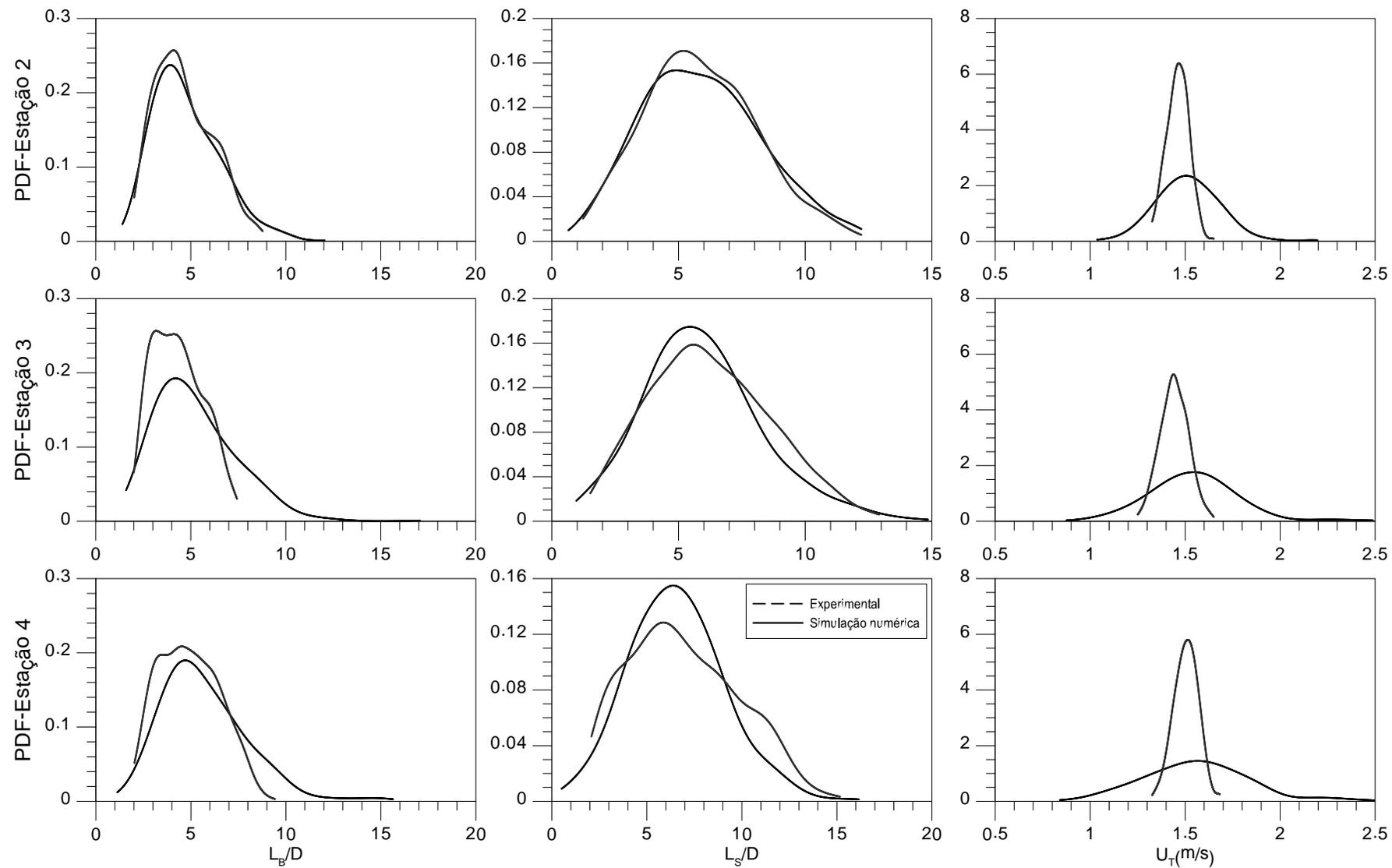


Figura B- 15-PDFs para A@W#4 ($j_L=1,000$ e $j_G=0,300$)

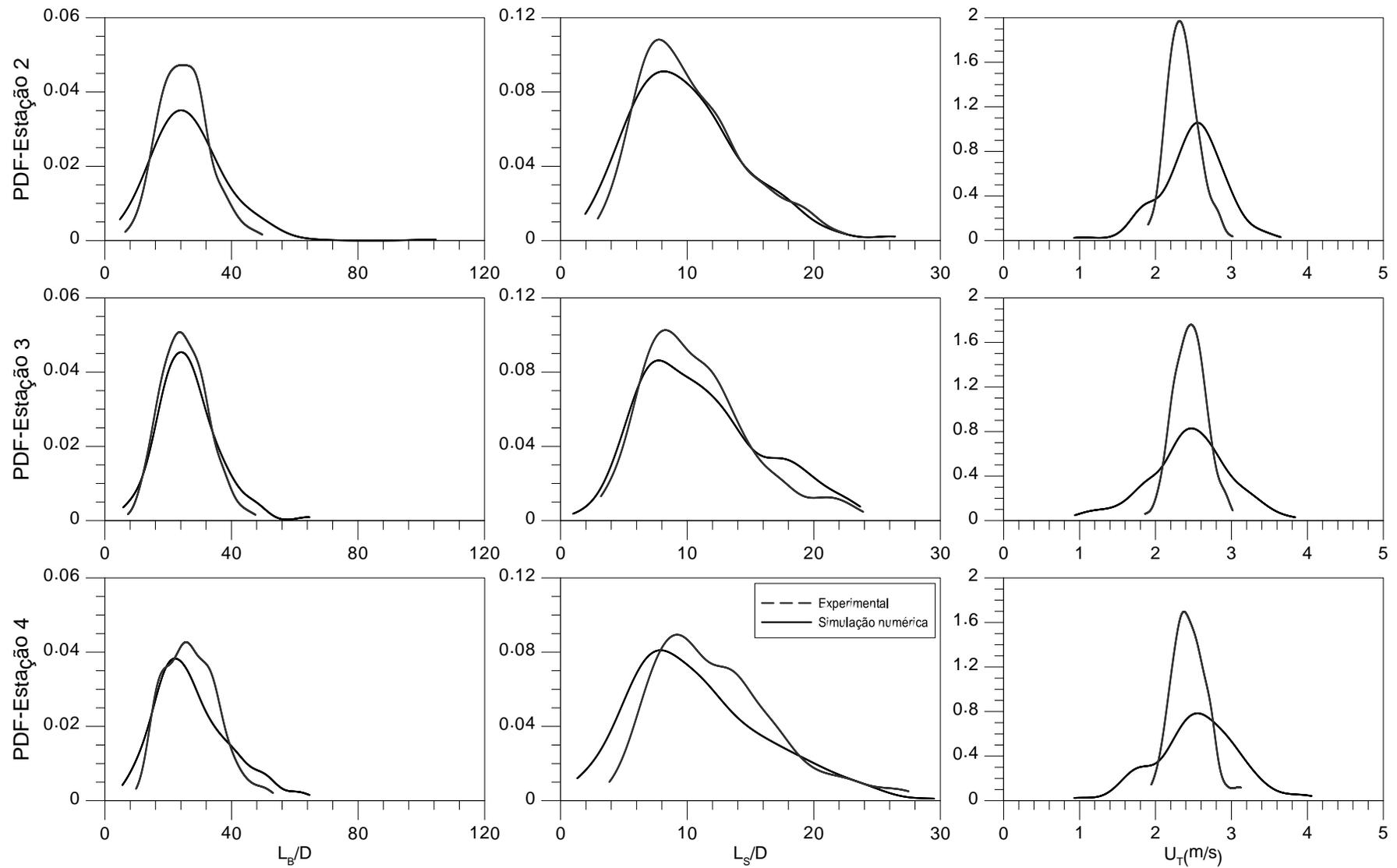


Figura B- 16-PDFs para A@W#6 ($j_L=1,000$ e $j_G=1,034$)

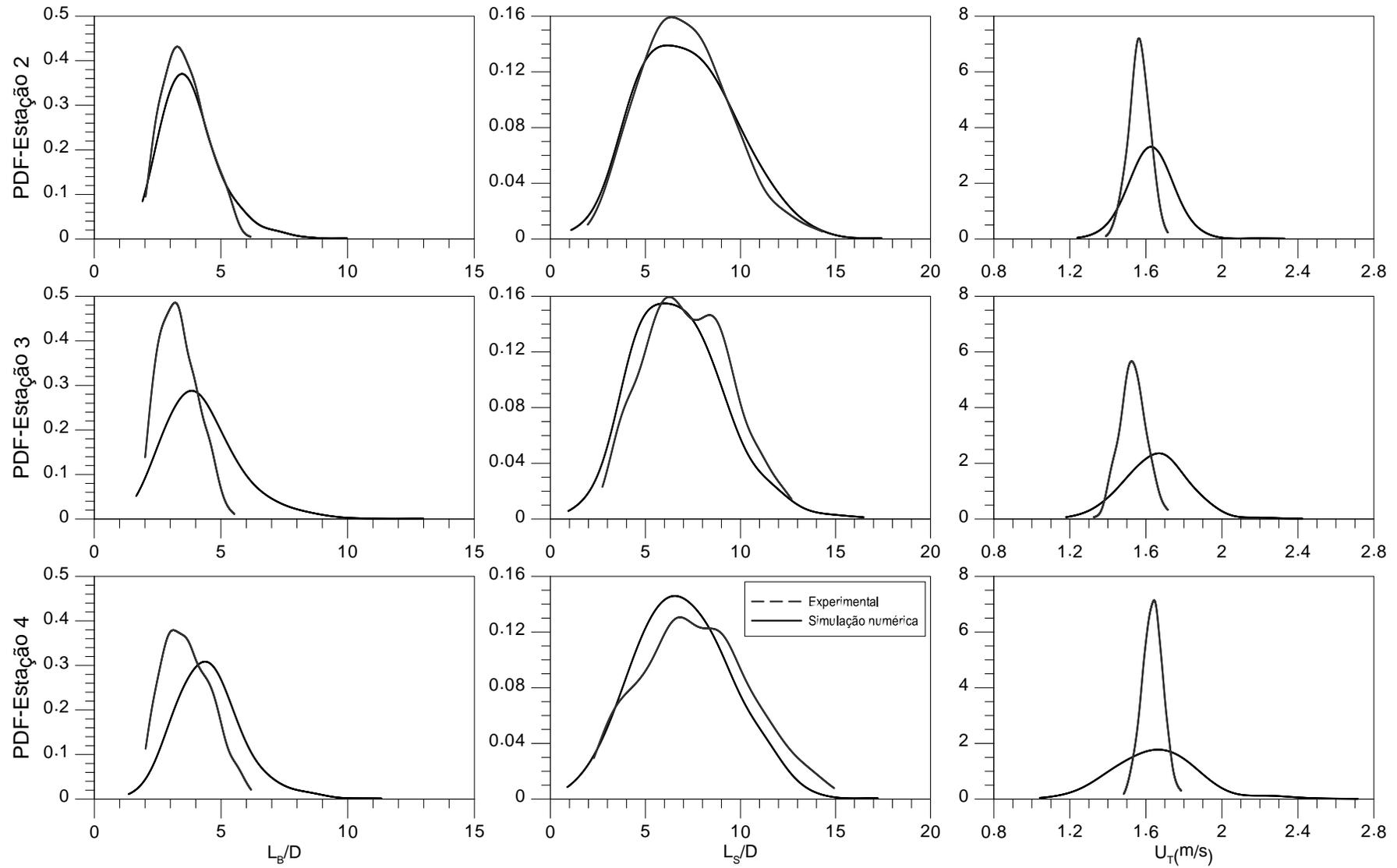


Figura B- 17-PDFs para A@W#7 ($j_L=1,200$ e $j_G=0,219$)

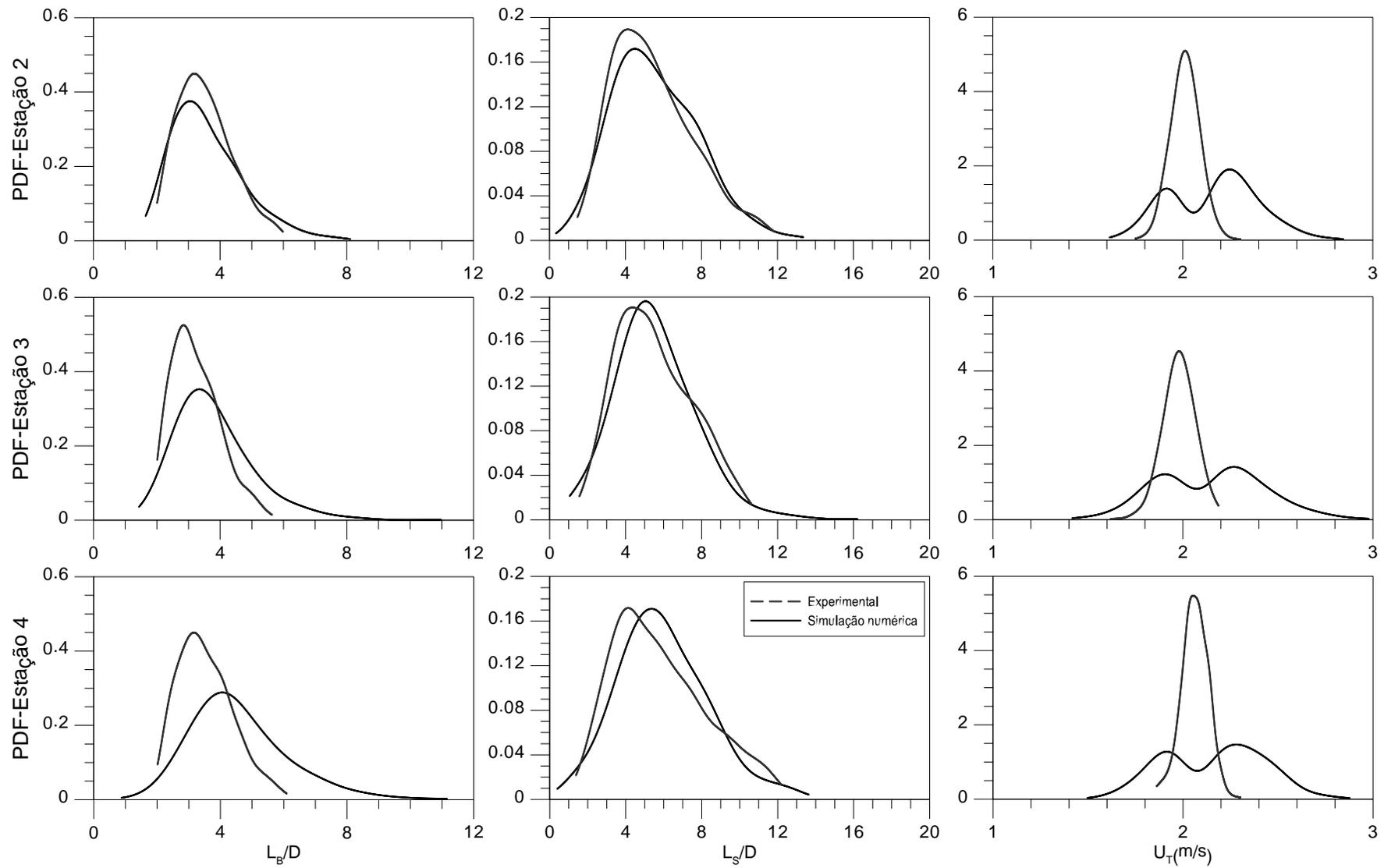


Figura B- 18-PDFs para A@W#9 ($j_L=1,500$ e $j_G=0,306$)

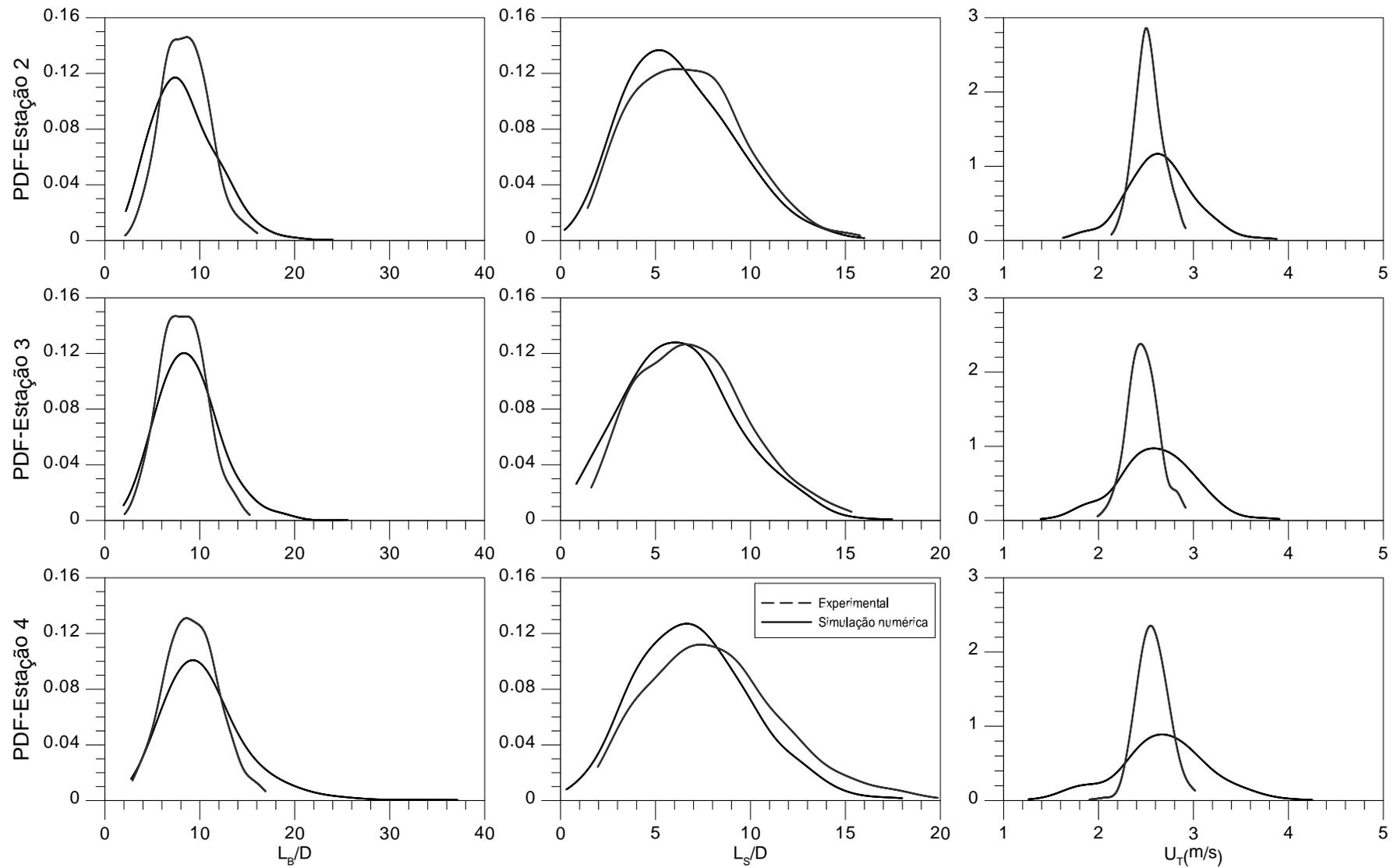


Figura B- 19-PDFs para A@W#10 ($j_L=1,500$ e $j_G=0,673$)

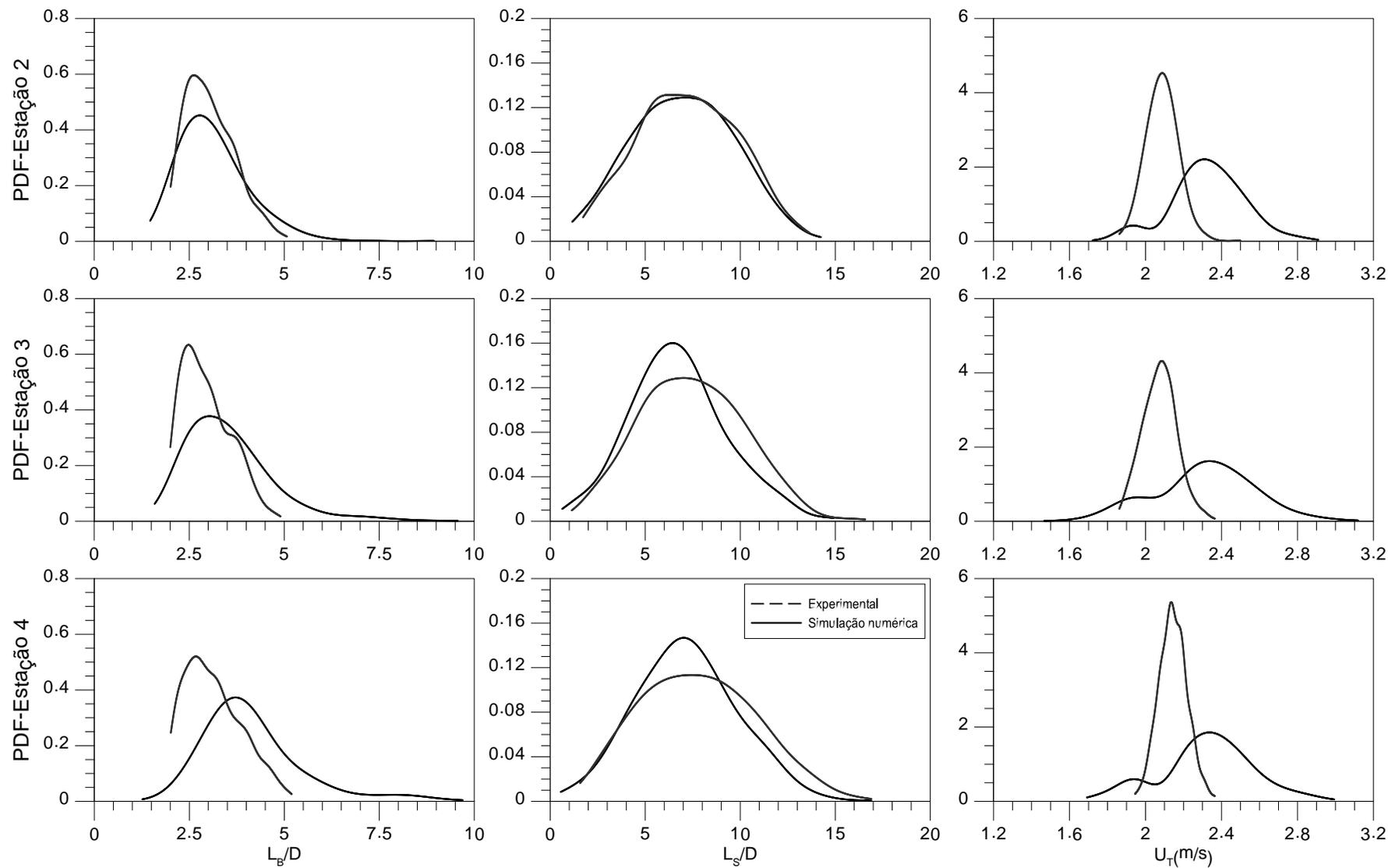


Figura B- 20-PDFs para A@W#12 ($j_L=1,700$ e $j_G=0,224$)

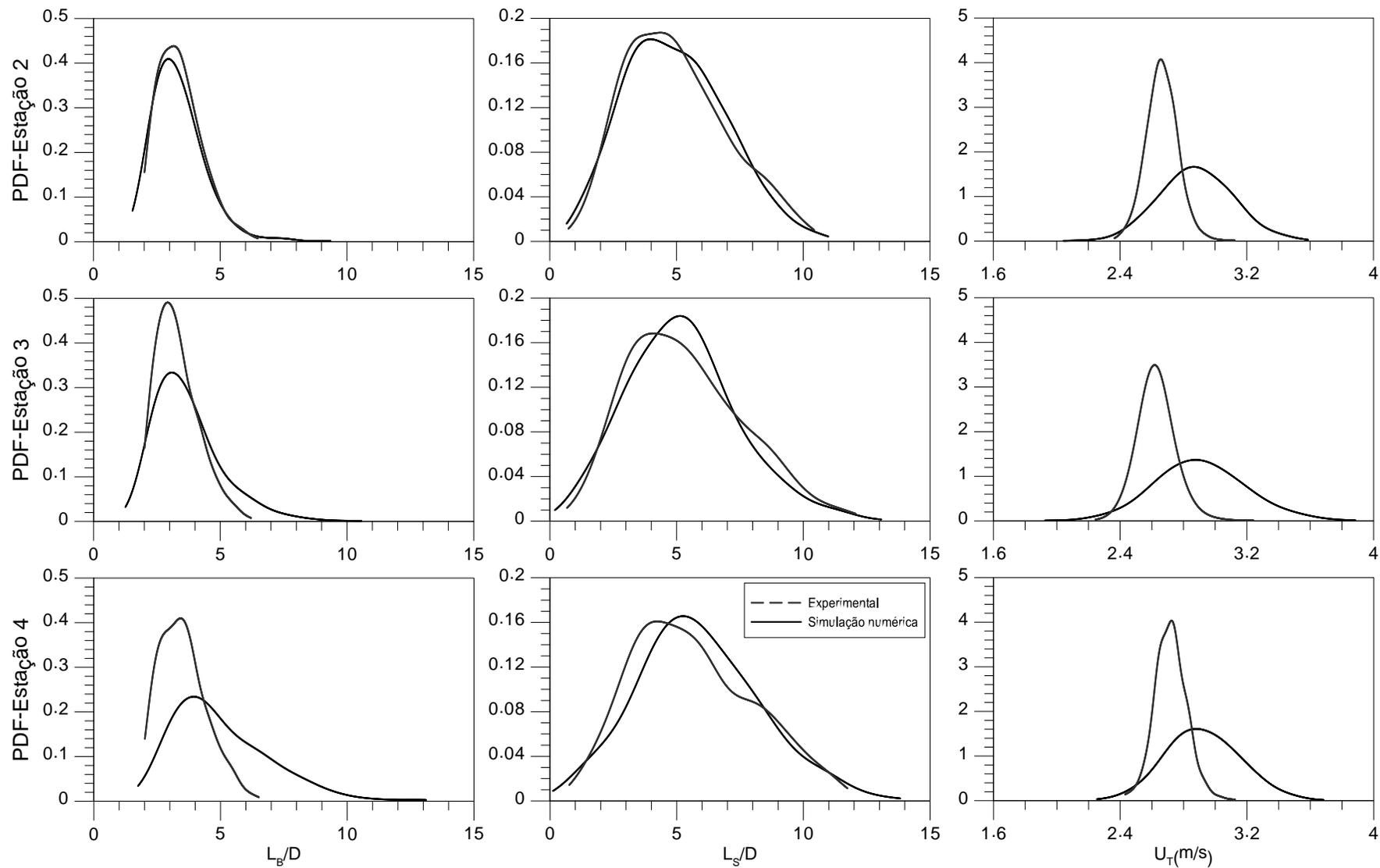


Figura B- 21-PDFs para A@W#13 ($j_L=2,000$ e $j_G=0,390$)

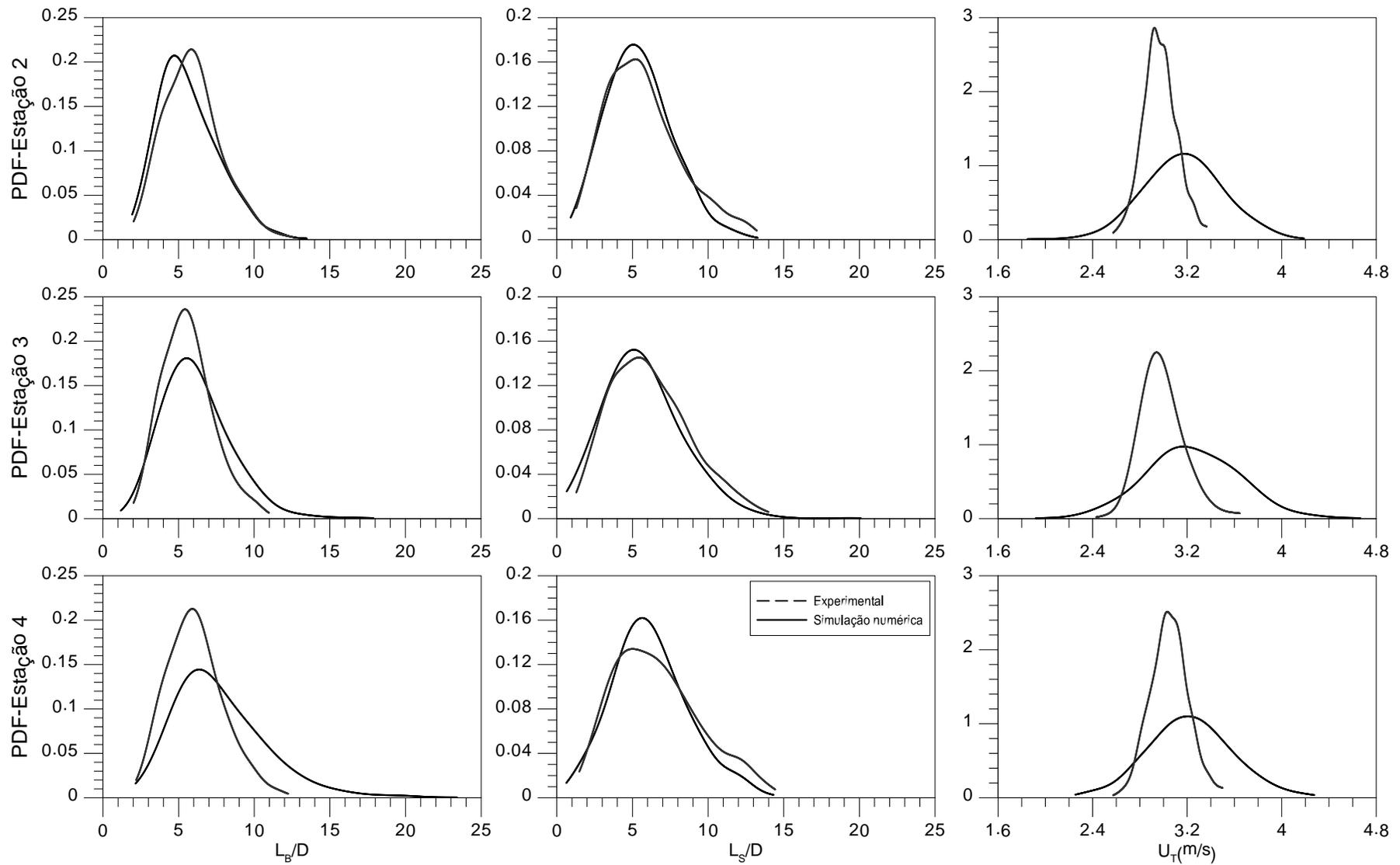


Figura B- 22-PDFs para A@W#14 ($j_L=2,000$ e $j_G=0,638$)

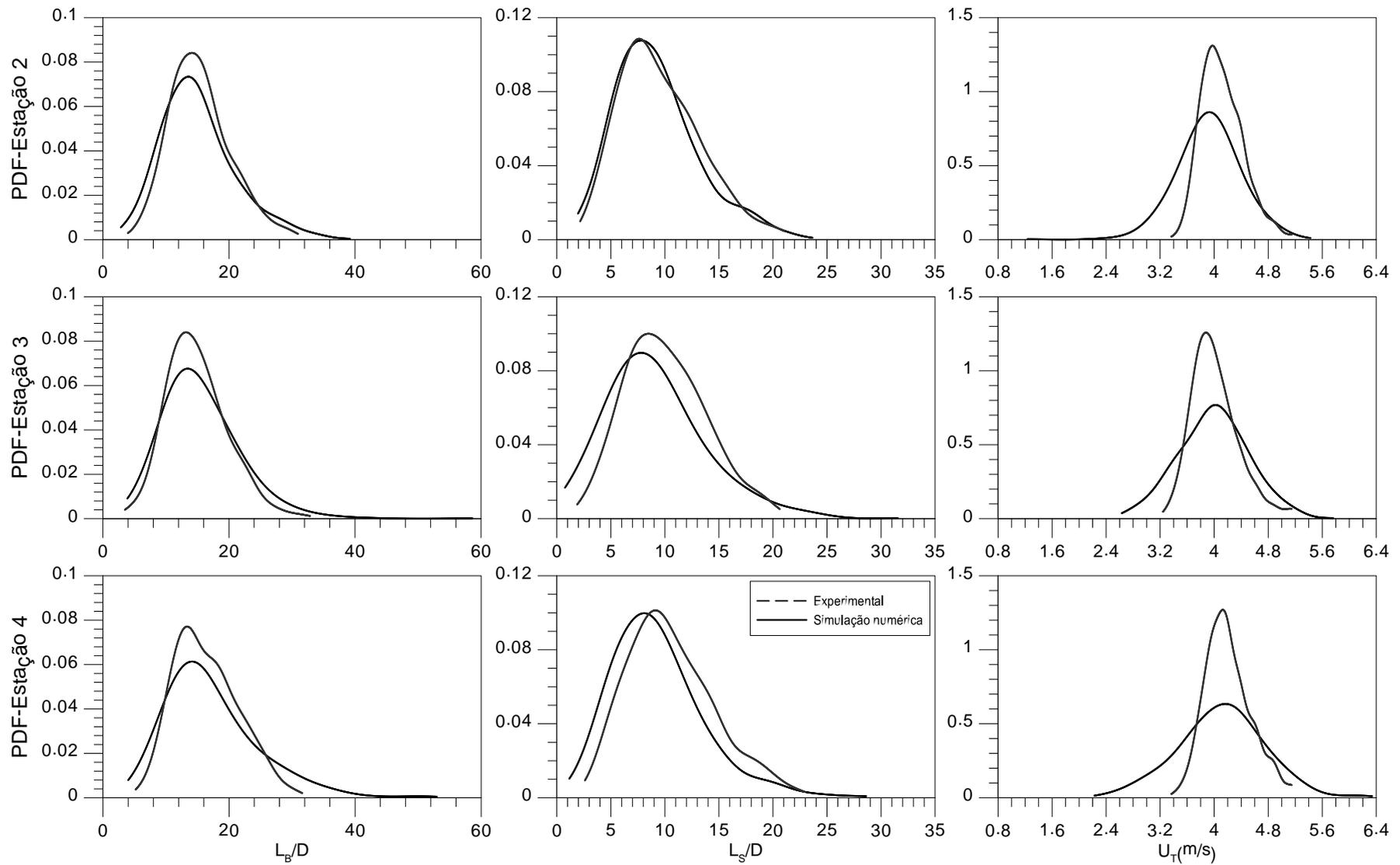


Figura B- 23-PDFs para A@W#15 ($j_L=2,000$ e $j_G=1,277$)

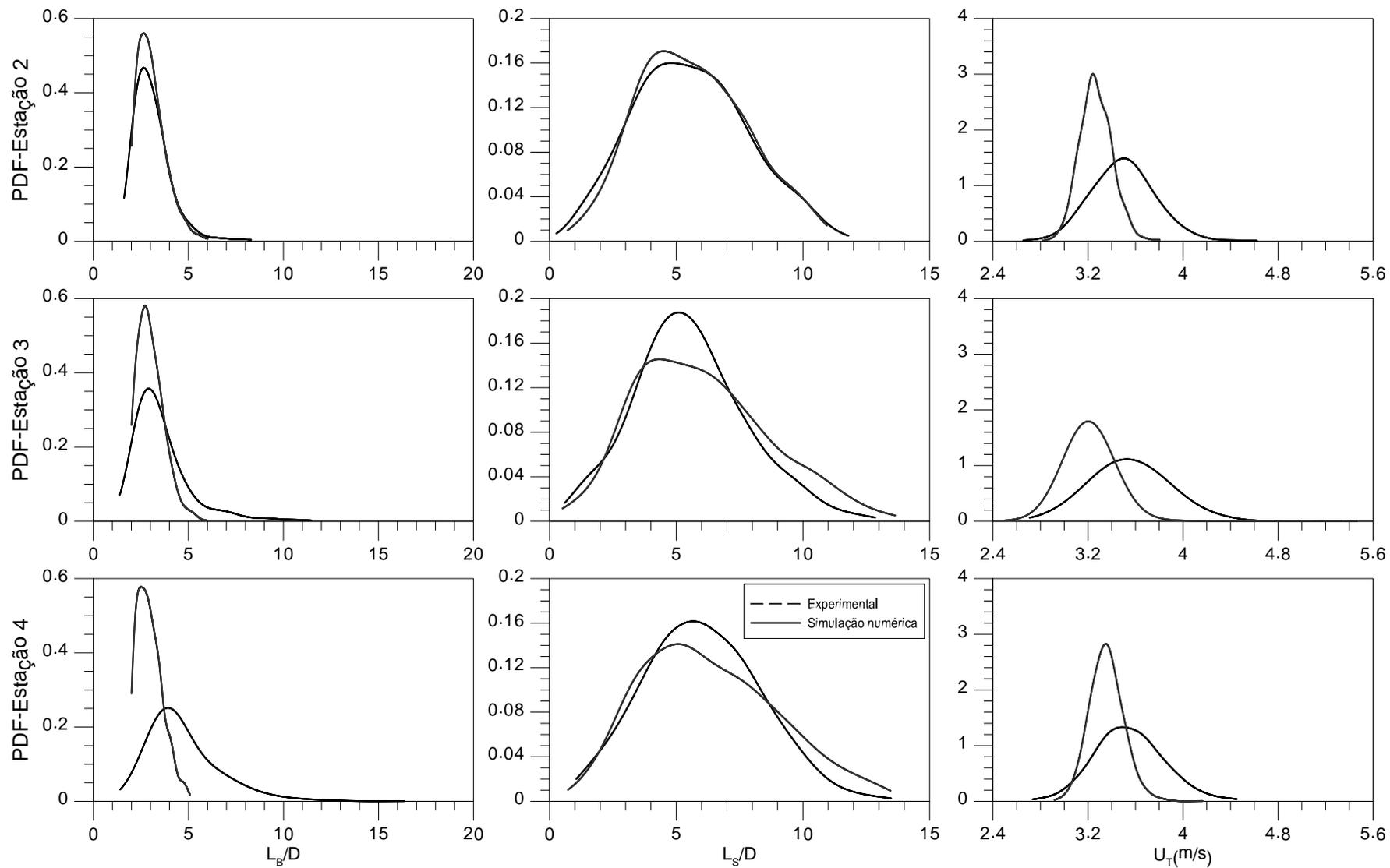


Figura B- 24 PDFs para A@W#16 ($j_L=2,500$ e $j_G=0,410$)

ANEXO A – EQUAÇÕES DE FECHAMENTO DO MODELO DE TAITEL E BARNEA (1990A)

Neste apêndice são apresentadas as equações necessárias para a solução da equação (3.17) do modelo de bolha de Taitel e Barnea (1990a). Primeiramente são apresentados os parâmetros geométricos do escoamento, seguidos pelos fatores de atrito e as tensões de cisalhamento. Por fim, são apresentadas as equações auxiliares.

AA.2 Parâmetros geométricos

Os parâmetros geométricos são calculados a partir da Figura AA- 1.

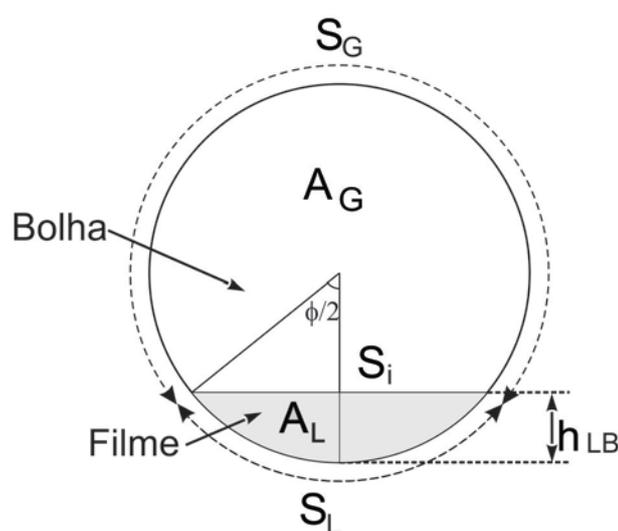


Figura AA- 1-Seção transversal de duto para escoamento horizontal ou inclinado

O parâmetro-chave para os cálculos é o ângulo interno ϕ . Ele pode ser calculado a partir da altura de filme, dado na Figura AA- 1.

$$\phi = 2 \arccos \left(1 - \frac{2h_{LB}}{D} \right) \quad (A.1)$$

Todos os parâmetros da Figura AA- 1, assim como outros parâmetros geométricos utilizados no modelo de bolha de Taitel e Barnea (1990a), podem ser obtidos a partir da altura de filme h_{LB} e do diâmetro D . A Tabela AA-1 mostra estes parâmetros geométricos.

Tabela AA- 1-Parâmetros geométricos para escoamento bifásico em golfadas

Perímetro molhado de líquido	$S_L = \frac{D\phi}{2}$
Perímetro molhado de gás	$S_G = \frac{D(2\pi - \phi)}{2}$
Perímetro de interface	$S_I = D \operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)$
Área ocupada pelo gás	$A_L = \frac{D^2(\phi - \operatorname{sen}(\phi))}{8}$
Área ocupada pelo líquido	$A_G = \frac{D^2(2\pi + \operatorname{sen}(\phi) - \phi)}{8}$
Fração do líquido	$R_{LB} = \frac{\phi - \operatorname{sen}\phi}{2\pi}$
Varição da fração de líquido	$\frac{\partial R_{LB}}{\partial h_{LB}} = \frac{\phi - \operatorname{sen}\phi}{2\pi}$
Diâmetro hidráulico da região do filme	$D_{HL} = \frac{4A_L}{S_L}$
Diâmetro hidráulico da região da bolha alongada	$D_{HG} = \frac{4A_G}{S_I + S_G}$

AA.2 Fator de atrito e tensão de cisalhamento

O fator de atrito e as tensões de cisalhamento das fases líquida e gasosa e na interface são mostrados na Tabela AA-2

Tabela AA-2 - Fator de atrito e tensão de cisalhamento de líquido, gás e interface.

Variável	Descrição	Fórmula
C_L	Atrito no líquido	Regime laminar: $C_L = \frac{16}{Re_L}$ Regime turbulento: $C_L = 0,001375 \left(1 + \left(\left(\frac{2 \cdot 10^4 \varepsilon}{D_{HL}} \right) + \left(\frac{10^6}{Re_L} \right) \right)^{1/3} \right)$
C_G	Atrito no gás	Regime laminar: $C_G = \frac{16}{Re_G}$ Regime turbulento: $C_G = 0,001375 \left(1 + \left(\left(\frac{2 \cdot 10^4 \varepsilon}{D_{HG}} \right) + \left(\frac{10^6}{Re_G} \right) \right)^{1/3} \right)$
C_I	Atrito na interface	$C_I = 0,014$
τ_L	Tensão de cisalhamento no líquido	$\tau_L = \frac{C_L \rho_L U_{LB} U_{LB}}{2}$
τ_G	Tensão de cisalhamento no gás	$C_G = \frac{f_G \rho_G U_{GB} U_{GB}}{2}$
τ_I	Tensão de cisalhamento na interface	$\tau_I = \frac{C_I \rho_G (U_{GB} - U_{LB}) U_{GB} - U_{LB} }{2}$

AA.3 Equações auxiliares

As velocidades de líquido no filme U_{LB} e a velocidade da bolha alongada U_{GB} são calculadas a partir de balanço de massa na célula unitária:

$$U_{LB} = U_T - (U_T - U_{LS}) \frac{R_{LS}}{R_{LB}} \quad (\text{A.2})$$

$$U_{GB} = U_T - (U_T - U_{GS}) \frac{(1 - R_{LS})}{(1 - R_{LB})} \quad (\text{A.3})$$

A velocidade das bolhas de gás dispersas no pistão U_{GS} é dada por:

$$U_{GS} = U_{LS} + \frac{U_{DS}}{R_{LS}} \quad (\text{A.4})$$

onde U_{DS} é a velocidade de elevação das bolhas em um meio estagnado e é calculada a partir da correlação de Harmathy (1960):

$$U_{DS} = 1,54 \left(\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right)^{0,25} R_{LS}^{0,5} \text{Sen}(\theta) \quad (\text{A.5})$$

A fração de líquido no pistão é calculada por a relação:

$$R_{LS} = \frac{F_0 + F_1}{Fr_j + F_1} \quad (\text{A.6})$$

onde F_0 , F_1 e Fr_j são dados pelas equações (A.7), (A.8) e (A.9).

$$F_0 = \max \left[0; 2,6 \left(1 - 2 \left(\frac{0,025}{D} \right)^2 \right) \right] \quad (\text{A.7})$$

$$F_1 = 2400 \left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{3} \right)^{-3/4} \quad (\text{A.8})$$

$$Fr_j = \frac{J}{\sqrt{gD}} \quad (\text{A.9})$$

ANEXO B – FLUXOGRAMAS

Este anexo contém os fluxogramas apresentados no trabalho de Yoshisawa (2008) para resolver o modelo de Bolha de Taitel e Barnea (1990a). A Figura BB-1 apresenta o fluxograma da integração numérica do modelo da bolha, processo este descrito no item 4.1.4 do capítulo 4. A Figura BB-2 mostra o fluxograma da sequência do cálculo para obter $\partial h_{LB} / \partial z$, cujas equações são apresentadas no Apêndice A. A Figura BB- 3 apresenta o processo de parada do modelo da bolha.

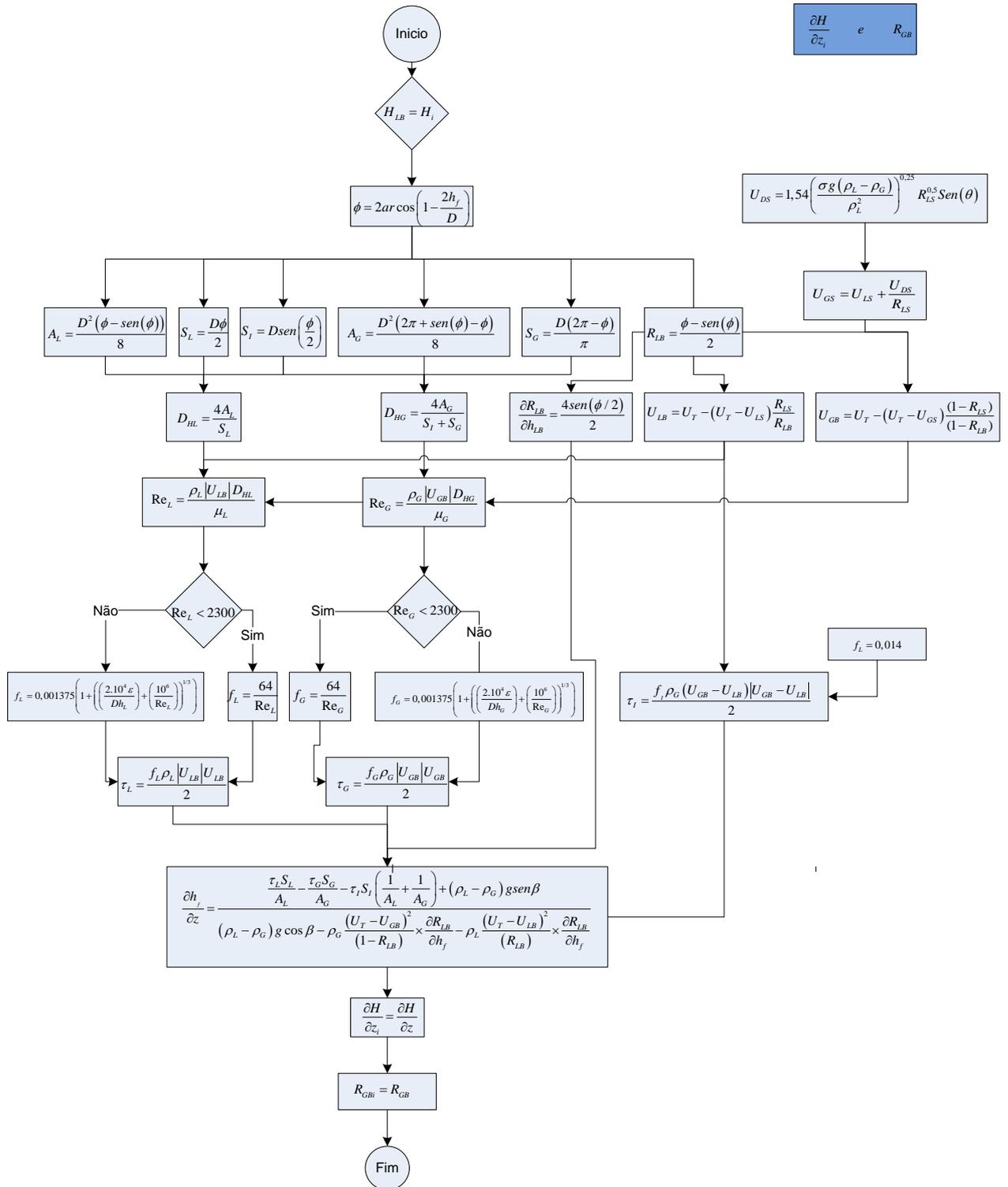


Figura BB-1 - Processo de integração para obter o perfil da bolha

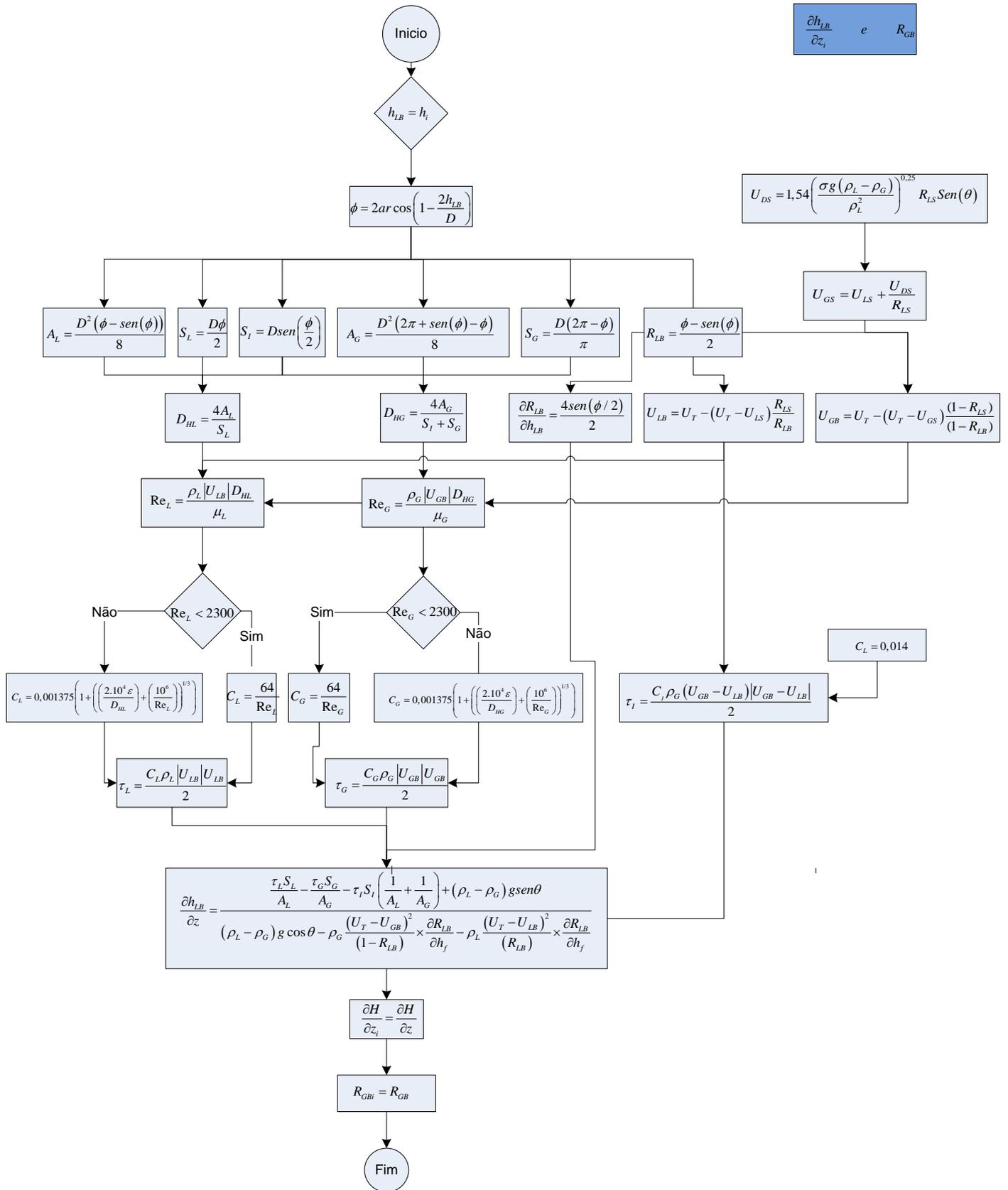


Figura BB-2 - Modelo de bolha de Taitel e Barnea (1990)

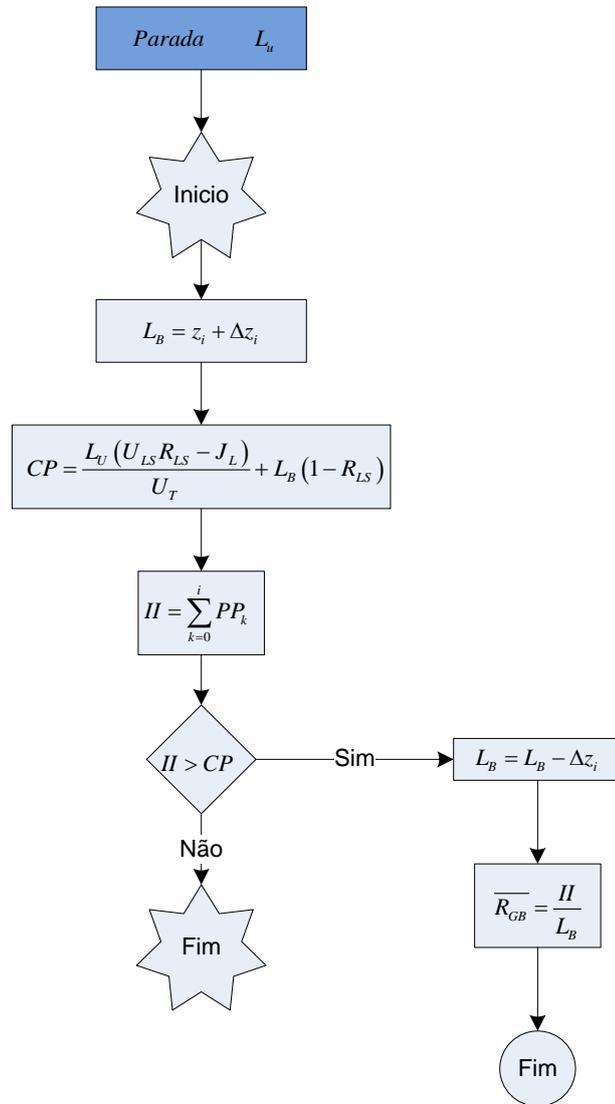


Figura BB- 3-Critério de parada de modelo de Bolha

ANEXO C – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DA BANCADA EXPERIMENTAL

Nesta seção são apresentadas as curvas de calibração dos sensores utilizados na bancada experimental.

CC.1 Curva de calibração do medidor de vazão

Os medidores de vazão de Coriolis foram calibrados na fábrica e apresentam certificados de calibração. As Figuras C-1 e C-2 apresentam as curvas de calibração dos medidores de vazão.

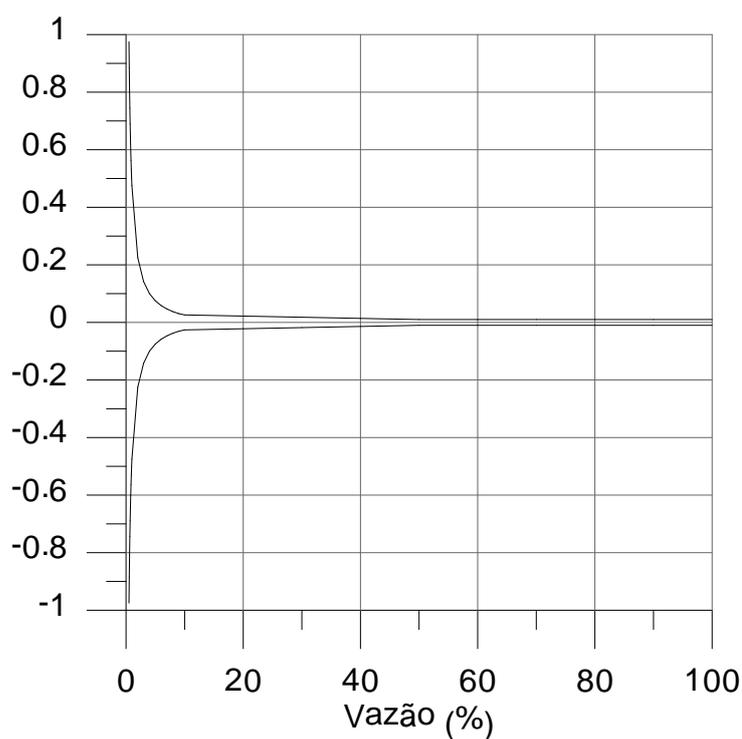
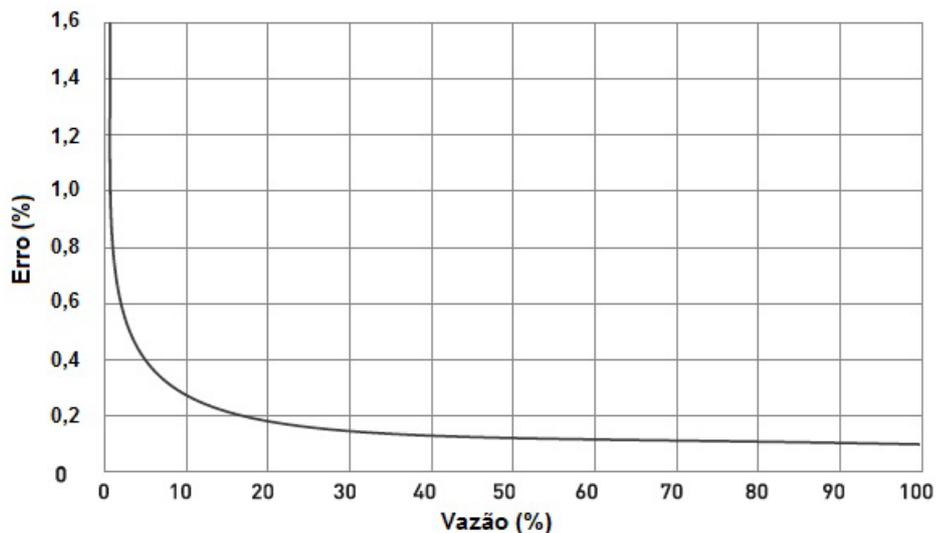
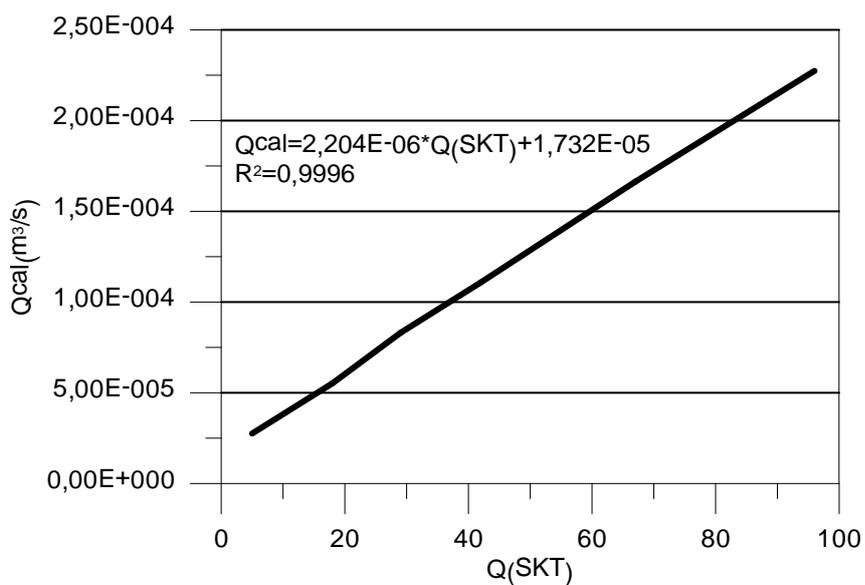


Figura C-1 Curvas de calibração do medidor, *Micro Motion* modelo F050S

Figura C-2 Curvas de calibração do medidor. *Krone* modelo *OPTIMUS 7000*

CC.2 Curva de calibração de medidor vazão de ar.

Para a medição de vazão de ar são utilizados três rotômetros. As curvas de calibração dos rotômetros são apresentados nas Figuras C-1, C-2 e C-3, e são válidas para pressão no nível de mar ($P_{cal}=101.3KPa$) e temperatura de calibração de $25^{\circ}C$.

Figura C-3 Curvas de conversão de unidades SKT a unidades m^3/s do rotômetro 96039

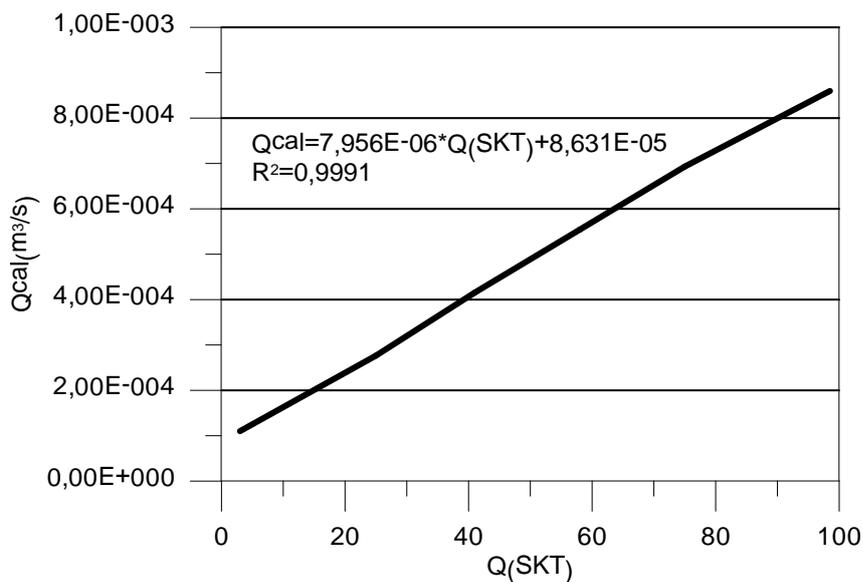


Figura C-4 Curvas de conversão de unidades SKT a unidades m^3/s do rotâmetro 96044

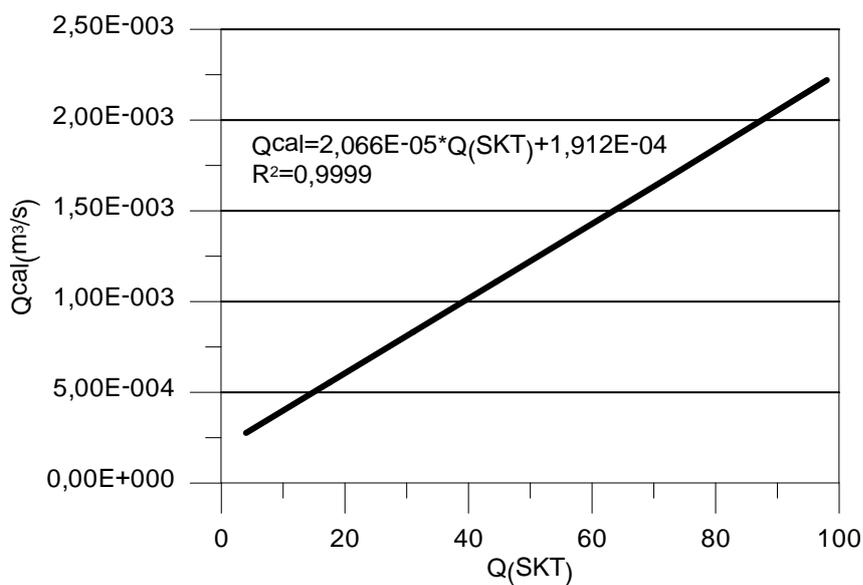


Figura C-5 Curvas de conversão de unidades SKT a unidades m^3/s do rotâmetro 96049

Para o cálculo da vazão em diferentes condições é utilizada a relação experimental (C.1)

$$Q_{corr} = Q_{cal} \sqrt{\frac{P_{cal} T_{med}}{P_{med} T_{cal}}} \quad (C.1).$$

onde P_{med} é a pressão medida, T_{med} é a temperatura medida e Q_{corr} é a vazão corrigida em função dos parâmetros medidos e calibrados.

CC.3 Cálculo da velocidade superficial do gás

A velocidade superficial do gás, j_G , é obtida fazendo um balanço de massa entre a linha de ar (0) e a primeira estação de medição (1). As vazões mássicas (\dot{m}) de ar nos pontos 0 e 1 são igualadas.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_0 \quad (C.2)$$

$$\rho_1 j_{G1} A = \rho_0 Q_0 \quad (C.3)$$

Rearranjando-se a equação (C.3) tem-se:

$$j_{G1} = \frac{\rho_0}{\rho_1} \frac{Q_0}{A} \quad (C.4)$$

Substituindo a equação de estado na equação (C.4), obtém-se:

$$j_{G1} = \frac{P_0}{P_1} \frac{T_1}{T_0} \frac{Q_0}{A} \quad (C.5)$$

A equação (C.5) representa a velocidade superficial de gás na estação de entrada, e é um dado de entrada na modelagem desenvolvida.