ALAN JUNJI YAMAGUCHI

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE INTERMITÊNCIA SEVERA
EM UM SISTEMA ÁGUA-AR**

São Paulo

2016

ALAN JUNJI YAMAGUCHI

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE INTERMITÊNCIA SEVERA
EM UM SISTEMA ÁGUA-AR**

Dissertação de Mestrado apresentada
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Ciências.

São Paulo

2016

ALAN JUNJI YAMAGUCHI

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE INTERMITÊNCIA SEVERA
EM UM SISTEMA ÁGUA-AR**

Dissertação de Mestrado apresentada
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Luis Baliño

São Paulo

2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Yamaguchi, Alan Junji

Estudo experimental de intermitência severa em um sistema água-ar /
A. J. Yamaguchi -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
149 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Escoamento multifásico 2.Física experimental 3.Fenômenos físicos
4.Dinâmica de fluidos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Jorge Luis Baliño, por toda confiança depositada e habilidade em orientação durante todos esses anos de trabalho em conjunto. Pela paciência e ajuda desde que eu era aluno de graduação até agora como aluno de mestrado.

Aos Professores Alberto Hernandez Neto e Flávio Augusto Sanzone Fiorelli pelo apoio e ajuda durante o planejamento e construção da bancada experimental.

Ao colega Gabriel Romualdo de Azevedo pelos dados referentes ao modelo de estabilidade linear.

Ao pessoal do Núcleo de Dinâmica de Fluidos por momentos de descontração e de descanso neste tempo de trabalho.

À Empresa GMG e a todas as outras pessoas presentes durante a construção da montagem do laboratório experimental.

Ao técnico Douglas Silva pela colaboração na realização de mudanças no laboratório.

Agradeço também ao apoio da Agência Nacional do Petróleo - ANP, da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, 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 e da Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS pelo apoio financeiro nas várias etapas deste estudo.

Life imitates Art far more than Art imitates Life
Oscar Wilde (1854 - 1900)

RESUMO

O trabalho tem como objetivo realizar um estudo experimental na bancada do Laboratório Multipropósito de Escoamento Multifásico com o intuito de estudar o fenômeno de intermitência severa em um sistema *pipeline-riser* com os fluidos água e ar. A intermitência severa pode ocorrer em sistemas *pipeline-riser* onde o *pipeline* é descendente seguido de um *riser* vertical, além de ser necessário a presença de baixas vazões de fluidos. Esse fenômeno é caracterizado por ser cíclico em que há acúmulo de líquido na base do *riser* e por acabar causando perdas na produção de petróleo e gás devido a grandes flutuações de pressão e vazão que podem durar horas a depender do comprimento do sistema. Os picos de pressão e vazão também podem causar o desligamento do sistema de separação na plataforma. O estudo se dividiu em várias etapas onde inicialmente foram definidos os procedimentos experimentais a serem utilizados. A calibração de placas de orifício foi necessária para o controle de vazão mássica de gás. Os resultados experimentais foram divididos em casos estáveis e instáveis onde a instabilidade é caracterizada pela presença de ciclos de pressão que podem ser observados em históricos de pressão na base do *riser*. Mapas de estabilidade foram criados e a região instável obtida experimentalmente foi comparada com a curva de estabilidade obtida pelo uso da teoria de estabilidade linear. Os históricos de pressão na base do *riser* para os casos instáveis obtidos foram comparados com dois modelos numéricos. A variação da pressão no separador foi usada para verificar a mitigação da intermitência severa e/ou da condição instável obtida no sistema para alguns casos instáveis.

Palavras-chave: Sistema *pipeline-riser*. Intermitência severa. Escoamento multifásico de água-ar.

ABSTRACT

The objective of this work is to do an experimental study of the severe slugging phenomenon in the pipeline-riser system of the Multipurpose Multiphase Flow Laboratory by using the fluids air and water. Severe slugging may occur for low flow rates in pipeline-riser systems where a downward pipeline is followed by a vertical riser. In this phenomenon there is liquid accumulation at the bottom of the riser resulting in production losses due to the great fluctuations of pressure and flow rate during its cycles which may last for hours depending on the length of the system. The high pressure values can also cause shutdown of the platform separation system. The first stage of this study was to define the experimental procedure to be adopted. It was necessary to perform a calibration of the orifice plates in order to have a precise control of the gas mass flow rate. The experimental results were divided in stable and unstable cases. The instability is defined by the presence of pressure oscillations at the bottom of the riser. Stability maps were created to compare the stability curve obtained by the stability linear theory with the experimental results. The experimental pressure oscillations were compared with two numerical models. The pressure variation at the separator was studied to verify the mitigation effects during unstable and/or severe slugging conditions.

Key-words: Pipeline-riser system. Severe slugging. Air-water multiphase flow.

Lista de Figuras

1.1	Padrões de escoamento na vertical	28
1.2	Padrões de escoamento na horizontal	29
1.3	Escoamento permanente estratificado	30
1.4	O ciclo de intermitência severa	31
(a)	Formação de <i>slug</i>	31
(b)	Produção de <i>slug</i>	31
(c)	Penetração de gás	31
(d)	Retorno de líquido	31
1.5	Variação de pressão em um ciclo de intermitência severa (Schmidt (1977)).	31
1.6	Exemplo de um mapa de estabilidade usando o critério de Bøe representado pela linha contínua (Taitel, 1986).	34
1.7	Mapa de estabilidade (Jansen et al., 1996).	35
1.8	Mapa de estabilidade para <i>pipeline</i> sem inclinação (Xiaoming et al., 2011).	37
1.9	Esquema da bancada experimental da Universidade de Tulsa (Taitel, 1986).	39
1.10	Dispositivo para mitigação de intermitência severa patenteado por Makogan e Brook (2007).	42
1.11	Tubulação em onda (Xing et al., 2013a).	43
2.1	<i>Layout</i> básico da bancada experimental	45
2.2	Configuração geral do <i>pipeline</i>	46
2.3	<i>Riser</i>	47
2.4	Fluxograma da linha de ar	47
2.5	Conexão de linha de ar com o <i>pipeline</i>	48
2.6	Fluxograma da linha de água	48
2.7	Esquema usado para o dimensionamento das placas de orifício	50
2.8	Exemplo de um placa de orifício	53
2.9	Tela do <i>Trend Module</i> para a calibração das placas de orifício	57
2.10	Curva de calibração da placa 7.	57
2.11	Comparação de curvas de estabilidade.	58
2.12	Histórico de pressão na base do <i>riser</i> para um caso instável.	60
2.13	Histórico de pressão na base do <i>riser</i> para um caso estável.	61
3.1	Mapa de estabilidade para +10 graus.	67
3.2	Período dos ciclos de intermitência severa para o mapa de estabilidade de +10 graus.	67
3.3	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 15 da Tabela 3.2).	68
3.4	Mapa de estabilidade para +9 graus.	71
3.5	Período dos ciclos de intermitência severa para o mapa de estabilidade de +9 graus.	71
3.6	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 4 da Tabela 3.6).	72
3.7	Mapa de estabilidade para +8 graus.	75
3.8	Período dos ciclos de intermitência severa para o mapa de estabilidade de +8 graus.	75
3.9	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 23 da Tabela 3.10).	76
3.10	Mapa de estabilidade para +7 graus.	79
3.11	Período dos ciclos de intermitência severa para o mapa de estabilidade de +7 graus.	79
3.12	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 23 da Tabela 3.14).	80

3.13	Mapa de estabilidade para +6 graus.	83
3.14	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 24 da Tabela 3.18).	83
3.15	Mapa de estabilidade para +5 graus.	84
3.16	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 1 da Tabela 3.19).	85
3.17	Condição instável para inclinação de +10 graus com $j_g = 0,03\text{ m/s}$ e $j_l = 0,055\text{ m/s}$	87
3.18	Variação das variáveis com a mudança da pressão no separador para inclinação de +10 graus com $j_g = 0,03\text{ m/s}$ e $j_l = 0,055\text{ m/s}$	88
4.1	Consideração das medições do <i>pipeline</i> e do <i>riser</i>	90
A.1	Conexão elétrica do laboratório.	98
A.2	Medidor de vazão de Coriolis.	98
A.3	Medidor de vazão eletromagnético.	99
A.4	Tanque de acumulação.	99
A.5	Compressor.	100
A.6	Válvula posicionadora.	100
C.1	Curva de calibração da placa 2.	104
D.1	Definição de variáveis no <i>pipeline</i>	106
D.2	Definição de variáveis no <i>riser</i>	107
E.1	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 14 da Tabela 3.2).	110
E.2	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 16 da Tabela 3.2).	110
E.3	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 17 da Tabela 3.2).	111
E.4	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 18 da Tabela 3.2).	111
E.5	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 19 da Tabela 3.2).	112
E.6	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 20 da Tabela 3.2).	112
E.7	Velocidades superficiais (Caso 14 da Tabela 3.2).	113
E.8	Velocidades superficiais (Caso 15 da Tabela 3.2).	113
E.9	Velocidades superficiais (Caso 16 da Tabela 3.2).	114
E.10	Velocidades superficiais (Caso 17 da Tabela 3.2).	114
E.11	Velocidades superficiais (Caso 18 da Tabela 3.2).	115
E.12	Velocidades superficiais (Caso 19 da Tabela 3.2).	115
E.13	Velocidades superficiais (Caso 20 da Tabela 3.2).	116
E.14	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 2 da Tabela 3.2).	116
E.15	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 11 da Tabela 3.2).	117
E.16	Velocidades superficiais (Caso 2 da Tabela 3.2).	117
E.17	Velocidades superficiais (Caso 11 da Tabela 3.2).	118
E.18	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 1 da Tabela 3.6).	120
E.19	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 2 da Tabela 3.6).	120
E.20	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 3 da Tabela 3.6).	121
E.21	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 22 da Tabela 3.6).	121
E.22	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 23 da Tabela 3.6).	122
E.23	Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 24 da Tabela 3.6).	122
E.24	Velocidades superficiais (Caso 1 da Tabela 3.6).	123
E.25	Velocidades superficiais (Caso 2 da Tabela 3.6).	123
E.26	Velocidades superficiais (Caso 3 da Tabela 3.6).	124
E.27	Velocidades superficiais (Caso 4 da Tabela 3.6).	124
E.28	Velocidades superficiais (Caso 22 da Tabela 3.6).	125
E.29	Velocidades superficiais (Caso 23 da Tabela 3.6).	125
E.30	Velocidades superficiais (Caso 24 da Tabela 3.6).	126

E.31 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 8 da Tabela 3.6).	126
E.32 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 14 da Tabela 3.6).	127
E.33 Velocidades superficiais (Caso 8 da Tabela 3.6).	127
E.34 Velocidades superficiais (Caso 14 da Tabela 3.6).	128
E.35 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 9 da Tabela 3.10).	130
E.36 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 10 da Tabela 3.10).	130
E.37 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 22 da Tabela 3.10).	131
E.38 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 24 da Tabela 3.10).	131
E.39 Velocidades superficiais (Caso 9 da Tabela 3.10).	132
E.40 Velocidades superficiais (Caso 10 da Tabela 3.10).	132
E.41 Velocidades superficiais (Caso 22 da Tabela 3.10).	133
E.42 Velocidades superficiais (Caso 23 da Tabela 3.10).	133
E.43 Velocidades superficiais (Caso 24 da Tabela 3.10).	134
E.44 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 3 da Tabela 3.10).	134
E.45 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 16 da Tabela 3.10).	135
E.46 Velocidades superficiais (Caso 3 da Tabela 3.10).	135
E.47 Velocidades superficiais (Caso 16 da Tabela 3.10).	136
E.48 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 24 da Tabela 3.14).	138
E.49 Velocidades superficiais (Caso 23 da Tabela 3.14).	138
E.50 Velocidades superficiais (Caso 24 da Tabela 3.14).	139
E.51 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 8 da Tabela 3.14).	139
E.52 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 14 da Tabela 3.14).	140
E.53 Velocidades superficiais (Caso 8 da Tabela 3.14).	140
E.54 Velocidades superficiais (Caso 14 da Tabela 3.14).	141
E.55 Velocidades superficiais (Caso 24 da Tabela 3.18).	143
E.56 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 5 da Tabela 3.18).	143
E.57 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 11 da Tabela 3.18).	144
E.58 Velocidades superficiais (Caso 5 da Tabela 3.18).	144
E.59 Velocidades superficiais (Caso 11 da Tabela 3.18).	145
E.60 Velocidades superficiais (Caso 1 da Tabela 3.19).	147
E.61 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 5 da Tabela 3.19).	147
E.62 Flutuação de pressão na base do <i>riser</i> (Caso 13 da Tabela 3.19).	148
E.63 Velocidades superficiais (Caso 5 da Tabela 3.19).	148
E.64 Velocidades superficiais (Caso 13 da Tabela 3.19).	149

Lista de Tabelas

2.1	Lista dos principais equipamentos da bancada experimental.	49
2.2	Nomenclatura dos equipamentos.	49
2.3	Tabela de diâmetro das placas de orifício para a entrada no <i>pipeline</i>	53
2.4	Diâmetro efetivo das placas de orifício usadas no <i>pipeline</i>	56
3.1	Parâmetros usados para as simulações numéricas.	65
3.2	Resultados experimentais com <i>pipeline</i> a +10 graus	66
3.3	Comparação das amplitudes dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +10 graus com incertezas.	68
3.4	Comparação dos valores de pressão média para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +10 graus.	69
3.5	Comparação dos períodos dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +10 graus.	69
3.6	Resultados experimentais com <i>pipeline</i> a +9 graus	70
3.7	Comparação das amplitudes dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +9 graus com incertezas	72
3.8	Comparação dos valores de pressão média para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +9 graus	73
3.9	Comparação dos períodos dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +9 graus	73
3.10	Resultados experimentais com <i>pipeline</i> a +8 graus	74
3.11	Comparação das amplitudes dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +8 graus com incertezas	76
3.12	Comparação dos valores de pressão média para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +8 graus	76
3.13	Comparação dos períodos dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +8 graus	77
3.14	Resultados experimentais com <i>pipeline</i> a +7 graus	78
3.15	Comparação das amplitudes dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +7 graus com incertezas	80
3.16	Comparação dos valores de pressão média para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +7 graus	80
3.17	Comparação dos períodos dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +7 graus	81
3.18	Resultados experimentais com <i>pipeline</i> a +6 graus	82
3.19	Resultados experimentais com <i>pipeline</i> a +5 graus	84
3.20	Comparação das amplitudes dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +6 graus com incertezas	85
3.21	Comparação dos valores de pressão média para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +6 graus	85
3.22	Comparação dos períodos dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o <i>pipeline</i> a +6 graus	86
A.1	Principais equipamentos da bancada experimental	97
B.1	Valores de erro para vazões mássicas médias do medidor de Coriolis.	102
B.2	Resumo das incertezas dos equipamentos.	102
C.1	Dados para a calibração da placa 2.	103
E.1	Tabela de incertezas para o caso com <i>pipeline</i> a +10 graus.	109

E.2	Tabela de incertezas para o caso com <i>pipeline</i> a +9 graus.	119
E.3	Tabela de incertezas para o caso com <i>pipeline</i> a +8 graus.	129
E.4	Tabela de incertezas para o caso com <i>pipeline</i> a +7 graus.	137
E.5	Tabela de incertezas para o caso com <i>pipeline</i> a +6 graus.	142
E.6	Tabela de incertezas para o caso com <i>pipeline</i> a +5 graus.	146

LISTA DE SIGLAS

AI	Entrada de saída analógica (<i>Analogic Input</i>)
AO	Saída de saída analógica (<i>Analogic Output</i>)
CLP	Controlador lógico programável
DI	Entrada de saída digital (<i>Digital Input</i>)
DO	Saída de saída digital (<i>Digital Output</i>)
NDF	Núcleo de Dinâmica de Fluidos
OSC	Oscilação (<i>Oscillation</i>)
PID	Controle proporcional integral derivativo
SS1	Intermitência severa 1 (<i>Severe slugging 1</i>)
SS2	Intermitência severa 2 (<i>Severe slugging 2</i>)
SS3	Intermitência severa 3 (<i>Severe slugging 3</i>)

LISTA DE VARIÁVEIS

Alfabeto grego

α	Fração de vazio
α_b	Fração de vazio na base do <i>riser</i>
α_p	Fração de vazio no <i>pipeline</i>
α_{cl}	Fração de vazio de gás penetrando na coluna de líquido
β_p	Inclinação do <i>pipeline</i> com a horizontal
β_r	Ângulo do <i>riser</i> em relação a vertical
γ	Coefficiente adiabático
ρ	Densidade
ρ_l	Densidade do líquido
ρ_g	Densidade do gás
ρ_m	Densidade da mistura
σ	Incerteza

Alfabeto latino

a	Velocidade do som
A	Área de passagem
C_d	Parâmetro do modelo de <i>drift</i>
C_{db}	Parâmetro do modelo de <i>drift</i> na base do <i>riser</i>
c_p	Calor específico
d	Diâmetro da placa de orifício
D	Diâmetro da tubulação do sistema <i>pipeline-riser</i>
E	Erro de medição
$\bar{f}$	Fator de atrito médio de Darcy
g	Aceleração da gravidade
h	Altura do <i>riser</i>
j	Velocidade superficial total
j_b	Velocidade superficial na base do <i>riser</i>
j_{gb}	Velocidade superficial de gás na base do <i>riser</i>
j_{gs}	Velocidade superficial de gás do <i>pipeline</i>
j_{g0}	Velocidade superficial de gás em condição de referência
j_l	Velocidade superficial de líquido
j_{lb}	Velocidade superficial de líquido na base do <i>riser</i>
j_{ls}	Velocidade superficial de líquido do <i>pipeline</i>
j_{l0}	Velocidade superficial de líquido em condição de referência
l	Comprimento do <i>pipeline</i>
L	Comprimento do tubo capilar/Espessura da placa de orifício
L_e	Comprimento do <i>buffer</i>
l_g	Comprimento equivalente do volume de gás
Ma	Número de Mach
$\dot{m}_{g0}$	Vazão mássica de gás
P	Pressão
P_g	Pressão de gás
$\bar{P}_g$	Pressão de gás média
P_p	Pressão hidrostática no <i>pipeline</i>

P_{pb}	Pressão na base do <i>riser</i>
P_{ps}	Pressão no <i>pipeline</i>
P_s	Pressão no separador
P_0	Pressão atmosférica
Q_{l0}	Vazão volumétrica de líquido
qm	Vazão mássica medida
R	Constante do gás
s	Espaço
T	Temperatura
t	Tempo
u	Velocidade característica do gás
u_g	Velocidade de gás
u_l	Velocidade de líquido
U_d	Parâmetro do modelo de <i>drift</i>
U_{db}	Parâmetro do modelo de <i>drift</i> na base do <i>riser</i>
v	Velocidade do gás
x	Penetração de líquido no <i>pipeline</i>
z	Valor tabelado para cálculo de erro

Sumário

1	Introdução	25
1.1	Objetivos	26
1.2	Intermitência severa	28
1.3	Revisão bibliográfica	32
1.3.1	Histórico	32
1.3.2	Trabalho experimentais de intermitência severa	38
1.3.3	Mitigação de intermitência severa	41
1.4	Estrutura da dissertação	42
2	Materiais e métodos	45
2.1	Bancada experimental	45
2.1.1	Controle da vazão mássica de gás	50
2.1.1.1	Região A	51
2.1.1.2	Região B	51
2.1.1.3	Região C	52
2.2	Metodologia	54
2.2.1	Procedimentos de operação	54
2.2.2	Calibração das placas de orifício	55
2.2.3	Medições de intermitência severa	58
2.2.4	Comparação com métodos numéricos	60
2.2.5	Pressão variável no separador	62
2.2.6	Considerações operacionais	62
2.2.7	Análise de dados	63
3	Resultados e discussão	65
3.1	Inclinação do <i>pipeline</i> : +10 graus	66
3.2	Inclinação do <i>pipeline</i> : +9 graus	70
3.3	Inclinação do <i>pipeline</i> : +8 graus	74
3.4	Inclinação do <i>pipeline</i> : +7 graus	78
3.5	Inclinação do <i>pipeline</i> : +6 e +5 graus	82
3.6	Pressão variável no separador	87
4	Conclusões	89
	REFERÊNCIAS	93
	Apêndice A - Bancada experimental	97
A.1	Fotos do laboratório	98
	Apêndice B - Análise de incertezas	101
	Apêndice C - Calibração das placas de orifício	103
	Apêndice D - Métodos numéricos	105
D.1	<i>Pipeline</i>	105
D.2	<i>Riser</i>	106
D.3	Acoplamento entre <i>pipeline</i> e o <i>riser</i>	108

Apêndice E - Resultados experimentais	109
E.1 Inclinação do <i>pipeline</i> : +10 graus	109
E.2 Inclinação do <i>pipeline</i> : +9 graus	119
E.3 Inclinação do <i>pipeline</i> : +8 graus	129
E.4 Inclinação do <i>pipeline</i> : +7 graus	137
E.5 Inclinação do <i>pipeline</i> : +6 graus	142
E.6 Inclinação do <i>pipeline</i> : +5 graus	146

1 Introdução

A presença de escoamentos multifásicos ocorre em diversos fenômenos naturais e industriais. Alguns exemplos que podem ser citados são o escoamento em condensadores, trocadores de calor, evaporadores, destiladores, processos siderúrgicos, entre vários outros. Sistemas de produção de petróleo também se encaixam nesta definição pelo escoamento multifásico ser composto essencialmente por três fases: água, gás e óleo. Outras substâncias como areia e argila podem estar presentes a depender da formação do reservatório, mas de modo geral considera-se essas três fases. O escoamento multifásico é caracterizado por possuir duas ou mais fases e ser complexo devido às fases serem distintas fisicamente uma das outras além de apresentar um comportamento em sua interface que muitas vezes é impossível de ser determinado.

O conhecimento geral sobre o comportamento do escoamento multifásico é de grande importância na exploração *offshore* devido à necessidade de saber como o escoamento dos fluidos se comporta desde a saída do reservatório até sua chegada na plataforma. O crescente avanço da produção de petróleo para águas profundas e ultra-profundas faz com que os sistemas de dutos se tornem cada vez mais longos e o conhecimento do comportamento do escoamento nesse trajeto ganha um maior peso na etapa de produção. No Brasil a região do pré-sal tem recebido um grande destaque nos últimos anos pelo tamanho das reservas e produtividades dos poços onde se verificam longos trechos de tubulação pelo fato dos reservatórios de petróleo se encontrarem a profundidades que podem chegar a mais de 5 *km*.

O comportamento do escoamento multifásico nos dutos que se encontram no leito oceânico são caracterizados por certos padrões de escoamento. O tipo de padrão de escoamento mais comum na produção de petróleo é o padrão intermitente em golfada ou *slug* caracterizado por uma distribuição axial intermitente de líquido e gás. Nesse escoamento o gás é transportado como bolhas entre golfadas de líquido.

A intermitência severa ou “golfada severa” (*severe slugging*) se origina do padrão de golfada que muda devido às condições geométricas e de escoamento. Esse fenômeno é conhecido por ocorrer para baixos valores de vazão e em pontos de cota baixa, isto é, em sistemas que possuem, por exemplo, um *pipeline* descendente no leito oceânico e um *riser* ascendente até a plataforma. Além disso, é um fenômeno predominado por efeitos gravitacionais. A faixa de valores de vazão que são baixas dependem fortemente das condições das tubulações no leito oceânico, de modo que não é possível afirmar valores com exatidão. Também deve-se levar em consideração que informações relacionadas diretamente com a produção costumam ser confidenciais de modo que dificilmente valores são revelados.

Um caso típico de intermitência severa é caracterizado pelo acúmulo de líquido na base do *riser* causando o impedimento da passagem de gás. O gás se comprime no *pipeline* e depois de que a pressão na base do *riser* atinge seu valor máximo, a fase gasosa escoar de forma de estouro. Após a passagem de gás o líquido volta a se acumular na base do *riser*. Assim um ciclo se inicia onde há a alternância de vazões entre a fase líquida e gasosa. Esses ciclos podem durar por horas, dependendo da extensão do *riser*, sendo caracterizados por possuírem altas oscilações de vazão e pressão prejudicando o comportamento das unidades de processamento primário em plataformas acarretando em grandes perdas financeiras. Durante a intermitência severa ocorrem picos de pressão de altos valores que podem acabar causando o desligamento do sistema de separação na plataforma. Seu estudo é relativamente recente por ser um fenômeno fortemente ligado com a produção *offshore* de petróleo. A Petrobras reportou seus primeiros problemas com intermitência severa nos anos de 1984 e 1985 como pode ser visto em [Wordsworth et al. \(1998\)](#).

A partir de um projeto em andamento com a Petrobras foi realizado a construção do Laboratório Multipropósito de Escoamento Multifásico no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo com o objetivo de que uma instalação fosse capaz de estudar diferentes fenômenos multifásicos incluindo a intermitência severa. Este laboratório possui um sistema *pipeline-riser* onde o *pipeline* pode ser inclinado em relação à horizontal e trabalha com os fluidos água e ar. Transdutores de pressão e temperatura foram instalados nas posições de interesse da bancada. Um medidor de Coriolis é usado para medir a vazão mássica de gás enquanto um medidor eletromagnético obtém os valores de vazão volumétrica de água.

Após escoar pelo *riser* os fluidos se dirigem a um separador com o objetivo de separar as duas fases. Há um tanque de acumulação de água que garante que haja um volume suficiente de água a ser usada no circuito. As vazões de fluidos devem ser baixas e para o controle de vazão mássica de gás foi criado um sistema que usa placas de orifício. O controle da bancada experimental é automatizado através do uso de um controlador lógico programável da empresa Yokogawa.

1.1 Objetivos

O fenômeno de intermitência severa tem sido estudado numericamente no Núcleo de Dinâmica de Fluidos (NDF) em conjunto com a Petrobras. Levando isso em consideração sempre foi desejado que estudos experimentais próprios fossem realizados para a validação dos modelos criados. A criação do Laboratório Multipropósito de Escoamentos Multifásicos tem como objetivo poder promover a realização de experimentos capaz de prover dados para essa validação. Deve-se considerar que a bancada experimental não foi projetada somente para esse fim, apesar desse tema ser o foco inicial.

A bancada experimental consiste de um sistema *pipeline-riser* em que o *pipeline* simula a tubulação que se encontra no leito oceânico enquanto o *riser* realiza a conexão vertical do *pipeline* à plataforma. A intermitência severa é considerada como um caso de instabilidade caracterizada pela presença de ciclos com altas variações de pressão e vazão quando comparada a um caso contínuo de vazão durante a produção.

Neste trabalho o principal objetivo foi realizar um estudo inicial sobre o comportamento do escoamento bifásico de água-ar em um sistema *pipeline-riser* para verificar em que condições ocorre instabilidade, ou seja, intermitência severa. O critério de instabilidade definido foi baseado através de visualização do escoamento onde se verificava claramente ciclos com variações de vazão de fluidos e pela análise da pressão na base do *riser*. Um caso estável tende a manter um valor de pressão aproximadamente constante com pequenas amplitudes enquanto um caso instável apresenta grandes flutuações de pressão com o tempo.

Os experimentos visaram determinar as mais importantes variáveis experimentais (históricos de pressões e vazões, períodos do fenômeno) em diferentes condições de operação. Esses dados foram usados como base para a criação de mapas de estabilidade para diferentes condições geométricas do sistema *pipeline-riser*, isto é, diferentes inclinações do *pipeline*. Um mapa de estabilidade representa as regiões em que se observa escoamento estável ou instável em função das velocidades superficiais dos fluidos em uma condição de referência. Os principais parâmetros considerados nos experimentos foram a pressão e temperatura na base do *riser*, vazões dos fluidos e a pressão no separador. A variação de pressão no separador foi estudada como meio de mitigação da intermitência severa.

Além disso, uma comparação dos resultados experimentais contra modelos numéricos desenvolvidos no Núcleo de Dinâmica de Fluidos (NDF) sobre a intermitência severa e estabilidade de escoamento foi realizada. O modelo de teoria de estabilidade linear ([Azevedo et al. \(2015\)](#)) prevê a faixa de transição entre a região estável e instável enquanto que os modelos numéricos desenvolvidos por Baliño ([Baliño et al. \(2010\)](#) e [Baliño \(2014\)](#)) foram usados para comparar a flutuação de pressão na base do *riser*.

A classificação de intermitência severa e um estudo visual mais aprofundado não foram consideradas neste trabalho por falta de recursos que possam garantir resultados confiáveis. Outro método de mitigação que não foi abordado neste trabalho por restrições técnicas foi o uso de injeção de gás na base do *riser*.

1.2 Intermitência severa

Na produção de petróleo um escoamento multifásico complexo flui a partir do meio poroso sendo composto essencialmente por água, gás e óleo. Várias outras substâncias e impurezas como areia também podem estar presentes. O comportamento do escoamento é fortemente influenciado pela presença de várias fases onde a determinação do gradiente de pressão é de difícil obtenção. As diferenças de propriedades físicas entre as fases como densidade e viscosidade são os principais fatores que afetam o escoamento. A forma e a posição das interfaces entre as fases também possuem uma forte influência em seu comportamento. Considerando que o sistema em estudo se trata de um sistema *pipeline-riser* é importante que se saiba quais são os tipos de escoamentos possíveis nos trechos horizontal (*pipeline*) e vertical (*riser*).

Figura 1.1: Padrões de escoamento na vertical (Collier, 1972).

A Figura 1.1 apresenta os padrões mais comuns de escoamento na vertical onde a vazão de gás aumenta em relação a vazão de água da esquerda para a direita. O padrão de bolhas (*bubble flow*) é o padrão comum onde a fase gasosa de baixa vazão se mantém dispersa em formato de bolhas. Com o aumento da vazão de gás, o padrão de golfadas (*slug flow*) surge. Esse escoamento é do tipo intermitente onde a fase gasosa flui de forma intermitente, alternada com a fase líquida. O padrão anular (*annular flow*) ocorre quando a vazão da fase gasosa é muito maior que a de líquido. Nesse caso o gás escoar pelo centro e o líquido em sua volta. O padrão de transição (*churn flow*) pode surgir entre o padrão de golfadas e o anular.

Para o caso de padrões na horizontal (Figura 1.2) há uma divisão mais detalhada, embora o comportamento seja similar com os padrões na vertical. Neste caso a vazão de gás é maior nas situações inferiores. Duas novas divisões podem ser encontradas para o escoamento na horizontal: padrões estratificados (*stratified flow*) e de bolhas dispersas (*dispersed bubble flow*). Os padrões estratificados ocorrem em tubulações horizontais ou com baixa inclinação

Figura 1.2: Padrões de escoamento na horizontal (Collier, 1972).

onde o líquido escoar na parte inferior por ser mais denso. A divisão entre suave e ondulado é indicada pelo tipo de interface entre as duas fases. Uma interface ondulada é observada para vazões maiores de gás enquanto para baixas vazões a interface é suave. O padrão de bolhas dispersas é caracterizado por uma alta vazão da fase gasosa em que bolhas são formadas, mas ao contrário do caso de bolhas alongadas elas ficam dispersas no interior da fase líquida.

Outra classificação existente e simplificada dos escoamentos pode ser dada por: escoamentos separados, intermitentes e dispersos. Nos escoamentos separados (estratificado, anular) ambas as fases são contínuas com a presença de algumas gotas ou bolhas. Nos escoamentos intermitentes (bolhas alongadas, golfadas, transição) ao menos uma fase é descontínua e nos escoamentos dispersos (bolhas, bolhas dispersas) a fase líquida é contínua enquanto a fase gasosa é descontínua.

A intermitência severa é um fenômeno cíclico em que ocorre acumulação de líquido na base do *riser* sendo que as condições para que ela ocorra são baixas vazões de fluidos e uma grande diferença de cotas na tubulação. O fenômeno ocorre pelo fato de que não há energia suficiente do gás para desbloquear o acúmulo de líquido no *riser*. Uma possível situação é o caso em que há um escoamento estratificado no *pipeline* em um sistema *pipeline-riser* de baixo ângulo como pode ser visto na Figura 1.3. Para baixas vazões o padrão em golfadas costuma ser observado no *riser*. Quando o sistema se desestabiliza a passagem do gás pode ser bloqueada na base do *riser* dando início ao ciclo de intermitência severa.

O ciclo como um todo pode ser visto na Figura 1.4 e é dividido em quatro etapas: (a) formação de *slug*, (b) produção de *slug* até o separador, (c) penetração de gás (*blowout*) e (d) retorno de líquido. A formação de *slug* é caracterizada como o acúmulo de líquido na base do

Figura 1.3: Escoamento permanente estratificado no *pipeline* (Taitel, 1986).

riser devido à efeitos gravitacionais bloqueando a passagem de gás. O *slug* é definido como a grande quantidade de líquido que se acumula no *riser*. O acúmulo se inicia quando o líquido da parte de trás do *slug* começa a acumular na base do *riser*. Quando o aumento da pressão hidrostática de líquido nessa região for maior que a pressão causada pela vazão de gás, o ciclo começa efetivamente. Assim a pressão nesse ponto começa a aumentar com o acúmulo de líquido e a comprimir o gás no *pipeline* (Figura 1.4a).

A produção de *slug* (Figura 1.4b) é o processo no qual o nível de líquido atinge seu ponto máximo, isto é, o separador resultando na pressão máxima na base do *riser*.

Com isso a etapa de penetração de gás começa (Figura 1.4c). A frente de acumulação de líquido é puxada de volta por uma parte do líquido começar a sair pelo topo e o gás começar a entrar pelo *pipeline*.

Como consequência dessa penetração a pressão na base do *riser* vai diminuindo e a vazão de gás aumenta. Após a chegada de gás no topo do *riser* ocorre a formação do escoamento estratificado no *pipeline* e um escoamento intermitente/anular no *riser*. Esse fato somado a rápida descompressão do gás gera uma violenta expulsão do mesmo da coluna, seguido de uma forte descompressão que reinicia o processo de formação de *slug* (Figura 1.4d). A Figura 1.5 mostra como a pressão varia na base do *riser* em um ciclo de intermitência severa sob condições de laboratório.

Com isso pode-se reiterar as características da intermitência severa que acabam sendo prejudiciais para a produção de petróleo. Os altos valores de pressão alcançados durante o ciclo fazem com que haja perda na produção devido ao fato de que a vazão produzida é dependente da diferença de pressão entre o reservatório e a cabeça do poço. O valor médio de pressão em

Figura 1.4: Ciclo de intermitência severa (Taitel, 1986).

Figura 1.5: Variação de pressão em um ciclo de intermitência severa (Schmidt (1977)).

um ciclo de intermitência severa acaba sendo maior que para um caso estacionário, logo a vazão do reservatório tende a ser menor em média resultando em menor produção.

Além disso, altos valores de oscilações de vazão podem causar instabilidades no sistema

de controle de fluidos dos separadores podendo até mesmo causar um *shutdown* durante os picos de pressão. Isso se deve ao fato de que a vazão instantânea pode ser de uma grandeza muito maior que a de um estado estacionário para o qual o sistema de separação é planejado. O fato de que cada ciclo pode chegar a durar horas, a depender da extensão da tubulação, acentua ainda mais a importância da compreensão do fenômeno.

Uma classificação de intermitência severa foi realizada por [Tin e Sarshar \(1993\)](#) levando em consideração o regime de fluxo: Intermitência Severa 1 (*Severe Slugging 1*, SS1), Intermitência Severa 2 (*Severe Slugging 2*, SS2), Intermitência Severa 3 (*Severe Slugging 3*, SS3) e Oscilação (*Oscillation*, OSC).

Intermitência Severa 1 é caracterizada pelo comprimento do *slug* de líquido ser maior ou igual ao comprimento do *riser* e onde a pressão máxima do *pipeline* é aproximadamente igual à pressão na coluna hidrostática do *riser* (desprezando outros efeitos como inércia ou atrito). Na Intermitência Severa 2 o comprimento do *slug* é menor que a altura do *riser* com penetração de bolhas intermitentes durante a produção de *slug*. O líquido também pode retroceder até o *pipeline* durante a fase de retorno de líquido.

Na Intermitência Severa 3 a passagem de gás não é bloqueada na base do *riser*. O escoamento lembra visualmente um escoamento *slug*, embora o comprimento de *slug* e as frequências mostrem variações de ciclos de menores amplitudes e período quando comparado com SS1. Na Oscilação há flutuações de pressão sem a ocorrência de gás *blowdown* espontânea e vigorosa.

1.3 Revisão bibliográfica

Nesta subseção foi realizada uma revisão bibliográfica que foi dividida em três partes. Primeiramente foi descrito um breve histórico de como a intermitência severa tem sido estudada desde que foi descoberta. Na segunda parte os trabalhos com focos experimentais foram detalhados e por fim, foram apresentados alguns dos meios de mitigação estudados até aqui.

1.3.1 Histórico

Os problemas relacionados ao fenômeno de intermitência severa foram identificados inicialmente por [Yocum \(1973\)](#). Alguns anos depois [Schmidt \(1977\)](#) apresentou um dos primeiros trabalhos experimentais em que a intermitência severa foi estudada.

[Schmidt et al. \(1979a\)](#) desenvolveram um modelo hidrodinâmico simples de intermitência severa levando em consideração as seguintes hipóteses:

- Vazões de fluidos permanecem constante durante a intermitência severa.

- Pressão no separador é mantida constante.
- Os líquidos de *slug* formados no *pipeline* e no *riser* não contêm bolhas.

Em outro trabalho Schmidt et al. (1979b) reconheceram que *choking*, isto é, o fechamento parcial da válvula no separador, poderia ser usado para eliminar a intermitência severa, porém nenhum estudo detalhado sobre esse comportamento foi apresentado na época.

Bøe (1981) definiu um critério de estabilidade para prever em que condições ocorre intermitência severa. A Eq. (1) estima uma curva para obter a faixa de velocidades superficiais mínimas de líquido para as quais a intermitência severa pode ocorrer. Essa equação se baseou no trabalho de Schmidt et al. (1979a):

$$j_l \geq \frac{P_p}{\sin \beta_r \rho_l g l_g (1 - \alpha)} j_g \quad (1)$$

onde j_l e j_g indicam, respectivamente, as velocidades superficiais de líquido e gás, P_p a pressão hidrostática na entrada do *pipeline*, β_r o ângulo do *riser* em relação a vertical considerado para casos em que o *riser* não é vertical, ρ_l a densidade do líquido, g a aceleração da gravidade, l_g o comprimento equivalente do volume de gás que se encontra no *pipeline* e α a fração de vazio. O limite superior da região em que ocorre intermitência severa é obtido por uma equação baseada na transição entre o padrão estratificado para o padrão intermitente ou anular:

$$j_g \leq (1 - \alpha)^{5/2} \left[\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g} g D \cos \beta_p \right]^{1/2} \quad (2)$$

onde β_p é a inclinação do *pipeline* com a horizontal e D o diâmetro da tubulação.

Taitel (1986) apresentou um critério de estabilidade para sistemas *pipeline-riser* (Eq. (3)) considerando a diferença de pressão entre o *pipeline* e o *riser* baseado na perturbação da condição de regime permanente devido à penetração de gás no *riser*. As vazões de fluidos foram desconsideradas no processo de perturbação deste critério:

$$\frac{P_s}{P_0} > \frac{\frac{\alpha}{\alpha_{cl}}(l - h)}{\frac{P_0}{\rho_l g}} \quad (3)$$

onde P_s é a pressão no separador, P_0 a pressão atmosférica, α_{cl} é a fração de vazio de gás penetrando na coluna de líquido, l o comprimento do *pipeline* e h a altura do *riser*. O critério prediz que para maiores valores de pressão no separador e maiores comprimentos do *riser* o sistema é mais estável. O aumento do comprimento do *pipeline* descendente contribui para a instabilidade do sistema. Os resultados foram comparados com Schmidt (1977).

A Figura 1.6 mostra um exemplo de mapa de estabilidade obtido em seu trabalho. As variáveis U_{GS0} e U_{LS} indicam as velocidades superficiais de gás e água respectivamente. Pode-se ver a curva de estabilidade definida pelo critério de Boe e três tipos de resultados experimentais: escoamento em regime permanente, caso cíclico sem queda de líquido e caso cíclico com queda de líquido. A diferença entre os casos cíclicos é explicada pela ocorrência de uma fase onde há passagem de gás causando ou não queda de líquido nas bordas da tubulação.

Figura 1.6: Exemplo de um mapa de estabilidade usando o critério de Bøe representado pela linha contínua (Taitel, 1986).

Pots et al. (1987) estabeleceram um critério de estabilidade baseado na razão entre o aumento da pressão de gás no *pipeline* pelo aumento da pressão hidrostática na base do *riser*. Se o aumento da pressão de gás no *pipeline* por unidade de tempo for menor que o ganho de pressão hidrostática, o líquido se acumulará na base do *riser*. Intermitência severa 1 ocorre quando essa condição é satisfeita.

Em Moe et al. (1989) foi desenvolvido um modelo para prever a propagação do *slug* severo em um sistema *pipeline-riser*. Equações de conservação de massa e de momento foram usadas em uma série de volumes de controle móveis. As características da intermitência severa obtidas neste trabalho ficaram limitadas às vazões de líquido e velocidades de *slug*.

Uma vertente de pesquisas começou no Departamento de Engenharia de Petróleo da Universidade de Tulsa com a dissertação de mestrado de Vierkandt (1988). Vários outros trabalhos foram realizados nos anos seguintes como Jansen et al. (1996) que modelaram o problema de intermitência severa estendendo o modelo de Taitel (1986) para considerar a injeção de gás na base do *riser* e também verificar o efeito de *choking*. Tengesdal (2002) estudou o método de *self-lifting* como meio de mitigação de intermitência severa neste mesmo laboratório.

A Figura 1.7 mostra um resultado do trabalho de Jansen et al. (1996) onde pode-se ver um mapa de estabilidade definindo algumas regiões com base no critério de Boe. A região in-

Figura 1.7: Mapa de estabilidade (Jansen et al., 1996).

terna ao critério de Boe é onde ocorre intermitência severa enquanto que a região fora do critério de Boe, mas dentro dos limites de escoamento permanente é definida uma região de transição com oscilações em regime não-permanente.

Fabre et al. (1990) reconheceram que intermitência severa é essencialmente a propagação de instabilidades de larga escala em uma coluna vertical de líquido. Neste trabalho a intermitência severa foi modelada resolvendo as equações locais instantâneas de massa e momento pelo método das características. Esses resultados foram comparados com experimentos realizados em um *pipeline* de 25 m inclinado de 0,5294 graus seguido de um *riser* de 13,5 m. Esse sistema possui diâmetro de 0,053 m e os fluidos usados foram água e ar.

Em Taitel et al. (1990) foram realizados alguns experimentos na Universidade de Tulsa em que foram identificados três comportamentos após a penetração do gás no *riser*: a) oscilação que acaba resultando em um estado permanente estável (*stable steady state*), b) operação cíclica sem queda de líquido (*cyclic process without fallback*) e c) operação cíclica com queda de líquido (*cyclic process with fallback*). Um modelo teórico capaz de prever esses comportamentos também foi desenvolvido. Assim como no trabalho anterior o modelo é predominado por efeitos de gravidade onde foi considerado uma fração de vazio constante no conduto descendente e uma massa específica média no *riser*.

Sarica e Shoham (1991) apresentaram um modelo simplificado unidimensional para um sistema *pipeline-riser* vertical dominado pela gravidade. Este modelo conseguiu mostrar com grande acurácia algumas variáveis do sistema como as pressões transientes no *pipeline*, acumulação de líquido, comprimento do *slug* e o tempo de ciclo para todas as condições de escoamento. Várias comparações foram realizadas com os trabalhos experimentais da época como Fabre et al. (1990), Vierkandt (1988) e Taitel et al. (1990) juntamente com o uso das linhas de

estabilidade de [Bøe \(1981\)](#) e [Taitel \(1986\)](#).

A Petrobras juntamente com a empresa CALTEC realizou um estudo para verificar experimentalmente a influência da pressão no comportamento do escoamento multifásico em um sistema *pipeline-riser* em catenária, além de obter dados importantes sobre a intermitência severa. Neste trabalho de [Wordsworth et al. \(1998\)](#) foram usados água e ar numa faixa de pressão de 1 a 15 *barg* em um *pipeline* de 60 *m* inclinado de +2 graus conectado a um *riser* de 33 *m* em uma tubulação de 2 polegadas de diâmetro.

O trabalho de [Almeida e Gonçalves \(1999\)](#) apresentou um método de mitigação de intermitência severa usando um dispositivo de Venturi que acelera o fluido numa posição próxima à junção ao *riser* eliminando o escoamento estratificado na região. Esse dispositivo foi testado experimentalmente em pequena escala.

[Molyneux et al. \(2000\)](#) desenvolveram um mecanismo de controle em *feedback* no qual a vazão de gás no separador é aumentada quando se verifica a presença de intermitência severa através de medições de pressão na base do *riser*. Esse aumento de vazão diminui a pressão no separador, aumentando a força impulsora do *slug* de modo que os *slugs* curtos se moviam do *riser* para os equipamentos na plataforma. Foi verificado também que a intermitência severa voltava a ocorrer caso o mecanismo fosse desligado.

[Zakarian \(2000\)](#) realizou um estudo sobre a estabilidade linear em sistemas *pipeline-riser* vertical para casos bifásicos. As equações gerais do escoamento bifásico consideram variações lineares no espaço no *riser* enquanto uma conservação de momento linear simplificada foi integrada juntamente com as equações de conservação de massa para o gás e líquido. Os mapas de estabilidade apresentaram bons resultados quando comparados com casos experimentais de literatura. O modelo de [Zakarian \(2000\)](#) foi estendido por [Burr e Baliño \(2013\)](#) adicionando efeitos de atrito e configurações com o *pipeline* tendo inclinação positiva.

A tese de doutorado de [Montgomery \(2002\)](#) visou estudar a intermitência severa e fluxos instáveis em um *riser* em S. O estudo teve três diferentes focos: experimental, critério de modelagem e a criação de um código transiente. Todos os tipos de intermitência severa foram identificados no estudo experimental enquanto o critério de estabilidade proveu bons resultados apesar de superestimar a velocidade máxima de gás para fluxos instáveis. Este foi um dos primeiros trabalhos na área que usou funções de densidade de probabilidade para identificar padrões de escoamento na área de intermitência severa.

Em [Storkaas e Skogestad \(2007\)](#) um modelo foi criado com base nas equações diferenciais parciais para um caso bifásico em que foram estudadas as propriedades da controlabilidade de um sistema *pipeline-riser*. Verificou-se que a intermitência severa poderia ser evitada com o uso de um sistema simples para o controle da válvula no topo do *riser*.

No trabalho de [Baliño et al. \(2010\)](#) um modelo que considera fluxo unidimensional para o *pipeline* e o *riser* foi criado. O líquido foi considerado como incompressível enquanto o gás foi considerado como gás ideal onde ambos se encontram em condições isotérmicas. Efeitos de inércia não foram considerados valendo assim o modelo de NPW (*no pressure wave*). [Nemoto e Baliño \(2012\)](#) estenderam esse modelo para um sistema trifásico de água-gás-óleo enquanto que em [Baliño \(2014\)](#) o modelo foi estendido para levar em conta efeitos de inércia e a influência de dispositivos para mitigação da intermitência severa (*choking* e injeção de gás). [Azevedo et al. \(2015\)](#) aplicaram a teoria de estabilidade linear tendo como base o modelo de [Baliño et al. \(2010\)](#) onde uma rotina foi criada para determinar a curva de estabilidade. Além disso, meios de mitigação como o *choking* e a injeção de gás na base do *riser* também foram estudados.

[Mokhatab \(2010\)](#) realizou uma revisão geral sobre a intermitência severa em sistemas que usam água e ar. Alguns dos trabalhos experimentais mais recentes que podem ser citados são [Xiaoming et al. \(2011\)](#) e [Malekzadeh et al. \(2012\)](#). Em [Xiaoming et al. \(2011\)](#) foi observado intermitência severa para um *pipeline* sem inclinação enquanto o trabalho de [Malekzadeh et al. \(2012\)](#) mostrou bons resultados e conseguiu capturar vários padrões para um sistema com um *pipeline* longo de 35 m.

Figura 1.8: Mapa de estabilidade para *pipeline* sem inclinação ([Xiaoming et al., 2011](#)).

A Figura 1.8 mostra o mapa de estabilidade obtido no trabalho para um *pipeline* sem inclinação. A região superior da curva de estabilidade não foi considerada. Verifica-se três tipos de intermitência severa, escoamento estável e a comparação com o critério original de Boe e um critério revisado de Boe.

Em Ye e Guo (2013) foi realizado um estudo para a identificação da intermitência severa em sistemas *pipeline-riser* através da análise estatística de flutuações de pressão. Foram identificados várias situações diferentes que são correspondentes a certos comportamentos das curvas de função de densidade de probabilidade. O modelo foi comparado com resultados experimentais realizados na Universidade Xi'an Jiaotong na China.

Xing propôs um dispositivo para condicionar o escoamento próximo à base do *riser* para mudar o padrão de escoamento nessa região. O estudo foi realizado experimentalmente (Xing et al., 2013a) e numericamente (Xing et al., 2013b).

Pode-se considerar que a intermitência severa é um fenômeno recente e tem sido estudado por ser atrelado à perdas de produtividade na exploração de petróleo. Vários estudos foram realizados com o objetivo de prever a curva de estabilidade para diferentes sistemas *pipeline-riser*. Para casos experimentais o *riser* costuma ser vertical, mas existem modelos numéricos e analíticos que consideram outras configurações como *risers* em catenária ou com inclinação variável.

Verifica-se que os resultados obtidos são mostrados de forma geral através de mapas de estabilidade ou de fórmulas que visam prever a região de transição entre a intermitência severa e condições estáveis de produção.

1.3.2 Trabalho experimentais de intermitência severa

Uma descrição mais completa dos aparatos experimentais usados nos trabalhos mencionados anteriormente foi realizada nesta subseção. Trabalhos relacionados à mitigação de intermitência severa são citados na subseção seguinte.

O sistema experimental usado por Schmidt (1977) consiste de um *pipeline* inclinado de 30 m seguido por um *riser* vertical de 15 m. A tubulação é de 51 mm, aproximadamente 2 polegadas. Os fluidos usados foram ar e querosene com a pressão no separador se mantendo próxima ao valor da pressão atmosférica. No topo do *riser* uma tubulação descendente de 15 m se liga ao separador. O fato do separador não se encontrar na mesma altura do topo do *riser* fez com que o controle de pressão nele não fosse considerado. Nesse estudo foram identificados SS1, SS2, além de um padrão de transição para intermitência severa juntamente com padrões comuns como o padrão em golfadas, de bolhas e anular.

Vários trabalhos experimentais foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia de Petróleo da Universidade de Tulsa. As características básicas dessa bancada experimental são:

- Tubulação de PVC transparente R-4000 de 0,0254 m de diâmetro.
- *Riser* de 3 m.
- *Pipeline* capaz de ser inclinado entre -5 a +5 graus em relação à horizontal.

Os fluidos saem do topo do *riser* para uma tubulação de 0,203 m de diâmetro de PVC que serve como separador eliminando qualquer tipo de efeito sifão e permitindo um controle fácil de contra-pressão. O *pipeline* possui 9,1 m, mas seu comprimento pode ser estendido através de dois tanques de volume variáveis. Um esquema geral da bancada pode ser visto na Figura 1.9.

Figura 1.9: Esquema da bancada experimental da Universidade de Tulsa (Taitel, 1986).

Vierkandt (1988) usou o *pipeline* sem nenhuma extensão de comprimento enquanto que em Taitel et al. (1990) o comprimento foi estendido de 1, 69, 5, 1 e 10 m. As velocidades superficiais variaram entre 0,05 a 0,5 m/s para água e de 0,05 a 1,0 m/s para gás. No trabalho de Taitel todos os experimentos foram realizados para uma inclinação de -5 graus.

Em Jansen et al. (1996) um *pipeline* com comprimento equivalente de 10 m para uma inclinação de -1 grau foi usado. A faixa de velocidades superficiais de líquido e gás foram, respectivamente, de 0,05 a 0,35 m/s e de 0,05 a 0,5 m/s. Dois meios de mitigação foram estudados: o *choking* e o uso de uma injeção de gás. A injeção de gás no *riser* foi considerada

uma opção muito cara inicialmente devido ao fato de que um volume de gás muito grande seria necessário para que uma situação estável no sistema fosse obtida. Neste trabalho também foram modificados os critérios de estabilidade definidos em Taitel (1986) e Taitel et al. (1990) para estudar o efeito da válvula reguladora e da injeção de gás na base do *riser*.

Ainda na bancada da Universidade de Tulsa Tengesdal et al. (2002, 2003) realizaram trabalhos relacionados a mitigação de intermitência severa para inclinações usando o método de *self-lifting*. Mais detalhes sobre este método se encontram descritos na próxima subseção.

Em Fabre et al. (1990) a tubulação é de polyvinyl transparente e possui 0,053 m de diâmetro interno. Os fluidos usados foram água e ar que escoam em um *pipeline* de 25 m capaz de ser inclinado entre -8 a +8 graus seguido de um *riser* vertical de 13,5 m. A mistura de água e ar é separada por um separador gravitacional que funciona a pressão atmosférica. A vazão mássica de gás usada variou entre 0,2 a 30 m/s.

Wordsworth et al. (1998) realizaram experimentos em um sistema *pipeline-riser* de duas polegadas onde o *pipeline* de 57,4 m de comprimento é inclinado em -2 graus com a horizontal seguido por um *riser* em catenária de 9,9 m. A tubulação é de aço carbono. A pressão foi variada entre 1 e 15 barg e os fluidos usados foram água e ar.

Em Montgomery (2002) os experimentos foram realizados na Faculdade de Três Fases da Universidade de Cranfield onde água, ar e óleo lubrificante foram utilizados. O sistema *pipeline-riser* é de 2 polegadas no qual o *pipeline* se encontra inclinado em -2 graus em relação à horizontal tendo comprimento de 57,4 m. O *riser* em configuração *lazy S* possui 9,98 m de altura e comprimento total de 18 m. Uma linha horizontal de 3 m continua do topo do *riser* até um separador que simula o primeiro estágio de separação em plataformas.

Xiaoming et al. (2011) realizaram um estudo na China University of Petroleum para um sistema *pipeline-riser* que consiste de um *pipeline* de 10,6 m com inclinação variável de 0 a -4 graus. O *riser* vertical possui 4,1 m de comprimento e uma tubulação de 0,6 m é conectada a um separador de gás-líquido. O diâmetro da tubulação de PMMA transparente é de 0,051 m. A variação das velocidades superficiais para gás e líquido foi de 0,02 a 1,0 m/s para ambos os casos.

Na tese de Malekzadeh et al. (2012) os experimentos foram realizados em um *pipeline* de aço de 65 m conectado a um *pipeline* Perspex de 35 m com diâmetro de 0,058 m inclinado em -2,54 graus em relação à horizontal seguido por um *riser* de PVC de 15,5 m de diâmetro de 0,045 m operando a pressão atmosférica. Um tanque *buffer* de 250 l de gás se encontra a montante do *pipeline* para aderir mais compressibilidade ao *pipeline*. Os fluidos usados foram

água e ar.

Como pode-se ver nos trabalhos experimentais citados, os sistemas *pipeline-riser* variam muito entre cada trabalho. Diferentes comprimentos de *pipeline*, configurações de *riser* proporcionam diferentes resultados de modo que a criação de modelos analíticos e numéricos são de extrema importância. O uso de tanque *buffers* para aumentar o comprimento efetivo do *pipeline* também mostra o interesse em estudar sistemas mais longos considerando a real extensão de sistemas *pipeline-riser*. Verifica-se também que em alguns trabalhos a tubulação é transparente com o intuito de promover um estudo visual do fenômeno.

1.3.3 Mitigação de intermitência severa

Os meios de mitigação de intermitência severa podem ser divididos em duas categorias (Xing et al., 2013a): mitigação ativa ou passiva de *slug*. A principal diferença entre eles é a presença (ativa) ou não presença (passiva) de uma "interferência externa". Existem três principais tipos de mitigação ativa de *slug*: *choking* no topo do *riser*, injeção de gás externa e métodos baseados em controle. Alguns exemplos de trabalhos que estudaram a mitigação ativa são Schmidt et al. (1985) e Taitel (1986) no caso de *choking*, Jansen et al. (1996) estudaram a injeção de gás externa e Havre e Dalsmo (2002) estudaram modelos que ajustam válvulas para diferentes condições de operação e escoamento. O trabalho de Molyneux et al. (2000) também se encaixa nesta categoria. Trabalhos numéricos também levam em consideração a mitigação ativa de *slug* como pode ser visto em Baliño (2014) e Azevedo et al. (2015).

Os métodos de mitigação passiva de *slug* são menos flexíveis pelo fato de que o projeto do sistema dificilmente pode ser alterado uma vez já comissionado. O *slug catcher* é um método usado para suprimir os efeitos causados por *slugs* de líquidos ao usar um tanque *buffer* na saída do *riser* de maneira a armazenar temporariamente o líquido. Esse método quando aplicado à intermitência severa só consegue mitigar os efeitos por causa do limite de volume do tanque *buffer*.

Tengesdal (2002) estudou a técnica de *self-lifting* que consiste em transferir gás do *pipeline* até a base do *riser* como meio de eliminar a intermitência severa. Esse método possui a vantagem em relação à injeção de gás citada anteriormente por não necessitar de energia externa aproveitando a diferença de pressão entre o *pipeline* e a base do *riser*. Experimentos foram realizados na bancada experimental da Universidade de Tulsa para inclinações negativas de -1, -3 e -5 graus. Em Tengesdal et al. (2003) foi desenvolvido um modelo capaz de prever a região instável com o uso do *self-lifting*.

Outro método passivo consiste em condicionar o escoamento a montante do *pipeline*. A intermitência severa ocorre com um padrão estratificado no *pipeline*, logo maneiras de mudar

esse padrão na região próxima ao *riser* podem ser soluções viáveis de mitigação. Almeida e Gonçalves (1999) testaram experimentalmente um dispositivo de Venturi que acelera o escoamento nessa região eliminando o escoamento estratificado. Um dispositivo patenteado por Makogan e Brook (2007) consiste em usar um trecho ascendente seguido de uma seção horizontal ou um trecho descendente colocados a montante do *riser* (Figura 1.10).

Figura 1.10: Dispositivo para mitigação de intermitência severa patenteado por Makogan e Brook (2007).

Por fim, Xing et al. (2013a) propuseram um outro tipo de dispositivo para condicionar o escoamento que consiste no uso de *wavy pipe* ou tubulações em onda (1.10). A motivação veio do fato de que a intermitência severa ocorre com escoamento em padrão estratificado no *pipeline* e o uso de seções de tubulações não lineares acaba por modificar o padrão de escoamento multifásico na região. Em Xing et al. (2013b) foi realizado um estudo numérico bidimensional em que se verificou que fatores como posição e amplitude (razão da área pelo diâmetro) das tubulações em onda afetam os resultados. Para maiores amplitudes foi verificado que há uma maior redução no comprimento de *slug* severo, porém isso aumenta as forças de arrasto e empuxo. Também foi verificado que existe um local ótimo que permite o processo de penetração de gás iniciar mais cedo de modo que mais gás pode passar nessa fase.

A bancada experimental do laboratório multifásico usada no estudo possui a injeção de ar na base do *riser* como método de mitigação ativa de *slug*. Além disso, a pressão no separador pode ser variada como meio de mitigação de intermitência severa.

1.4 Estrutura da dissertação

A Introdução mostrou a importância sobre o estudo do fenômeno de intermitência severa e as suas principais características. Além disso, foi realizada uma revisão bibliográfica

Figura 1.11: Tubulação em onda (Xing et al., 2013a).

sobre o assunto abordado neste trabalho. A dissertação foi dividida em quatro capítulos principais incluindo a Introdução. O Capítulo 2 descreve a bancada experimental e contém toda a metodologia empregada no estudo. O Capítulo 3 mostra uma parte dos resultados com suas respectivas análises e o Capítulo 4 descreve as conclusões obtidas neste estudo.

Vários apêndices também ajudaram a complementar o conteúdo do trabalho. O Apêndice A tem como objetivo mostrar a bancada experimental com mais detalhes. O Apêndice B mostra uma revisão básica sobre a análise de incertezas e como elas foram aplicadas para o estudo. O Apêndice C mostra a curva de calibração da placa de orifício usada neste estudo. O Apêndice D descreve os modelos numéricos usados para comparação. O Apêndice E contém gráficos referentes aos experimentos realizados durante o estudo.

2 Materiais e métodos

Nessa Seção a bancada experimental e toda a metodologia utilizada neste estudo são apresentadas. Primeiramente uma apresentação da bancada experimental mostrando as características gerais do laboratório é realizada. Em seguida a teoria usada para garantir o controle de vazão mássica de gás é descrita. A subseção 2.2 (Metodologia) foi dividida em seis partes com conteúdo complementar apresentado em diversos apêndices.

2.1 Bancada experimental

O Laboratório Multipropósito de Escoamento Multifásico foi construído como parte de um projeto de pesquisa financiado pela Petrobras com o objetivo de obter dados experimentais para diversas linhas de pesquisa relacionadas com escoamento multifásico. A construção do laboratório ocorreu entre maio e dezembro de 2013 tendo sido realizada pela Empresa GMG Service (<http://www.gmgspbrasil.com.br/>). Uma breve descrição da bancada experimental é apresentada a seguir com informações complementares no Apêndice A.

Figura 2.1: *Layout* básico da bancada experimental.

O *layout* básico da bancada experimental mostrando os elementos básicos usados neste estudo pode ser visto na Figura 2.1. Há um sistema *pipeline-riser* de duas polegadas no qual o *pipeline* possui 7,2 metros e o *riser* 7 metros de comprimento projetado para trabalhar com pressão de até 10 *bara*. A tubulação do sistema *pipeline-riser* é de acrílico para facilitar a visualização do escoamento. Os fluidos utilizados são água e ar. Há a possibilidade da variação do ângulo do *pipeline* em relação a horizontal entre -1 a +10 graus. Ângulos positivos indicam *pipeline* descendente e ângulos negativos *pipeline* ascendente. O *pipeline* se encontra apoiado

em uma seção metálica. Um gincho é preso a essa seção para facilitar a movimentação do *pipeline* através de uma polia (Figura 2.2). Os ângulos são obtidos com o uso de um medidor de inclinação digital da Diginess que foi calibrado em relação ao piso do laboratório. Existe também um medidor de pressão diferencial na linha do *pipeline* e um no *riser*. Ambos não foram considerados neste estudo.

Figura 2.2: Configuração geral do *pipeline*.

O *riser* (Figura 2.3) foi posicionado de modo a ficar perpendicular à horizontal. Uma coluna de ferro já existente na estrutura do laboratório foi usada para servir de apoio ao *riser* com o uso de chapas de ferro. A ligação entre o *pipeline* e o *riser* foi realizada através de um fole cinza flexível.

No ponto mais alto do *riser* há uma tubulação de aço que faz a ligação até um separador centrífugo usado para separar as duas fases. O controle do nível de água no separador é realizado por duas chaves de nível (alta e baixa). Como condição básica de operação o nível de água é mantido entre a chave de nível baixa (40% do volume do separador) e alta (70% do volume). O ar sai do separador e é direcionada por uma tubulação de 1/2 polegada para ser descartada com segurança em um local que se encontra abaixo do piso do laboratório. Nessa mesma linha há uma válvula reguladora de pressão do separador que serve de controle para a condição de contorno do sistema. A água vinda do separador é direcionada até um tanque de acumulação de

Figura 2.3: *Riser*.

1000 litros onde fica armazenada até voltar a ser bombeada para o circuito.

Há uma válvula solenóide que controla a entrada de água para o enchimento da bancada experimental. O enchimento de água ocorre até que se atinja o nível da chave baixa do separador. Após isso a água é reutilizada até que se veja a necessidade de sua troca devido à presença de impurezas ou para a realização de operações na estrutura do laboratório.

Figura 2.4: Fluxograma da linha de ar.

A Figura 2.4 mostra um esquema simplificado da linha de ar. A tubulação é de 1/2 polegada e se inicia no compressor de modelo Aircenter SX3 da Kaeser. Há um medidor de vazão mássico de Coriolis de modelo Sitrans MAG 6000 (vazão mássica: $\dot{m}_{g0}$) que foi usado principalmente para a calibração de um sistema de placas de orifício. Esse sistema existe para realizar um controle de vazão mássica de ar para baixas vazões. A linha de gás acaba se bifurcando para uma entrada no *pipeline* e uma para a injeção de gás na base do *riser*. A injeção de gás no *riser* não foi utilizada neste estudo.

Em ambas as linhas há um sistema de placa de orifício. Medições de pressão e temperatura a montante da placa são realizadas para a obtenção das condições termodinâmicas do gás. Uma válvula a montante e a jusante são usadas para poder fechar o sistema e poder permitir a troca das placas caso seja necessário. Por fim a linha de gás é então conectada ao *pipeline* através de uma estrutura em diagonal com um ângulo aproximado de 45 graus em relação ao mesmo (Figura 2.5).

Figura 2.5: Conexão de linha de ar com o *pipeline*.

Figura 2.6: Fluxograma da linha de água.

A Figura 2.6 mostra um fluxograma simplificado da linha de água. A tubulação de água é de duas polegadas e a vazão de água é medida por um medidor de vazão mássico eletromagnético da Siemens de modelo Sitrans MAG 5000 (vazão volumétrica: Q_{10}). Existe uma válvula globo na entrada da conexão da linha de água com o *pipeline*.

A Tabela 2.1 mostra os principais equipamentos de medição indicando as suas faixas de operação. A análise das incertezas dos equipamentos se encontra no Apêndice B.

Tabela 2.1: Lista dos principais equipamentos da bancada experimental.

Equipamento	Faixa de operação	Erro
Transdutor de pressão absoluta	0 – 10 <i>bar</i>	< 0,5% do valor medido
Transdutor de pressão absoluta	0 – 6 <i>bar</i>	< 0,5% do valor medido
Transdutor de pressão diferencial	0 – 0,06 <i>bar</i>	< 1% do valor medido
Transdutor de temperatura	0 – 50 °C	0,25 °C
Medidor de Coriolis	0 – 20 <i>kg/h</i>	< 0,2 <i>kg/h</i>
Medidor eletromagnético	0 – 25 <i>m³/h</i>	< 0,25 <i>m³/h</i>

A nomenclatura dos equipamentos foi feita da seguinte forma: uma a três letras maiúsculas seguidas de três dígitos. As letras representam sua função e os dígitos indicam a posição onde se encontram. Como exemplo pode ser citado o transdutor de temperatura da linha de ar: TT-201. TT é a sigla para os transdutores de temperatura (*temperature transducer*), o primeiro dígito indica a linha em que ele se encontra, ou seja, nesse caso a linha 2 que é a linha de ar. Os dois últimos dígitos indicam a quantidade do equipamento na linha. Para facilitar a nomenclatura dos equipamentos foi criada a Tabela 2.2. A divisão das linhas foi realizada da seguinte forma:

1. Linha de água.
2. Linha de ar (conexão com o *pipeline*).
3. *Pipeline*.
4. *Riser*.
5. Linha de injeção de gás (*gas lift*) na base do *riser*.
6. Linha do separador.
7. Linha de injeção de água no sistema.

Tabela 2.2: Nomenclatura dos equipamentos.

Sigla	Equipamento
PT	Transdutor de pressão
TT	Transdutor de temperatura
P	Bomba de água
PV	Posicionador
PDT	Medidor de pressão diferencial
XV	Solenóide
FT	Medidor de vazão
LSH	Chave de nível alta
LSL	Chave de nível baixa
VM	Válvulas manuais

2.1.1 Controle da vazão mássica de gás

O fenômeno de intermitência severa ocorre com baixas vazões de gás e líquido. Considerando esse fator é de vital importância que uma certa faixa de vazões seja atingida para a realização de experimentos que permitam a obtenção de dados suficientes para a criação dos mapas de estabilidade. Com isso foi formulado um sistema que se baseia no mecanismo de bloqueio da vazão de ar para obter as baixas velocidades desejadas.

A teoria foi desenvolvida inicialmente levando em consideração tubos capilares, mas no fim foi optado pelo uso de placas de orifício. A teoria usada para o dimensionamento das placas se encontra descrita a seguir.

Figura 2.7: Esquema usado para o dimensionamento das placas de orifício.

Foram consideradas três regiões com hipóteses distintas para a formulação da teoria:

- Região A: Entre o ponto 1 e a entrada da placa de orifício *e* foi considerado fluxo isentrópico.
- Região B: A placa de orifício, isto é, a região entre o ponto *e* e o ponto *s* foi considerada como um tubo capilar extremamente curto onde ocorre fluxo de Fanno e a condição de bloqueio é atingida na saída.
- Região C: Entre o ponto *s* até o ponto 2 foi considerado um fluxo adiabático caracterizado pela expansão de área.

A definição do número de Mach é dada por:

$$Ma = \frac{v}{a} = \frac{v}{(\gamma RT)^{\frac{1}{2}}} = \frac{\dot{m}}{\rho A (\gamma RT)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

onde v é a velocidade do gás, γ o coeficiente adiabático, ρ a densidade, R a constante do gás, T a temperatura e A a área de passagem. Considerando que a pressão pode ser expressa da seguinte maneira:

$$P = \rho RT, \quad (5)$$

onde P é a pressão. Pode-se, então, reescrever a fórmula de cálculo do número de Mach:

$$Ma = \left(\frac{R}{\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\dot{m} T^{\frac{1}{2}}}{A P} \quad (6)$$

2.1.1.1 Região A Escoamento isentrópico é considerado nessa região. Assim o número de Mach na entrada da placa de orifício, e , pode ser obtido com base no valor do número de Mach a montante:

$$Ma_e = \left(\frac{D}{d} \right)^2 \left(\frac{T_e}{T_1} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P_e}{P_1} \right)^{-1} Ma_1 \quad (7)$$

onde D e d são, respectivamente, os diâmetros da tubulação e da placa. As razões entre as temperaturas e pressões podem ser calculadas em função do número de Mach usando as relações de estagnação. Assim as seguintes expressões são obtidas:

$$\frac{T_e}{T_1} = \left[\frac{2 + (\gamma - 1) Ma_1^2}{2 + (\gamma - 1) Ma_e^2} \right] \quad (8)$$

$$\frac{P_e}{P_1} = \left[\frac{2 + (\gamma - 1) Ma_1^2}{2 + (\gamma - 1) Ma_e^2} \right]^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (9)$$

Substituindo essas duas relações na Equação (7) pode-se conseguir a equação usada para relacionar os números de Mach nessa região:

$$\frac{Ma_e}{[2 + (\gamma - 1) Ma_e^2]^{\frac{1}{2} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} = \left(\frac{D}{d} \right)^2 \frac{Ma_1}{[2 + (\gamma - 1) Ma_1^2]^{\frac{1}{2} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (10)$$

2.1.1.2 Região B Dentro do tubo capilar considera-se que:

$$c_p T_e + \frac{v_e^2}{2} = c_p T_s + \frac{v_s^2}{2} \quad (11)$$

Convertendo o calor específico c_p e as velocidades em função de constantes referentes ao gás e isolando T_s obtém-se:

$$T_s = \frac{2}{R} \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \left[\frac{\gamma R}{\gamma - 1} T_e + \frac{V_e^2}{2} \right] \quad (12)$$

Com a definição da vazão mássica para a saída dada por $\dot{m} = \rho_s v_s A_d$ e usando a equação (5) a pressão na saída do tubo capilar pode ser calculada por:

$$P_s = \rho_s R T_s \quad (13)$$

A partir disso pode-se obter as razões de temperatura e pressão nessa região:

$$\frac{T_s}{T_e} = \frac{2 + (\gamma + 1) Ma_e^2}{\gamma - 1} \quad (14)$$

$$\frac{P_s}{P_e} = Ma_e \left[\frac{2 + (\gamma + 1) Ma_e^2}{\gamma - 1} \right]^{1/2} \quad (15)$$

Dentro de um tubo capilar pode-se considerar o escoamento de Fanno. A equação abaixo garante um escoamento bloqueado para qualquer tubo capilar desde que ela seja respeitada:

$$\bar{f} \frac{L}{D} = \frac{1 - Ma_e^2}{\gamma Ma_e^2} + \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \ln \left[\frac{(\gamma + 1) Ma_e^2}{2 + (\gamma - 1) Ma_e^2} \right] \quad (16)$$

onde $\bar{f}$ é o valor médio do fator de atrito de Darcy, L o comprimento do tubo capilar que nesse caso também é o valor da espessura da placa de orifício. Conhecendo o valor de Ma_e a partir da Equação (16), Ma_1 e $\dot{m}$ podem ser obtidos, respectivamente, através das Equações (10) e (6); iterações são necessárias devido à dependência do fator de atrito com a vazão.

2.1.1.3 Região C Um fluxo adiabático com expansão de área é considerado do ponto s ao ponto 2. As equações de massa, momento (desprezando os efeitos de atrito na parede) e de energia adiabática são aplicadas. As propriedades no ponto 2 podem ser obtidas resolvendo a seguinte equação de segundo grau da velocidade característica u :

$$\frac{\dot{m}}{A_2} \left(1 - \frac{R}{2c_p} \right) u^2 - \left(P_s + \frac{\dot{m}V_s}{A_2} \right) u + \frac{\dot{m}V_s}{A_2} \left(T_s + \frac{V_s^2}{2c_p} \right) = 0 \quad (17)$$

Resolvendo u pode-se obter o restante das propriedades através das seguintes relações:

$$T_2 = T_s + \frac{(V_s^2 - u^2)}{2c_p} \quad (18)$$

$$P_2 = \frac{\dot{m}RT_2}{A_2} \frac{1}{[2c_p(T_s - T_2) + V_s^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (19)$$

$$V_2 = \frac{\dot{m}RT_2}{P_2A_2} \quad (20)$$

$$\rho_2 = \frac{\dot{m}}{V_2A_2} \quad (21)$$

Os valores acima são usados para verificar se a placa de orifício acaba por deixar o escoamento bloqueado levando em consideração que a razão $\frac{P_1}{P_2} > 1,5$ deve ser garantida.

Dois conjuntos de placas de 2 mm de espessura e 20 cm de diâmetro foram fabricados pela empresa Lasertools (<http://lasertools.com.br/>). Os diâmetros nominais dos furos variaram entre 0,1 a 2 mm. Um conjunto de placas é usado na conexão com o *pipeline*, enquanto o outro é usado na injeção de gás na base do *riser*. Os diâmetros não são constantes ao longo da espessura das placas visto que o diâmetro na entrada e na saída são diferentes segundo dados enviados pela Lasertools (Tabela 2.3). Por causa disso a condição sônica não é atingida para o

Figura 2.8: Exemplo de um placa de orifício.

diâmetro de saída geométrico devendo-se assim considerar efeitos de *vena contracta* (Miller, 1989).

Logo foi necessário realizar uma calibração das placas para a obtenção do diâmetro efetivo que correspondesse a condição bloqueada em função da pressão a montante. Foi usado o medidor de Coriolis da bancada experimental de modo a garantir uma coerência nos resultados. Assim foi possível saber com uma boa precisão qual é a faixa efetiva de velocidades superficiais que cada placa abrange.

Tabela 2.3: Tabela de diâmetro das placas de orifício para a entrada no *pipeline*.

Placa	Nominal (mm)	Saída (mm)	Entrada (mm)
1	0,100	0,057	0,329
2	0,469	0,445	0,543
3	0,656	0,643	0,729
4	0,800	0,779	0,871
5	0,922	0,899	1,000
6	1,030	1,009	1,102
7	1,130	1,094	1,201
8	1,220	1,182	1,278
9	1,300	1,259	1,365
10	1,380	1,323	1,451
11	1,450	1,385	1,521
12	1,520	1,457	1,588
13	1,590	1,530	1,659
14	1,660	1,592	1,731
15	1,720	1,663	1,779
16	1,780	1,729	1,842
17	1,840	1,776	1,896
18	1,890	1,810	1,956
19	1,950	1,910	1,927
20	2,000	1,922	2,068

2.2 Metodologia

A primeira etapa do trabalho se concentrou na criação de procedimentos para as diferentes operações realizadas no laboratório. Foram considerados procedimentos operacionais relacionados com os experimentos e também com a análise de dados. Antes da realização dos experimentos também foi necessário a realização da calibração das placas de orifício referentes ao sistema de controle de vazão de gás.

A parte experimental se dividiu em duas etapas: (a) experimentos com uma pressão constante no separador com a variação do aspecto geométrico do sistema, isto é, a inclinação do *pipeline* para a elaboração dos mapas de estabilidade e (b) análise do escoamento quando se varia a pressão no separador.

Para a criação e representação dos mapas de estabilidade são normalmente usadas as velocidades superficiais na condição de referência:

$$j_{g0} = \frac{R_g T_0 \dot{m}_{g0}}{P_0 A} \quad (22)$$

$$j_{l0} = \frac{Q_{l0}}{A} \quad (23)$$

onde j_{g0} e j_{l0} são, respectivamente, as velocidades superficiais de gás e líquido nessa condição, R_g a constante de gás dada por 287 J/kg/K , T_0 e P_0 a temperatura e pressão de referência em condição ambiente onde a temperatura é de 287 K e a pressão de 101325 Pa . É importante considerar que os medidores instalados no laboratório conseguem medir valores mínimos de velocidade superficial de gás e água, respectivamente, de $0,03$ e $0,05 \text{ m/s}$. As análises foram realizadas com os dados obtidos experimentalmente e juntamente com uma consideração visual do fenômeno no circuito.

2.2.1 Procedimentos de operação

Como etapa inicial do trabalho foram definidos os procedimentos operacionais da bancada experimental. Os seguintes procedimentos foram criados: (a) acionamento e desligamento da bancada experimental, (b) enchimento de água, (c) procedimento para a calibração das placas de orifício, (d) procedimento para medições de intermitência severa com pressão constante e (e) medições de intermitência severa com pressão variável.

O procedimento de enchimento de água foi criado pelo fato do sistema trabalhar com um nível mínimo de água na bancada (acima da chave de nível baixa do separador) para o seu funcionamento. Pode ser usado de forma quase toda automatizada com o uso da sequência de comandos do *Operator Interface*.

O procedimento de acionamento da bancada leva em consideração que o sistema já se encontra com o nível mínimo de água, ou seja, pronto para operação. Com as válvulas do sistema de controle de gás estando fechadas usa-se o programa *Fast Tools* para ligar a bomba de água. O compressor de gás é ligado após o sistema se estabilizar nessa condição. Nesse momento as válvulas do sistema de controle de gás para o *pipeline* são abertas. O procedimento de desligamento segue basicamente a ordem reversa do procedimento de acionamento.

O sistema se considera estável quando se verifica que as variáveis medidas voltam a apresentar o mesmo comportamento que o inicial após o sistema ser perturbado naturalmente. As perturbações podem ser baixas variações de vazões e de pressão por exemplo. Em contrapartida um comportamento instável é considerado quando o comportamento do sistema muda após ser perturbado.

Em relação à calibração das placas de orifício foi definido que a calibração seria realizada três vezes para cada placa. Cada calibração cobriu a faixa de pressão em que se pode garantir uma condição de bloqueio na placa de orifício. Essa faixa de pressão foi aproximadamente de 3 a 9 *bar*. Cada calibração considerou 5 minutos para a estabilização e 3 minutos para a coleta de dados. A realização da troca de placas pode ser realizada antes da ligação da bancada ou mesmo durante o funcionamento da mesma. É preciso fechar as válvulas a montante e jusante do sistema para que se possa realizar a operação de troca.

Para as medições de intermitência severa deve ser considerado que foi preciso mais tempo para que o sistema se estabilize. Enquanto que na etapa de calibração de placas de orifício o tempo médio de estabilização considerado foi de 3 minutos, nas medições de intermitência severa foi considerado um tempo entre 5 a 10 minutos. O mesmo cuidado foi adotado para as etapas finais de pressão variável no separador.

2.2.2 Calibração das placas de orifício

O procedimento básico para a calibração consistiu em obter valores experimentais de velocidade superficial referentes aos diâmetros de saída das placas. O instrumento primário utilizado foi o medidor de Coriolis da linha de ar. A pressão a montante da placa de orifício foi variada entre 3 a 9 *bar*. Os valores experimentais foram inicialmente comparados com os valores teóricos de mesmo diâmetro. Foi verificado que os valores de velocidade obtidos experimentalmente eram inferiores aos valores teóricos de maneira que foi preciso encontrar valores dos diâmetros efetivos para cada placa. Esse comportamento pode ser explicado devido ao efeito de *vena contracta* de modo que os diâmetros de saída das placas não correspondiam aos valores efetivos de diâmetro que atualmente deviam ser considerados.

Em resumo um valor de diâmetro efetivo é obtido a partir dos resultados experimentais de modo que os valores de velocidade superficial equivalentes a esses diâmetros podem ser usados como referência para os experimentos. Os resultados para a calibração das placas usadas na entrada do *pipeline* podem ser vistos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Diâmetro efetivo das placas de orifício usadas no *pipeline*.

Placa	Saída (mm)	Efetivo (mm)
1	0,057	-
2	0,445	0,383
3	0,643	0,482
4	0,779	0,685
5	0,899	0,764
6	1,009	0,828
7	1,094	0,919
8	1,182	1,016
9	1,259	1,083
10	1,323	1,151
11	1,385	1,219
12	1,457	1,267
13	1,530	1,316
14	1,592	1,401
15	1,663	1,413
16	1,729	1,453
17	1,776	1,527
18	1,810	1,593
19	1,910	1,432
20	1,922	1,614

Em média o valor do diâmetro efetivo ficou por volta de 85% do valor do diâmetro de saída. Observa-se que somente a placa 19 apresenta resultados que não seguem esse mesmo padrão. O mesmo foi observado na placa equivalente para o uso na base do *riser* (Placa 39). Considerou-se que a confecção dessas placas acabou por obter diâmetros de saída menores que os valores que foram repassados pela empresa Lasertools. Por causa desse fato foi decidido que essas placas não seriam usadas por não apresentarem diâmetros efetivos de interesse. A placa 1 e 31 não puderam ser calibradas pelos valores de vazão serem muito baixos para serem medidos com os equipamentos atuais da bancada experimental.

A curva tracejada mostra os valores de velocidade superficial de gás esperados considerando o diâmetro de saída das placas de orifício. As três calibrações apresentam valores próximos e uma regressão linear mostra que o valor real de velocidade superficial medido tende a ser menor. A partir dessa nova curva foi estimado qual seria o diâmetro efetivo de cada placa de orifício.

Figura 2.9: Tela do *Trend Module* para a calibração das placas de orifício.

As principais variáveis medidas para a realização da calibração (Figura 2.9) são: a pressão (PIC-201_PV) e temperatura (TI-201_PV) a montante da placa de orifício, a vazão mássica (FI-201_PV) e velocidade superficial de gás (FI-201_JS), além da pressão no separador (PIC-601_PV). A pressão e a temperatura são as variáveis necessárias para a realização dos cálculos para obtenção do diâmetro efetivo enquanto que a pressão no separador é usada para a validação de que esse sistema de controle atingiu a condição crítica desejada.

Figura 2.10: Curva de calibração da placa 7.

Um exemplo de uma curva de calibração pode ser visto na Figura 2.10. Observa-se

como os valores medidos são menores do que o esperado considerando o diâmetro de saída da placa (linha tracejada). O restante das curvas de calibração juntamente com todos os dados obtidos nesta etapa se encontram no Apêndice D.

2.2.3 Medições de intermitência severa

A metodologia aplicada para as medições de intermitência severa pode ser descrita da seguinte forma: inicialmente a geometria do sistema, ou seja, o ângulo do *pipeline* é definido. A partir de uma vazão constante de gás se varia a vazão de líquido de modo a varrer a região desejada. Os ângulos de inclinação foram variados entre +5 a +10 graus em relação à horizontal. A faixa de velocidades superficiais variou aproximadamente entre 0,03 a 0,06 m/s para gás e de 0,05 a 0,18 m/s para água. Os valores mínimos citados também são correspondentes aos valores mínimos que podem ser medidos com os medidores atuais de vazão.

Figura 2.11: Comparação de curvas de estabilidade.

As curvas de estabilidade obtidas usando a teoria de estabilidade linear foram usadas como referência para descobrir a região de transição entre escoamento estável e instável. A partir disso foi definido a faixa de valores para as quais as medições foram realizadas. As restrições dos medidores de vazão de ar e de água fizeram com que poucos pontos experimentais obtidos apresentassem um comportamento instável. Os experimentos se concentraram para os maiores valores de inclinação do *pipeline* porque a região instável aumenta à medida que o ângulo de inclinação aumenta (Figura 2.11).

As variáveis coletadas em cada medição foram:

- Pressão a montante da placa de orifício
- Temperatura a montante da placa de orifício
- Pressão na base do *riser*
- Temperatura na base do *riser*
- Vazão volumétrica de água
- Velocidade superficial de água
- Pressão no separador
- Pressão diferencial no *riser*
- Vazão mássica de gás
- Velocidade superficial de gás

Os dados obtidos são salvos em arquivo csv a partir do *Trend Module* e são nomeados da seguinte forma: Data_Inclinação_NúmeroDoExperimento. A data é escrita sempre com 6 dígitos: 2 dígitos representando o ano, 2 para o mês e 2 para o dia. 13 de março de 2015 seria representado da seguinte maneira: 150313. A inclinação indica o ângulo do *pipeline* onde, por exemplo, 2g seria referente a 2 graus. Por último, o número do experimento é definido pelo próprio usuário. O número de experimentos são sempre indicados por 3 dígitos devido ao grande número de experimentos que pretendem ser realizados para cada inclinação. Logo, o arquivo 141009_4g_001 indicaria o experimento 1 em que o *pipeline* possui um ângulo de 4 graus em relação a horizontal realizado no dia 09 de outubro de 2014. Isso garante uma consistência na nomenclatura dos dados que vão servir de referência para futuros estudos.

O tempo médio de coleta de dados para cada ponto de operação ficou em torno de 400 s para uma frequência de coleta de dados de 1 Hz. O tempo de estabilização usado foi entre 5 a 10 minutos para cada caso. Para cada experimento os gráficos obtidos foram: pressão na base do *riser*, velocidade superficial de água e gás em função do tempo. Os valores de pressão na base do *riser* são analisados para verificar a estabilidade do sistema.

Graficamente um caso instável pode ser visto na Figura 2.12 que mostra um histórico de pressão na base do *riser* em que o *pipeline* se encontra com +5 graus e a velocidade superficial de gás e água são, respectivamente, de 0,029 m/s e 0,069 m/s. Um caso é considerado instável quando a amplitude média do ciclo de oscilação de pressão é maior que 2% do valor médio de pressão. Este critério foi um critério próprio para poder diferenciar casos estáveis de instáveis. Os períodos desses ciclos são obtidos usando a função *Fast Fourier Transform* (FFT) no Matlab ou calculando o valor médio dos ciclos para um número de ciclos inteiros.

Figura 2.12: Histórico de pressão na base do *riser* para um caso instável.

Um histórico de pressão absoluta referente a um caso estável pode ser visto na Figura 2.13. O padrão de escoamento verificado para esse caso foi estratificado no *pipeline* e em *bubbly* no *riser*. Observa-se que o valor de pressão tende a ficar constante com o tempo e suas principais características são uma pequena amplitude, flutuações de pressão com alta frequência, características de padrão de fluxo intermitente (*bubbly, slug*).

Uma outra comparação que poderia ser considerada seria usar casos experimentais com velocidades superficiais próximas que representam casos instáveis. Parâmetros como o período e a amplitude dos ciclos poderiam ser comparados caso uma variação visível pudesse ser verificada nos modelos teóricos. Porém, verificou-se que não há uma diferença comparativa de resultados usando os modelos numéricos já existentes, além do fato de que há poucos pontos experimentais a serem comparados de modo que essa comparação não foi realizada neste estudo.

2.2.4 Comparação com métodos numéricos

As rotinas de Baliño et al. (2010), referente ao modelo de NPW, e Baliño (2014), referente ao modelo de inércia, foram usadas para realizar comparações com as curvas de flutuação de pressão para os casos instáveis obtidos experimentalmente. Uma descrição mais detalhada dos modelos pode ser vista no Apêndice D. Valores médios de pressão, período do ciclo e amplitude foram comparados.

Figura 2.13: Histórico de pressão na base do *riser* para um caso estável.

Resumidamente os modelos numéricos consideram um escoamento unidimensional no sistema *pipeline-riser*, a fase líquida é considerada incompressível enquanto o gás é considerado como gás ideal. Ambas as fases se encontram em condições isotérmicas. O padrão de escoamento no *pipeline* é assumido como sendo estratificado. Os dois modelos são capazes de lidar com descontinuidades no escoamento como acumulação de líquido no *pipeline*, nível de líquido no *riser* e frações de vazio.

A diferença entre os dois modelos se encontra no fato de que o modelo de NPW desconsidera a inércia no *riser* enquanto o modelo de inércia considera esse termo na formulação. Os termos de inércia são considerados usando a aproximação de golpe de aríete rígido (*rigid water-hammer*). Os termos de aceleração dos fluidos são considerados na equação de momento sem consideração da compressibilidade de líquido na equação de conservação de massa. No *pipeline* os termos convectivos de aceleração são desconsiderados, mas os termos locais de aceleração para os fluidos são incluídos na equação de momento para escoamento estratificado possibilitando o cálculo de valores de queda de carga e fração de vazio instantâneos.

O ponto de medição experimental se encontra a aproximadamente 30 *cm* acima do ponto mais baixo do *riser* de modo que os valores obtidos pelos métodos numéricos para a comparação com o resultado experimental são considerados de modo que se encontrem próximo a essa altura. A divisão do *riser* foi feita em N nós nos modelos numéricos apresentados e esse número N foi escolhido de maneira que um nó pudesse prover valores próximos a esse ponto.

As simulações usam valores médios obtidos experimentalmente como dados de entrada. As vazões e velocidades superficiais de água e gás e a pressão média no separador são os principais dados de entrada. A partir disso simulações são realizadas e os dados de pressão com o tempo, pressão média, períodos dos ciclos são obtidos e comparados com os dados experimentais.

2.2.5 Pressão variável no separador

Para a realização destes experimentos foi preciso inicialmente obter uma situação instável e a partir dessa condição variar a pressão do separador. O procedimento consiste em fechar a válvula de controle parcialmente até que se obtenha um valor de pressão maior que o inicial. A válvula de controle costuma ficar 100% aberta fazendo com que a pressão no separador seja igual a pressão atmosférica. Após essa variação verifica-se se há alguma mudança no comportamento das variáveis do sistema.

O controle de pressão no separador pela válvula reguladora não conseguiu ser muito preciso no sentido de aumentar levemente a pressão desse ponto e mantê-la constante com o tempo. Foram observados dois comportamentos: um deles em que a pressão aumenta muito mais que o desejado e outro em que os valores de pressão ficavam oscilando em torno de um valor médio de pressão maior que a pressão atmosférica. Para esse estudo inicial foi considerado o segundo comportamento pelo fato de mostrar resultados qualitativamente interessantes mesmo que o controle da pressão no separador não tenha sido estável como o desejado.

2.2.6 Considerações operacionais

Alguns cuidados tiveram que ser adotados para a realização de comparações mais fieis com os modelos numéricos. Os modelos numéricos consideram vazões constantes de fluidos na entrada do *pipeline*, porém nos casos experimentais com instabilidade havia uma grande variação nos valores de vazão de água. Isso ocorria porque na etapa de penetração de gás o líquido é succionado devido à descompressão do gás. Como consequência também era observado uma variação total do volume do sistema *pipeline-riser*.

Para evitar essa variação de volume uma válvula globo foi posicionada na conexão do trecho flexível com o *pipeline*. Com o fechamento parcial da válvula é possível controlar esse fator além de obter vazões mais baixas desejadas para o estudo.

Um cuidado especial também foi considerado com o medidor de vazão mássico de Coriolis. O fato do sistema trabalhar com baixas vazões ao ponto de se encontrar no limite operacional do próprio medidor fez com que o valor de zero mudasse após certo tempo de uso. Essas

variações foram identificadas quando se compara os valores medidos com os valores calibrados mostrando a importância do conhecimento das placas de orifício usadas. Quando se verificou uma mudança, por mais sutil que fosse, foi realizada uma nova recalibração do zero do medidor para assim prosseguir com os experimentos.

2.2.7 Análise de dados

Os dados obtidos nos experimentos foram analisados por rotinas criadas no Matlab. Alguns pontos dos arquivos em .csv salvos pelo *Trend Module* possuíam dados que não correspondiam à outras variáveis, e.g. para um instante de tempo x só haviam dados de pressão enquanto valores de velocidades superficiais não haviam sido salvos. Essas inconsistências identificadas nos arquivos salvos tiveram que ser arrumadas de modo a poder usar os dados que se referem efetivamente ao mesmo instante de tempo.

Além disso, alguns outros cuidados em relação à obtenção dos valores de amplitude tiveram que ser considerados. O valor de amplitude médio foi considerado simplesmente como o valor médio dos vários ciclos medidos. A dificuldade se encontrou em obter com precisão os valores mínimos e máximos de cada ciclo. Para um mesmo ciclo poderia ocorrer dos valores de pressão não manterem um comportamento ideal que seria equivalente a curva de uma parábola. Devido a isso o valor mínimo (ou máximo) foi definido como:

- Único valor mínimo ou máximo do ciclo;
- No caso de houverem valores próximos mínimos (ou máximos) em dois instantes de tempo consecutivos, foi interpolado um valor com base na variação de pressão negativa (ou positiva) durante os instantes de tempos anteriores.

3 Resultados e discussão

Os resultados foram divididos conforme a inclinação do *pipeline*. Uma tabela com os valores médios das principais variáveis foi mostrada para cada inclinação. Uma análise do mapa de estabilidade obtido foi realizada comparando os dados experimentais com a curva de estabilidade obtida pelo modelo de estabilidade linear. Em seguida foram realizados alguns comentários referentes à alguns casos das variações de pressão na base do *riser* e velocidades superficiais no tempo.

O Apêndice E contém alguns gráficos de variação de pressão na base do *riser* e de velocidade com o tempo, além dos valores de incertezas para as medições realizadas. Somente alguns gráficos referentes aos casos estáveis se encontram no apêndice devido à grande quantidade de pontos enquanto todos os gráficos referentes aos casos instáveis foram considerados. É importante destacar que a incerteza das medições com menores vazões de gás podem chegar a cerca de 20% do seu valor, o que diminui a confiabilidade dos resultados experimentais obtidos, porém análises das flutuações de pressão na base do *riser* mostram comportamentos que são condizentes com a teoria de modo que não podem ser explicados a não ser pela presença de menores vazões de fluidos. Com isso deve-se considerar que os resultados obtidos aqui possuem uma grande incerteza e serão refeitos posteriormente com novos medidores com o intuito de garantir a confiabilidade das medições.

Foram realizados 24 experimentos para inclinações entre +5 e +10 graus pelo fato de que não foram obtidos situações instáveis para menores inclinações devido à limitações atuais dos medidores de vazão. A faixa de velocidade superficial de gás variou entre 0,03 a 0,056 m/s e variou de 0,05 a 0,18 m/s para a velocidade superficial de água. A pressão no separador foi a mesma da pressão atmosférica em São Paulo ficando em torno de 0,93 *bara*.

Os parâmetros numéricos usados nas simulações dos modelos de NPW e de inércia são os mesmos e se encontram na tabela abaixo:

Tabela 3.1: Parâmetros usados para as simulações numéricas.

Parâmetro	Valor
Fator de sub-relaxamento	0,2
Número de divisões do <i>riser</i>	21
Tolerância	10^{-6}
Número máximo de iterações por passo de tempo	1000
Tempo de simulação (<i>s</i>)	1000

O tempo de simulação foi de 1000 *s* para garantir que as simulações obtenham um número mínimo de ciclos de pressão após o período de transição.

3.1 Inclinação do *pipeline*: +10 graus

A pressão média no separador foi de 0,93 *bara* com temperatura média de 23,6 °C. As medições experimentais dos 24 casos realizados podem ser vistos na Tabela 3.2. Sete dos 24 pontos apresentaram oscilações de pressão na base do *riser* indicando casos instáveis. Análises visuais indicaram que eram SS3 ou OSC. As faixas de velocidade superficial de água e gás foram, respectivamente, de 0,055 a 0,178 *m/s* e de 0,031 a 0,055 *m/s*. A região instável obtida experimentalmente se encontrou com valores de velocidade superficial de água menor que 0,096 *m/s* e velocidade superficial de gás menor que 0,042 *m/s*.

Tabela 3.2: Resultados experimentais com *pipeline* a +10 graus.

Caso	T(°C)	j_{g0} (m/s)	j_{l0} (m/s)	Ps (bara)	Tipo	Período (s)
1	22,8	0,053	0,055	0,93	Estável	-
2	22,7	0,054	0,069	0,93	Estável	-
3	26,4	0,054	0,082	0,93	Estável	-
4	19,7	0,052	0,096	0,94	Estável	-
5	20,5	0,054	0,110	0,93	Estável	-
6	21,7	0,053	0,123	0,93	Estável	-
7	28,0	0,053	0,151	0,93	Estável	-
8	27,7	0,055	0,178	0,93	Estável	-
9	27,2	0,043	0,178	0,93	Estável	-
10	22,2	0,043	0,151	0,93	Estável	-
11	21,5	0,043	0,123	0,93	Estável	-
12	23,0	0,042	0,110	0,93	Estável	-
13	22,2	0,041	0,096	0,93	Estável	-
14	23,9	0,040	0,082	0,93	Instável	39,1
15	23,8	0,042	0,069	0,93	Instável	41,2
16	24,7	0,040	0,055	0,93	Instável	41,8
17	24,0	0,031	0,055	0,93	Instável	44,1
18	23,8	0,031	0,069	0,93	Instável	43,6
19	21,7	0,031	0,082	0,93	Instável	41,7
20	23,6	0,032	0,096	0,93	Instável	39,6
21	23,2	0,031	0,110	0,94	Estável	-
22	22,0	0,033	0,123	0,93	Estável	-
23	27,7	0,033	0,151	0,93	Estável	-
24	22,7	0,034	0,178	0,93	Estável	-

Como esperado os casos instáveis surgem nas condições de menores valores de velocidades superficiais de água e gás. A tendência observada nos casos instáveis foi a de que o período do ciclo de pressão tende a aumentar quanto menor forem as velocidades superficiais. Isso é esperado pelo fato de que uma menor velocidade implica em um maior tempo de produção de *slug*.

Figura 3.1: Mapa de estabilidade para +10 graus.

A Figura 3.1 mostra o mapa de estabilidade obtido. Pode-se ver o limite de estabilidade obtido pela teoria de estabilidade linear representado pela linha contínua. Observa-se um bom acordo entre do modelo de estabilidade linear com os resultados experimentais, porém verifica-se que a teoria de estabilidade linear parece superestimar levemente a região instável. A Figura 3.2 mostra como o período dos ciclos em segundos variou em relação aos diferentes valores de velocidades superficiais.

Figura 3.2: Período dos ciclos de intermitência severa para o mapa de estabilidade de +10 graus.

A flutuação de pressão na base do *riser* foi comparada com os modelos numéricos de

Figura 3.3: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 15 da Tabela 3.2).

NPW e de Inércia. A Figura 3.3 mostra as flutuações durante 200 s para o caso 15 ($j_g = 0,042 \text{ m/s}$ e $j_l = 0,069 \text{ m/s}$) em que os ciclos de pressão sempre começam com o menor valor de pressão do ciclo. As linhas tracejadas indicam os valores máximo e mínimo que o ciclo de pressão experimental considerando a precisão do medidor. Verifica-se que o ciclo dos modelos numéricos apresentam períodos mais longos que os obtidos experimentalmente. O modelo de NPW apresenta uma menor amplitude quando comparado ao modelo de Inércia enquanto que a amplitude experimental medida é mais baixa que as obtidas pelos modelos numéricos. A diferença de período entre os dois modelos numéricos é mínima, não ultrapassando 2% de diferença.

Tabela 3.3: Comparação das amplitudes dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o *pipeline* a +10 graus com incertezas.

Caso	Experimental ($10^5 Pa$)	NPW ($10^5 Pa$)	Erro (%)	Inércia ($10^5 Pa$)	Erro (%)
14	0,12	0,11	8	0,13	11
15	0,13	0,13	5	0,16	16
16	0,15	0,13	10	0,14	7
17	0,15	0,13	11	0,13	14
18	0,14	0,10	29	0,12	13
19	0,11	0,09	16	0,11	0
20	0,09	0,09	6	0,10	11

Considerando as incertezas de medição da pressão na base do *riser* as diferenças de valores ficam abaixo de 30% dos valores medidos (Tabela 3.3). Essa diferença de amplitude e do valor médio de pressão ficou por volta de 0,03 *bara* que é equivalente a aproximadamente 30 *cm* de coluna de água que se refere exatamente ao ponto que é a região do ponto de medição

de pressão.

As flutuações de pressão dos modelos numéricos são obtidas na posição do primeiro nó numérico referente ao *riser* e essa posição pode ser diferente do esperado fisicamente pela maneira como o *riser* é medido. Essas variações de centímetros podem explicar essa diferença de valores de pressão média e de amplitude dos ciclos de pressão. Além disso, 30 cm representam somente 4% da altura total do *riser* o que indica uma variação desprezível em comparação com o total.

Tabela 3.4: Comparação dos valores de pressão média para os casos instáveis com o *pipeline* a +10 graus.

Caso	Experimental ($10^5 Pa$)	NPW ($10^5 Pa$)	Erro (%)	Inércia ($10^5 Pa$)	Erro (%)
14	1,48	1,53	3	1,51	2
15	1,48	1,52	3	1,50	2
16	1,47	1,52	3	1,50	2
17	1,49	1,52	2	1,52	2
18	1,49	1,54	3	1,52	2
19	1,50	1,54	3	1,53	2
20	1,50	1,54	3	1,53	2

A análise de pressões médias (Tabela 3.4) calculadas para cinco ciclos completos também mostra uma diferença média de 0,03 *bara* para o modelo de NPW e de 0,02 *bara* para o modelo de inércia.

Tabela 3.5: Comparação dos períodos dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o *pipeline* a +10 graus.

Caso	Experimental (s)	NPW (s)	Erro (%)	Inércia (s)	Erro (%)
14	39,1	43,7	12	44,2	13
15	41,2	46,1	12	47,0	14
16	41,8	49,0	17	48,6	16
17	44,1	46,8	6	49,7	13
18	43,6	48,4	11	48,4	11
19	41,7	45,3	9	46,0	11
20	39,6	42,9	8	44,0	11

Pela Tabela 3.5 pode-se ver que a diferença entre os períodos dos modelos numéricos é aproximadamente de 10% maior que o obtido experimentalmente. Novamente isso pode ser explicado pela diferença de altura do *riser* que em um sistema curto como esse pode acabar causando essa diferença de resultados. As análises realizadas aqui são válidas para o restante dos resultados de outras inclinações.

3.2 Inclinação do *pipeline*: +9 graus

A pressão média no separador foi de 0,93 *bara* com temperatura média de 26,2 °C. As medições experimentais dos 24 casos realizados podem ser vistos na Tabela 3.6. Sete dos 24 pontos apresentaram oscilações de pressão na base do *riser* indicando casos instáveis. Análises visuais indicaram que eram SS3 ou OSC. As faixas de velocidade superficial de água e gás foram, respectivamente, de 0,055 a 0,178 *m/s* e de 0,033 a 0,054 *m/s*. A região instável obtida experimentalmente se encontrou com valores de velocidade superficial de água menor que 0,096 *m/s* e velocidade superficial de gás menor que 0,042 *m/s*.

Tabela 3.6: Resultados experimentais com *pipeline* a +9 graus.

Caso	T(°C)	j_{g0} (m/s)	j_{l0} (m/s)	Ps (bara)	Tipo	Período (s)
1	25,6	0,033	0,055	0,93	Instável	45,1
2	25,6	0,035	0,069	0,93	Instável	42,7
3	25,6	0,035	0,082	0,93	Instável	41,9
4	26,5	0,036	0,096	0,93	Instável	39,6
5	28,7	0,037	0,110	0,93	Estável	-
6	26,6	0,037	0,123	0,93	Estável	-
7	28,6	0,038	0,151	0,93	Estável	-
8	28,5	0,038	0,178	0,93	Estável	-
9	22,2	0,054	0,055	0,93	Estável	-
10	22,5	0,052	0,069	0,93	Estável	-
11	25,4	0,054	0,082	0,93	Estável	-
12	25,5	0,053	0,096	0,93	Estável	-
13	25,6	0,052	0,110	0,94	Estável	-
14	25,9	0,053	0,123	0,94	Estável	-
15	27,1	0,054	0,151	0,93	Estável	-
16	27,4	0,054	0,178	0,93	Estável	-
17	28,7	0,043	0,178	0,93	Estável	-
18	26,8	0,042	0,151	0,93	Estável	-
19	26,4	0,041	0,123	0,93	Estável	-
20	26,1	0,040	0,110	0,93	Estável	-
21	26,9	0,041	0,096	0,93	Estável	-
22	25,4	0,041	0,082	0,93	Instável	40,9
23	25,7	0,042	0,069	0,93	Instável	40,1
24	26,1	0,042	0,055	0,93	Instável	43,1

Verifica-se a presença de casos instáveis para as menores vazões de fluidos. A tendência de que o período dos ciclos aumenta quanto menor forem as vazões também é observada. O caso 23 aparenta ter um período levemente menor, mas isso pode ser explicado por esse caso possuir uma velocidade superficial de gás maior que o caso 22.

Figura 3.4: Mapa de estabilidade para +9 graus.

A Figura 3.4 mostra o mapa de estabilidade obtido para essa inclinação. Na mesma figura pode-se ver o limite de estabilidade obtido pela teoria de estabilidade linear. Observa-se um bom acordo do modelo analítico com os resultados experimentais. A região instável ainda parece ser superestimada pela teoria de estabilidade linear, porém em um menor grau pelo fato dos resultados experimentais se encontram mais próximos da curva de estabilidade. A Figura 3.5 mostra a variação dos períodos dos ciclos de intermitência severa.

Figura 3.5: Período dos ciclos de intermitência severa para o mapa de estabilidade de +9 graus.

Figura 3.6: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 4 da Tabela 3.6).

O comportamento da pressão na base do *riser* referente ao caso 4 ($j_g = 0,036 \text{ m/s}$ e $j_l = 0,096 \text{ m/s}$) é basicamente o mesmo que o visto para os casos a +10 graus. Os modelos numéricos apresentam um período levemente maior enquanto que a flutuação medida é próxima da ordem do modelo NPW, mas menor que a do modelo de Inércia. As tabelas 3.7 a 3.9 mostram a comparação resultante das análises para os casos instáveis.

Tabela 3.7: Comparação das amplitudes dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o *pipeline* a +9 graus com incertezas.

Caso	Experimental ($10^5 Pa$)	NPW ($10^5 Pa$)	Erro (%)	Inércia ($10^5 Pa$)	Erro (%)
1	0,14	0,14	4	0,16	9
2	0,14	0,12	12	0,14	0
3	0,13	0,10	25	0,12	7
4	0,11	0,09	12	0,11	5
22	0,14	0,11	20	0,14	1
23	0,14	0,13	10	0,15	7
24	0,15	0,12	19	0,13	11

Tabela 3.8: Comparação dos valores de pressão média para os casos instáveis com o *pipeline* a +9 graus.

Caso	Experimental ($10^5 Pa$)	NPW ($10^5 Pa$)	Erro (%)	Inércia ($10^5 Pa$)	Erro (%)
1	1,49	1,51	2	1,51	2
2	1,49	1,52	2	1,52	2
3	1,49	1,54	3	1,52	2
4	1,49	1,53	3	1,52	2
22	1,49	1,53	3	1,51	2
23	1,47	1,52	3	1,50	2
24	1,48	1,50	2	1,50	1

Levando em consideração as incertezas verifica-se que as comparações de amplitude resultam em valores muito próximos indicando bons resultados. Em relação aos valores de pressão média se verifica novamente a diferença aproximada de 0,03 *bara* como foi observado para a inclinação de +10 graus.

Tabela 3.9: Comparação dos períodos dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o *pipeline* a +9 graus.

Caso	Experimental (s)	NPW (s)	Erro (%)	Inércia (s)	Erro (%)
1	45,1	47,5	5	50,3	11
2	42,7	42,3	1	47,1	10
3	41,9	44,8	7	45,6	9
4	39,6	45,5	15	43,4	10
22	40,9	43,2	6	44,1	8
23	40,1	45,8	14	45,2	13
24	43,1	45,1	5	48,7	13

Por fim, os períodos tem valores próximos com uma diferença de no máximo 15% entre eles.

3.3 Inclinação do *pipeline*: +8 graus

A pressão média no separador foi de 0,93 *bara* com temperatura média de 27,2 °C. As medições experimentais dos 24 casos realizados podem ser vistos na Tabela 3.10. Cinco dos 24 pontos apresentaram oscilações de pressão na base do *riser* indicando casos instáveis. Análises visuais indicaram que eram SS3 ou OSC. As faixas de velocidade superficial de água e gás foram, respectivamente, de 0,055 a 0,178 *m/s* e de 0,031 a 0,056 *m/s*. A região instável obtida experimentalmente se encontrou com valores de velocidade superficial de água menor que 0,082 *m/s* e velocidade superficial de gás menor que 0,044 *m/s*.

Tabela 3.10: Resultados experimentais com *pipeline* a +8 graus.

Caso	T(°C)	j_{g0} (m/s)	j_{l0} (m/s)	Ps (bara)	Tipo	Período (s)
1	25,8	0,054	0,178	0,94	Estável	-
2	27,1	0,053	0,151	0,94	Estável	-
3	29,6	0,053	0,123	0,93	Estável	-
4	27,2	0,054	0,110	0,93	Estável	-
5	30,3	0,056	0,096	0,93	Estável	-
6	27,1	0,053	0,082	0,93	Estável	-
7	30,1	0,052	0,069	0,93	Estável	-
8	26,9	0,055	0,055	0,94	Estável	-
9	24,7	0,044	0,055	0,93	Instável	44,0
10	25,0	0,043	0,069	0,93	Instável	42,1
11	25,3	0,044	0,082	0,93	Estável	-
12	27,4	0,043	0,096	0,93	Estável	-
13	27,2	0,043	0,110	0,93	Estável	-
14	26,0	0,043	0,123	0,94	Estável	-
15	27,0	0,042	0,151	0,94	Estável	-
16	29,9	0,041	0,178	0,93	Estável	-
17	26,0	0,033	0,178	0,94	Estável	-
18	26,7	0,032	0,151	0,94	Estável	-
19	26,3	0,032	0,123	0,94	Estável	-
20	27,2	0,033	0,110	0,93	Estável	-
21	27,3	0,033	0,096	0,93	Estável	-
22	27,0	0,034	0,082	0,93	Instável	40,7
23	28,2	0,031	0,069	0,93	Instável	42,8
24	28,2	0,033	0,055	0,93	Instável	43,8

A Tabela 3.10 mostra que os casos instáveis aparecem para os casos com menores vazões de água e gás como é o esperado. A tendência de que o período aumenta quanto menor forem as velocidades se mantêm, embora o caso 9 apresente um período levemente maior que o caso 24 que possui uma velocidade menor de gás.

Figura 3.7: Mapa de estabilidade para +8 graus.

A Figura 3.7 mostra o mapa de estabilidade obtido. Na mesma figura pode-se ver o limite de estabilidade obtido pela teoria de estabilidade linear. Observa-se um bom acordo do modelo de estabilidade linear com os resultados experimentais. É interessante observar que ao contrário do que foi visto para as inclinações de +9 e +10 graus alguns pontos se encontram no limite ou fora da zona definida pela curva de estabilidade. Esses pontos são referentes a velocidade superficial de gás por volta de $0,04 \text{ m/s}$ enquanto que para valores mais baixos de velocidade superficial de gás se observa o mesmo comportamento visto anteriormente.

Figura 3.8: Período dos ciclos de intermitência severa para o mapa de estabilidade de +8 graus.

A Figura 3.8 mostra a variação dos valores de períodos dos casos instáveis.

Figura 3.9: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 23 da Tabela 3.10).

O comportamento da pressão na base do *riser* para o caso 23 (Figura 3.9), $j_g = 0,031 \text{ m/s}$ e $j_l = 0,069 \text{ m/s}$, é basicamente o mesmo que o visto anteriormente. As tabelas 3.11 a 3.13 mostram a comparação resultante das análises para os casos instáveis.

Tabela 3.11: Comparação das amplitudes dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o *pipeline* a +8 graus com incertezas.

Caso	Experimental ($10^5 Pa$)	NPW ($10^5 Pa$)	Erro (%)	Inércia ($10^5 Pa$)	Erro (%)
9	0,16	0,14	11	0,13	19
10	0,15	0,13	13	0,16	3
22	0,11	0,10	12	0,12	7
23	0,15	0,10	32	0,13	17
24	0,16	0,14	14	0,15	5

Observa-se uma boa aderência de resultados quando se compara as amplitudes dos ciclos mantendo-se assim a tendência observada até agora.

Tabela 3.12: Comparação dos valores de pressão média para os casos instáveis com o *pipeline* a +8 graus.

Caso	Experimental ($10^5 Pa$)	NPW ($10^5 Pa$)	Erro (%)	Inércia ($10^5 Pa$)	Erro (%)
9	1,48	1,51	3	1,50	1
10	1,48	1,52	3	1,50	2
22	1,49	1,54	3	1,52	2
23	1,48	1,54	4	1,52	3
24	1,48	1,51	2	1,51	2

A diferença da ordem de $0,03 \text{ bara}$ ainda é verificada aqui mostrando que há um com-

portamento regular dos resultados experimentais.

Tabela 3.13: Comparação dos períodos dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o *pipeline* a +8 graus.

Caso	Experimental (s)	NPW (s)	Erro (%)	Inércia (s)	Erro (%)
9	44,0	47,5	8	47,5	8
10	42,1	45,2	7	45,4	8
22	40,7	45,1	11	45,7	12
23	42,8	47,8	12	48,4	13
24	43,8	47,7	9	50,1	15

A análise dos períodos mostra mais uma vez que as diferenças não superam muito mais que 15% do valor do período medido experimentalmente.

3.4 Inclinação do *pipeline*: +7 graus

A pressão média no separador foi de 0,93 *bara* com temperatura média de 27,2 °C. As medições experimentais dos 24 casos realizados podem ser vistos na Tabela 3.14. Somente dois dos 24 pontos apresentaram oscilações de pressão na base do *riser* indicando casos instáveis. As faixas de velocidade superficial de água e gás foram, respectivamente, de 0,055 a 0,178 *m/s* e de 0,033 a 0,054 *m/s*. A região instável obtida experimentalmente se encontrou com valores de velocidade superficial de água menor que 0,069 *m/s* e velocidade superficial de gás menor que 0,035 *m/s*.

Tabela 3.14: Resultados experimentais com *pipeline* a +7 graus.

Caso	T(°C)	j_{g0} (m/s)	j_{l0} (m/s)	Ps (bara)	Tipo	Período (s)
1	24,2	0,053	0,055	0,93	Estável	-
2	29,9	0,052	0,069	0,93	Estável	-
3	29,7	0,054	0,082	0,93	Estável	-
4	29,6	0,052	0,096	0,93	Estável	-
5	29,5	0,054	0,110	0,93	Estável	-
6	29,6	0,054	0,123	0,93	Estável	-
7	25,4	0,054	0,151	0,93	Estável	-
8	29,2	0,054	0,178	0,93	Estável	-
9	26,3	0,046	0,055	0,94	Estável	-
10	27,8	0,046	0,069	0,93	Estável	-
11	27,8	0,046	0,082	0,93	Estável	-
12	25,7	0,044	0,096	0,93	Estável	-
13	26,0	0,044	0,110	0,93	Estável	-
14	25,3	0,044	0,123	0,93	Estável	-
15	26,6	0,046	0,151	0,93	Estável	-
16	27,7	0,045	0,178	0,93	Estável	-
17	25,7	0,034	0,178	0,93	Estável	-
18	28,3	0,034	0,151	0,93	Estável	-
19	26,2	0,034	0,123	0,93	Estável	-
20	26,2	0,033	0,110	0,93	Estável	-
21	27,2	0,034	0,096	0,93	Estável	-
22	25,5	0,035	0,082	0,93	Estável	-
23	25,4	0,035	0,069	0,93	Instável	41,7
24	26,9	0,034	0,055	0,93	Instável	49,3

A partir dessa inclinação são verificados poucos pontos instáveis devido à limitação dos medidores de vazão. Porém, os resultados ainda mantêm a tendência observada de que o período é maior quanto menor forem as velocidades superficiais, assim como se observa instabilidade somente no casos com menores vazões. Deve-se levar em consideração também que quanto menor a inclinação menor é a região instável de maneira que o que é apresentado aqui continua mostrando uma boa concordância com a teoria.

Figura 3.10: Mapa de estabilidade para +7 graus.

A Figura 3.10 mostra o mapa de estabilidade obtido. Na mesma figura pode-se ver o limite de estabilidade obtido pela teoria de estabilidade linear. Observa-se um bom acordo do modelo de estabilidade linear com os resultados experimentais. Observa-se que dessa vez não há nenhum ponto instável observado na casa de velocidades superficiais de $0,04 \text{ m/s}$ mostrando uma boa concordância. Ainda assim a curva parece superestimar levemente a zona instável. A Figura 3.11 mostra a variação dos períodos dos ciclos de intermitência severa.

Figura 3.11: Período dos ciclos de intermitência severa para o mapa de estabilidade de +7 graus.

Figura 3.12: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 23 da Tabela 3.14).

O comportamento da pressão na base do *riser* do caso 23 (Figura 3.12), $j_g = 0,035 \text{ m/s}$ e $j_l = 0,069 \text{ m/s}$, possui o mesmo comportamento visto anteriormente. As tabelas 3.15 a 3.17 mostram a comparação resultante das análises para os casos instáveis.

Tabela 3.15: Comparação das amplitudes dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o *pipeline* a +7 graus com incertezas.

Caso	Experimental ($10^5 Pa$)	NPW ($10^5 Pa$)	Erro (%)	Inércia ($10^5 Pa$)	Erro (%)
23	0,10	0,10	4	0,13	28
24	0,11	0,13	21	0,15	37

Comparado com as outras inclinações verifica-se uma diferença mais expressível entre os valores de amplitude obtidos pelos métodos numéricos.

Tabela 3.16: Comparação dos valores de pressão média para os casos instáveis com o *pipeline* a +7 graus.

Caso	Experimental ($10^5 Pa$)	NPW ($10^5 Pa$)	Erro (%)	Inércia ($10^5 Pa$)	Erro (%)
23	1,49	1,53	3	1,52	2
24	1,52	1,51	0	1,51	0

A pressão média continua a manter a tendência de que os modelos numéricos apresentam 0,03 *bara* a mais que o obtido experimentalmente.

Tabela 3.17: Comparação dos períodos dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o *pipeline* a +7 graus.

Caso	Experimental (s)	NPW (s)	Erro (%)	Inércia (s)	Erro (%)
23	41,7	47,2	13	47,4	14
24	49,3	47,1	4	50,0	2

Uma boa concordância também continua a ser observada quanto aos períodos dos ciclos instáveis.

3.5 Inclinação do *pipeline*: +6 e +5 graus

A pressão média no separador foi de 0,93 *bara* com temperatura média de 26,1 °C para +6 graus e de 23,7 °C para +5 graus. As medições experimentais dos 24 casos realizados para ambas as inclinações podem ser vistos nas Tabelas 3.18 e 3.19. Apenas um dos 24 pontos apresentou oscilações de pressão na base do *riser* indicando casos instáveis para as duas inclinações. Análise visual indicou que eram SS3 ou OSC. As faixas de velocidade superficial de água e gás foram, respectivamente, de 0,055 a 0,178 *m/s* e de 0,032 a 0,054 *m/s* para +6 graus e de 0,055 a 0,178 *m/s* e de 0,030 a 0,052 *m/s* para +5 graus. A região instável obtida experimentalmente se encontrou com valores de velocidade superficial de água menor que 0,033 *m/s* e velocidade superficial de gás menor que 0,055 *m/s* para ambos os casos.

Tabela 3.18: Resultados experimentais com *pipeline* a +6 graus.

Caso	T(°C)	j_{g0} (m/s)	j_{l0} (m/s)	Ps (bara)	Tipo	Período (s)
1	25,5	0,053	0,055	0,93	Estável	-
2	25,5	0,052	0,069	0,93	Estável	-
3	27,2	0,052	0,082	0,93	Estável	-
4	27,6	0,052	0,096	0,93	Estável	-
5	25,4	0,053	0,110	0,94	Estável	-
6	27,5	0,053	0,123	0,93	Estável	-
7	25,0	0,051	0,151	0,94	Estável	-
8	24,2	0,054	0,178	0,94	Estável	-
9	24,6	0,043	0,055	0,93	Estável	-
10	28,1	0,042	0,069	0,93	Estável	-
11	28,0	0,043	0,082	0,93	Estável	-
12	27,7	0,043	0,096	0,93	Estável	-
13	25,1	0,041	0,110	0,94	Estável	-
14	27,5	0,043	0,123	0,93	Estável	-
15	25,0	0,043	0,151	0,94	Estável	-
16	25,1	0,042	0,178	0,94	Estável	-
17	27,2	0,033	0,178	0,93	Estável	-
18	27,0	0,032	0,151	0,93	Estável	-
19	26,3	0,032	0,123	0,93	Estável	-
20	24,9	0,032	0,110	0,94	Estável	-
21	24,7	0,032	0,096	0,94	Estável	-
22	25,6	0,032	0,082	0,93	Estável	-
23	25,5	0,033	0,069	0,93	Estável	-
24	25,5	0,033	0,055	0,93	Instável	43,9

Somente um ponto instável foi observado de modo que não se pode verificar a variação dos valores de períodos de ciclos para menores vazões.

Figura 3.13: Mapa de estabilidade para +6 graus.

A Figura 3.13 mostra o mapa de estabilidade obtido para +6 graus. Na mesma figura pode-se ver o limite de estabilidade obtido pela teoria de estabilidade linear. Observa-se um bom acordo entre os resultados experimentais e o modelo analítico. Assim como para o ângulo de +7 graus a região instável experimental é levemente maior que a predita pelo modelo analítico.

Figura 3.14: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 24 da Tabela 3.18).

A Figura 3.14 mostra a comparação do valor de pressão na base do *riser*. O comportamento geral se mantém como nos casos anteriores.

Tabela 3.19: Resultados experimentais com *pipeline* a +5 graus.

Caso	T(°C)	j_{g0} (m/s)	j_{l0} (m/s)	Ps (bara)	Tipo	Período (s)
1	24,6	0,032	0,055	0,93	Instável	43,3
2	25,8	0,041	0,096	0,93	Estável	-
3	25,3	0,031	0,096	0,93	Estável	-
4	25,5	0,030	0,110	0,93	Estável	-
5	25,4	0,031	0,069	0,94	Estável	-
6	25,0	0,031	0,082	0,94	Estável	-
7	22,6	0,032	0,123	0,93	Estável	-
8	22,6	0,031	0,151	0,93	Estável	-
9	22,4	0,030	0,178	0,93	Estável	-
10	24,9	0,041	0,055	0,94	Estável	-
11	25,1	0,041	0,069	0,94	Estável	-
12	24,3	0,041	0,082	0,93	Estável	-
13	22,6	0,042	0,110	0,93	Estável	-
14	22,5	0,041	0,123	0,93	Estável	-
15	22,7	0,040	0,151	0,93	Estável	-
16	22,5	0,040	0,178	0,93	Estável	-
17	24,7	0,050	0,055	0,94	Estável	-
18	25,5	0,051	0,069	0,93	Estável	-
19	24,4	0,051	0,082	0,93	Estável	-
20	21,1	0,052	0,096	0,94	Estável	-
21	21,5	0,051	0,110	0,94	Estável	-
22	22,7	0,052	0,123	0,93	Estável	-
23	22,8	0,050	0,151	0,93	Estável	-
24	22,1	0,050	0,178	0,94	Estável	-

Figura 3.15: Mapa de estabilidade para +5 graus.

A Figura 3.15 mostra o mapa de estabilidade obtido para +5 graus. Observa-se um bom acordo entre os resultados onde os pontos experimentais mostram uma região instável maior. Novamente verifica-se que a curva de estabilidade linear parece superestimar a região instável. A Figura 3.16 mostra a comparação do valor de pressão na base do *riser*. Mantêm-se o mesmo comportamento visto anteriormente.

Figura 3.16: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 1 da Tabela 3.19).

O comportamento apresentado nas tabelas 3.20 a 3.22 seguem o mesmo padrão das outras inclinações. Há uma boa aderência de resultados quando se compara as amplitudes, os períodos e os valores de pressão média dos métodos numéricos com os resultados experimentais.

Tabela 3.20: Comparação das amplitudes dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o *pipeline* a +6 graus com incertezas.

Ângulo	Caso	Experimental ($10^5 Pa$)	NPW ($10^5 Pa$)	Erro (%)	Inércia ($10^5 Pa$)	Erro (%)
6	24	0,11	0,13	23	0,14	30
5	14	0,10	0,13	29	0,13	32

Tabela 3.21: Comparação dos valores de pressão média para os casos instáveis com o *pipeline* a +6 graus.

Ângulo	Caso	Experimental ($10^5 Pa$)	NPW ($10^5 Pa$)	Erro (%)	Inércia ($10^5 Pa$)	Erro (%)
6	24	1,49	1,51	2	1,51	2
5	14	1,49	1,52	2	1,52	2

Tabela 3.22: Comparação dos períodos dos ciclos de pressão para os casos instáveis com o *pipeline* a +6 graus.

Ângulo	Caso	Experimental (s)	NPW (s)	Erro (%)	Inércia (s)	Erro (%)
6	24	39,1	47,0	20	50,0	28
5	14	39,1	46,8	20	50,2	28

3.6 Pressão variável no separador

O estudo de pressão variável mostrou resultados interessantes quanto ao comportamento do sistema quando se fecha parcialmente a válvula no separador. A Figura 3.17 mostra a condição instável antes da variação da pressão do separador. A pressão no separador (P_{sep}) e a pressão na base do *riser* (P_{br}) podem ser vistas. O caso consiste no sistema tendo uma inclinação do *pipeline* de +10 graus com velocidades superficiais médias de gás e água de $0,036\text{ m/s}$ e $0,055\text{ m/s}$.

Figura 3.17: Condição instável para inclinação de +10 graus com $j_g = 0,03\text{ m/s}$ e $j_l = 0,055\text{ m/s}$.

O segundo gráfico (Figura 3.18) mostra a variação das pressões na base do *riser* (linha azul), no separador (linha vermelha) e a variação da velocidade superficial de gás (linha verde) em um mesmo gráfico. Os valores de velocidade superficial foram multiplicados por 10 para facilitar a visualização. Observa-se que um leve aumento de pressão no separador já faz com que a instabilidade, isto é, as oscilações de pressão sejam mitigadas. É esperado que quanto maior for a pressão no separador, menor deva ser a velocidade superficial de gás pelo fato de que ela é sensível à diferença de pressão entre o ponto de sua entrada no *pipeline* e o separador. Observa-se algo próximo quando se compara os valores médios, mas isso ainda não pode ser afirmado pela falta de mais dados experimentais. Especialmente pelo fato de que seria preciso mais tempo para verificar a variação de vazões. Não foi observado uma variação considerável na velocidade superficial de água.

Ao mesmo tempo nota-se que ao se abrir a válvula novamente a pressão no separador diminui e os ciclos de pressão voltam a aparecer. Foi verificado em alguns testes que qualquer aumento de pressão causa mudanças visíveis na pressão na base do *riser* de modo que fez com que fosse difícil encontrar alguma situação ideal de trabalho para um estudo mais aprofundado sobre esse fator. Porém em um primeiro momento foi possível verificar que a pressão no separador pode ser considerada para futuros estudos.

Figura 3.18: Variação das variáveis com a mudança da pressão no separador para inclinação de +10 graus com $j_g = 0,03 \text{ m/s}$ e $j_l = 0,055 \text{ m/s}$.

A pressão média no separador era de $0,93 \text{ bara}$ e após uma variação positiva de 2,5% chegou a um valor médio de $0,95 \text{ bara}$. Com isso se observa uma mudança no comportamento do escoamento. O sistema tende a ficar estável onde a pressão na base do *riser* tende a aumentar com o aumento da pressão no separador. Isso pode ser explicado pelo fato de que a vazão de gás é fortemente influenciada pela diferença de pressão entre o *pipeline* e o separador. Logo, a vazão de gás parece diminuir enquanto a vazão de água se mantém constante.

Em seguida observa-se que o escoamento volta a seu estado inicial quando a pressão cai. O restante do gráfico mostra um novo aumento e queda de pressão mostrando a relação direta entre o escoamento no *riser* e a pressão no separador. A velocidade superficial também diminui com o tempo o que pode ser explicado pelo fato do escoamento na placa de orifício ter saído da condição de bloqueio após o aumento de pressão no separador.

4 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi realizar um primeiro estudo no laboratório multifásico sobre o fenômeno de intermitência severa que é prejudicial para a produção de petróleo. O sistema *pipeline-riser* do laboratório multifásico conseguiu recriar situações onde se observa instabilidade no sistema. Mapas de estabilidade para diferentes configurações do sistema também foram obtidos. Os mapas de estabilidade foram comparados com curvas de estabilidade obtidas usando a teoria de estabilidade linear onde se observou uma boa coerência de resultados.

De modo geral os resultados obtidos pelo modelo de estabilidade linear e pelos modelos numéricos apresentaram uma boa coerência com os resultados experimentais. A curva de estabilidade linear parece superestimar levemente a zona instável em boa parte dos casos, mas deve-se levar em conta que as medições com as menores vazões, que costumam ser as medições referentes aos casos instáveis, possuem grandes valores de incerteza devido à restrição dos medidores de vazão. Apesar disso a análise da flutuação de pressão na base do *riser* indica um comportamento condizente com o esperado teoricamente, isto é, surgimento de ciclos de pressão em que se verificam maiores amplitudes e períodos para vazões cada vez menores de fluidos.

Isso pode ser visto melhor nas figuras 3.2 e 3.5 que possuem o maior número de pontos instáveis. A tendência parece ser a de que a velocidade superficial de gás possui uma influência maior que a de água. Uma menor vazão de água indica que um tempo maior será necessário para que o *riser* seja completamente preenchido por água durante a fase de produção de *slug* enquanto uma menor vazão de gás indica um maior tempo para que o gás percorra todo o *riser* e uma maior facilidade de acúmulo de líquido na base do *riser*.

As comparações das flutuações de pressão na base do *riser* contra os métodos numéricos apresentaram uma boa concordância entre os principais parâmetros que foram comparados. Uma das razões para a qual tanto a amplitude como outros parâmetros como o período e pressão média acabam tendo uma diferença pode ser explicada pelo modo de como foi considerado realizar a medição da altura física do *riser*. A altura de 7 metros é considerada a partir da seção que se encontra completamente vertical e não todo o trecho após a seção do *pipeline*. A figura 4.1 é usada para ilustrar melhor esta diferença.

O comprimento de 7,2 m do *pipeline* foi considerado até a posição do centro do tubo do *riser* enquanto a mesma ideia é válida para o comprimento do *riser* (linhas brancas). O modelo numérico considera que o *riser* se inicia quando há alguma curvatura de modo que há uma pequena diferença entre os valores.

Figura 4.1: Consideração das medições do *pipeline* e do *riser*.

Essa diferença de alguns centímetros pode ser a causa pela qual a pressão média é aproximadamente equivalente a 30 *cm* de coluna de água. Por isso há maiores valores nos modelos numéricos que o obtido experimentalmente. Além disso, essa diferença afetaria os valores usados nas comparações pelo fato de que o modelo numérico estaria atualmente pegando valores em uma seção mais baixa quando comparado a posição real do transdutor de pressão realmente se encontra. Isso explicaria também as diferenças de amplitude de pressão.

Apesar dessas considerações os resultados obtidos mostraram uma boa aderência de modo que os modelos numéricos apresentam uma boa coerência com o sistema do laboratório multifásico. As diferenças de pressão podem chegar a conseguir proporções consideráveis a depender do caso, mas os períodos aparentam ter uma diferença média de 10%.

Variações de pressão no separador para condições instáveis mostraram que o sistema é sensível a essas mudanças. Não foi possível manter a pressão em valores constantes por muito tempo, mas verificou-se que quando se fecha a válvula parcialmente que as flutuações de pressão tendem a ser eliminadas nessas condições. Outra consideração inicial foi em relação aos parâmetros de ciclos instáveis em função de diferentes inclinações. Poucos pontos puderam ser comparados, mas algumas tendência já puderam ser notadas. Explicações condizentes ainda não podem ser feitas pela falta de dados experimentais.

Devido à restrições dos medidores de vazões os resultados foram obtidos para inclinações de *pipeline* maiores ou iguais a +5 graus. Dados referentes as flutuações de pressão na

base do *riser* também foram condizentes com a teoria, isto é, menores vazões indicam casos instáveis onde se observa ciclos de pressão cada vez mais longos e com maior amplitude. Os altos valores de incertezas observados nos casos com menores vazões indicam que é preciso realizar medições com equipamentos mais apropriados para garantir uma maior confiabilidade dos resultados.

Ainda há muito o que ser observado no laboratório. Medidores novos podem ser usados para complementar os mapas de estabilidade onde se pode observar mais casos de intermitência severa. Menores vazões podem chegar a recriar casos de SS1 ou SS2 de modo que pode ser possível obter diferentes regiões dentro da região de instabilidade. Um melhor controle da válvula no separador também pode proporcionar uma análise mais completa acerca desse fator que pode ser usada a mitigação do fenômeno. Por fim, o uso de placas com maiores diâmetros podem proporcionar melhores condições para se poder analisar a injeção na base do *riser*.

Referências

- Almeida, A. R. e Gonçalves, M. A. L. (1999). Venturi for severe slug elimination. In *Proceedings of 9th International Conference MULTIPHASE 99*, page 10. American Society of Mechanical Engineers.
- Azevedo, G. R., Burr, K. P., e Baliño, J. L. (2015). Linear stability analysis for severe slugging in air-water systems considering different mitigation mechanisms. *aceito em International Journal of Multiphase Flow*, 5.
- Baliño, J. L. (2014). Modeling and simulation of severe slugging in air-water systems including inertial effects. *Journal of Computational Science*, 5(3):482–495.
- Baliño, J. L., Burr, K. P., e Nemoto, R. H. (2010). Modeling and simulation of severe slugging in air-water pipeline-riser systems. *International Journal of Multiphase Flow*, 36:643–660.
- Bøe, A. (1981). *Severe slugging characteristics. Part I: Flow regime for severe slugging. Part II: Point model simulation study*. Trondheim, Norway.
- Burr, K. P. e Baliño, J. L. (2013). Discretization effects on the linear numerical stability analysis of two-phase flows in pipeline-riser systems. In *submitted to XXII International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*, pages 1–12, Ribeirão Preto, SP, Brazil.
- Collier, J. G. (1972). *Convective boiling and condensation*. McGraw-Hill, New York.
- Fabre, J., Presson, L. L., Corteville, J., Odello, R., e Bourgeois, T. (1990). Severe slugging in pipeline/riser systems. *SPE Production Engineering*, 5(3):299–305.
- Havre, K. e Dalsmo, M. (2002). Active feedback control as solution to severe slugging. *SPE PF*, 17:138–148.
- Jansen, F. E., Shohan, O., e Taitel, Y. (1996). The elimination of severe slugging - experiments and modeling. *International Journal of Multiphase Flow*, 22(6):1055–1072.
- Makogan, T. Y. e Brook, G. J. (2007). Device for controlling slugging. *Patent No. WO 2007/034142*.
- Malekzadeh, R., Henkes, R. A. W. M., e Mudde, R. F. (2012). Severe slugging in a long pipeline-riser system: Experiments and predictions. *International Journal of Multiphase Flow*, 46:9–21.
- Miller, R. W. (1989). *Flow measurement engineering handbook*. McGraw-Hill.
- Moe, J., Lingelem, M. N., Holm, H., e Oldervik, O. (1989). Severe slugging in offshore gas-condensate flowline-riser systems. *Proceedings 4th International Conference on Multiphase Production*, pages 527–560.

- Mokhatab, S. (2010). *Severe slugging in offshore production systems*. Nova Science Publishers, Inc., New York.
- Molyneux, P., Tait, A., e Kinvig, J. (2000). Characterisation and active control of slugging in a vertical riser. *Proceedings 2nd North American Conference on Multiphase Production*, pages 161–170.
- Montgomery, J. A. (2002). *Severe slugging and unstable flows in an S-shaped riser*. Phd thesis, Cranfield University, Cranfield, UK.
- Nemoto, R. H. e Baliño, J. L. (2012). Modeling and simulation of severe slugging with mass transfer effects. *International Journal of Multiphase Flow*, 40:144–157.
- Pots, B., Bromilow, I., e Konijn, M. (1987). Severe slug flow in offshore flowline/riser systems. *SPE Production Engineering*, pages 319–324.
- Sarica, C. e Shoham, O. (1991). A simplified transient model for pipeline-riser systems. *Chemical Engineering Science*, 46(9):2167–2179.
- Schmidt, Z. (1977). *Experimental study of two-phase slug flow in a pipeline-riser system*. PhD thesis, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- Schmidt, Z., Brill, J., e Beggs, H. (1979a). Experimental study of severe slugging in a two phase flow pipeline-riser system. *SPE, Paper 8306*, 20(5):407–414.
- Schmidt, Z., Brill, J., e Beggs, H. D. (1979b). Choking can eliminate severe pipeline slugging. *Oil Gas J*, 12:230–238.
- Schmidt, Z., Doty, D. R., e Dutta-Roy, K. (1985). Severe slugging in offshore pipeline-riser pipe system. *SPE J*, 25:27–38.
- Storkaas, E. e Skogestad, S. (2007). Controllability analysis of two-phase pipeline-riser systems at riser slugging conditions. *Control Engineering Practice*, 15:567–581.
- Taitel, Y. (1986). Stability of severe slugging. *International Journal of Multiphase Flow*, 12(2):203–217.
- Taitel, Y., Vierkand, S., Shoham, O., e Brill, J. P. (1990). Severe slugging in a riser system: experiments and modeling. *International Journal of Multiphase Flow*, 16(1):57–68.
- Tengesdal, J. Ø. (2002). *Investigation on self-lifting concept for severe slugging elimination in deep-water pipeline/riser systems*. PhD thesis, The Pennsylvania State University, Pennsylvania.

- Tengesdal, J. O., Thompson, L., e Sarica, C. (2003). A design approach for "self-lifting" method to eliminate severe slugging in offshore production systems. Number SPE 84227, pages 1–6, Denver, Colorado. SPE.
- Tin, V. e Sarshar, M. (1993). An investigation of severe slugging characteristics in flexible risers.
- Vierkandt, S. (1988). *Severe slugging in pipeline-riser system, experiments and modelling*. Ms thesis, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- Vuolo, J. H. (1996). *Fundamentos da Teoria de Erros*. Livraria Triângulo Editora Ltda, São Paulo, Brasil.
- Wordsworth, C., Das, I., Loh, W. L., McNulty, G., Lima, P. C., e Barbuto, F. (1998). *Multiphase Flow Behavior in a Catenary Shaped Riser*. CALTEC Report No.: CR 6820, Bedford, UK.
- Xiaoming, L., Limin, H. E., e Huawei, M. A. (2011). Flow pattern and pressure fluctuation of severe slugging in pipeline-riser system. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 19:26–32.
- Xing, L., Yeung, H., Shen, J., e Cao, Y. (2013a). A new flow conditioner for mitigating severe slugging in pipeline/riser system. *International Journal of Multiphase Flow*, 51:65–72.
- Xing, L., Yeung, H., Shen, J., e Cao, Y. (2013b). Numerical study on mitigating severe slugging in pipeline/riser system with wavy pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, 53:1–10.
- Ye, J. e Guo, L. (2013). Multiphase flow patten recognition in pipeline-riser system by statistical feature clustering of pressure fluctuations. *Chemical Engineering Science*, 102:486–601.
- Yocum, B. T. (1973). Offshore riser slug flow avoidance, mathematical model for design and optimization. In *SPE European Meeting*, number Paper SPE 4312, London, UK.
- Zakarian, E. (2000). Analysis of two-phase flow instabilities in pipe-riser systems. In *2000 ASME Pressure Vessel and Piping Conference*, pages 1–9, Seattle, Washington, USA. ASME.

APÊNDICE A - BANCADA EXPERIMENTAL

Algumas informações complementares referentes a bancada experimental do laboratório multifásico são apresentadas neste apêndice. A Tabela A.1 mostra uma lista dos principais equipamentos da bancada e suas respectivas siglas.

Tabela A.1: Principais equipamentos da bancada experimental.

Sigla	Equipamento
P-101	Bomba de água
FT-101	Medidor eletromagnético
FI-201	Medidor de Coriolis
PV-201	Válvula posicionadora na linha de ar
TI-201	Transdutor de temperatura na linha de ar
PT-201	Transdutor de pressão na linha de ar
PDT-301	Transdutor de pressão diferencial no <i>pipeline</i>
PT-401	Transdutor de pressão na base do <i>riser</i>
TT-401	Transdutor de temperatura na base do <i>riser</i>
PDT-401	Transdutor de pressão diferencial no <i>riser</i>
PV-501	Válvula posicionadora na linha de injeção de gás
PT-501	Transdutor de pressão na linha de injeção de gás
TT-501	Transdutor de temperatura na linha de injeção de gás
PT-601	Transdutor de pressão no separador
PV-601	Válvula posicionadora da saída de ar
XV-701	Solenóide

Figura A.3: Medidor de vazão eletromagnético.

Figura A.4: Tanque de acumulação.

Figura A.5: Compressor.

Figura A.6: Válvula posicionadora.

APÊNDICE B - ANÁLISE DE INCERTEZAS

Neste Apêndice foram descritos alguns conceitos básicos relacionados com as incertezas de medições e como isso foi aplicado para este estudo. Primeiramente deve-se considerar que toda e qualquer medição possui algum erro que é definido como sendo a diferença algébrica entre o valor verdadeiro e o valor medido. Os erros podem ser divididos em duas categorias: erros sistemáticos e erros aleatórios. Erros sistemáticos se referem aos erros que ocorrem em todas as medições com aproximadamente a mesma intensidade enquanto erros aleatórios são erros que surgem por diversos fatores que representam pequenas variações para uma mesma medida.

De acordo com Vuolo (1996) os erros estatísticos e sistemáticos podem ser distinguidos da seguinte forma: erro estatístico ou erro aleatório é um erro tal que os n resultados y_i se distribuem de maneira aleatória em torno do valor verdadeiro y_v (na ausência de erro sistemático). Conforme o número de repetições da medição aumenta indefinidamente ($n \rightarrow \infty$), o valor médio $\bar{y}$ se aproxima do valor verdadeiro da grandeza (y_v).

Erro sistemático é sempre o mesmo nos n resultados, isto é, quando existe somente erro sistemático, os n resultados y_i são iguais e a diferença para o valor verdadeiro y_v é sempre a mesma. Erros sistemáticos podem ter causas muito diversas e geralmente se enquadram em um dos tipos definidos a seguir: erro sistemático instrumental é o erro que resulta da calibração do instrumento de medição. Além do erro na calibração inicial do instrumento, deve ser observado que a calibração pode se alterar em função de diversos fatores, tais como temperatura, alteração das características dos materiais e componentes, desgaste de partes móveis e outros. Erro sistemático ambiental é o erro devido à efeitos do ambiente sobre a experiência. Fatores ambientais como temperatura, pressão umidade, aceleração da gravidade, campo magnético terrestre, luz, ruídos eletromagnéticos e outros podem introduzir erros nos resultados de uma medição. Erro sistemático observacional é um erro sistemático devido à pequenas falhas de procedimento ou limitações do próprio observador.

Erro teórico é o erro que resulta do uso de fórmulas teóricas aproximadas para obtenção dos resultados. Na realização de uma experiência geralmente é necessário utilizar um modelo para o fenômeno físico em questão. As fórmulas teóricas podem não ser suficientemente exatas conforme o modelo adotado. Os resultados obtidos por meio destas fórmulas terão erro que é, em geral, sistemático.

Neste estudo foram considerados os erros sistemáticos e teóricos. Os erros sistemáticos se referem aos erros relacionados com os equipamentos onde foram usadas as incertezas tabeladas para cada um. Para o cálculo das velocidades superficiais teve que ser considerado a

propagação de incertezas. Os valores de vazão mássica de gás medidos ficaram fora da faixa de menor incerteza do Medidor de Coriolis (1% de erro para medições até 5% do valor máximo de medição) de modo que o erro para cada medição deveria ser calculado da seguinte forma:

$$E(\%) = \sqrt{0,1^2 + \left(\frac{z * 100}{qm}\right)^2} \quad (24)$$

Onde qm indica a vazão mássica medida e z é um valor tabelado, ambos dados em kg/h . O valor de z para este medidor é de $0,05 kg/h$ de modo que para a faixa de vazões mássicas usadas nos experimentos o erro variou entre 10 a 16% como pode ser visto na tabela B.1.

Tabela B.1: Valores de erro para vazões mássicas médias do medidor de Coriolis.

Vazão mássica (kg/h)	Erro (%)	Incerteza (kg/h)
0,5	10	0,05
0,4	12,5	0,05
0,3	16,7	0,05

Verifica-se que para a faixa desejada a incerteza fica em torno de $0,05 kg/h$. A propagação de incertezas para o cálculos das velocidades superficiais foi então realizada conforme a teoria:

$$A = Cxy \Rightarrow \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2 \quad (25)$$

Onde C é uma constante. Pela Eq. 25 se verifica que há somente uma variável para a qual a incerteza deve ser propagada. Assim a incerteza referente é calculada:

$$\sigma_j = j \frac{\sigma_{vazao}}{vazao} \quad (26)$$

Para o medidor eletromagnético a incerteza pode ser obtida considerando 1% do valor medido. A Tabela B.2 mostra o restante das incertezas dos equipamentos usados neste estudo.

Tabela B.2: Resumo das incertezas dos equipamentos.

Equipamento	Incerteza
Transdutores de temperatura	$0,3^\circ C$
Transdutores de pressão nos sistemas de controle da placa de orifício	$0,05 bar$
Transdutor de pressão na base do <i>riser</i>	$0,03 bar$
Transdutor de pressão do separador	$0,03 bar$

APÊNDICE C - CALIBRAÇÃO DAS PLACAS DE ORIFÍCIO

Este apêndice mostra um dos resultados da realização da calibração das placas de orifício usadas no laboratório. Somente uma placa foi efetivamente neste estudo, mas é imprescindível que o restante das placas já tenham sido calibradas para uso em futuras aplicações. Neste apêndice somente o resultado referente à placa 2 usada no estudo é mostrada. Primeiramente uma tabela com dados das medições juntamente com as incertezas e por fim a curva de calibração obtida. Este mesmo procedimento foi aplicado para todas as outras placas, apesar de algumas apresentarem comportamentos que não puderam ser medidos devido às baixas vazões (placas 1 e 31).

Tabela C.1: Dados para a calibração da placa 2.

Medição 1			Medição 2			Medição 3		
Pressão	$\dot{J}_{g0}$	Incerteza	Pressão	$\dot{J}_{g0}$	Incerteza	Pressão	$\dot{J}_{g0}$	Incerteza
(bar)	(m/s)	(m/s)	(bar)	(m/s)	(m/s)	(bar)	(m/s)	(m/s)
3,67	0,029	0,006	3,20	0,044	0,006	3,20	0,043	0,006
4,10	0,043	0,006	3,97	0,054	0,006	4,05	0,057	0,006
4,65	0,056	0,005	4,53	0,056	0,005	4,61	0,057	0,005
5,10	0,061	0,006	4,96	0,062	0,006	5,06	0,065	0,006
5,51	0,071	0,006	5,53	0,070	0,006	5,62	0,074	0,006
6,00	0,077	0,006	5,93	0,077	0,006	5,95	0,074	0,005
6,56	0,086	0,006	6,46	0,086	0,006	6,57	0,080	0,005
7,00	0,091	0,006	6,89	0,091	0,006	7,02	0,090	0,006
7,42	0,101	0,006	7,45	0,103	0,006	7,50	0,096	0,006
7,94	0,106	0,006	7,88	0,102	0,006	7,97	0,099	0,006
8,39	0,114	0,006	8,23	0,115	0,006	8,37	0,104	0,006
8,95	0,121	0,006	8,89	0,121	0,006	8,93	0,115	0,006

Figura C.1: Curva de calibração da placa 2.

APÊNDICE D - MÉTODOS NUMÉRICOS

Uma descrição mais detalhada dos modelos numéricos foi realizada neste apêndice. A teoria mostrada é a mesma apresentada nos trabalhos de [Baliño et al. \(2010\)](#) e [Baliño \(2014\)](#). O modelo divide o *pipeline* e o *riser* em dois subsistemas. O programa consiste basicamente em usar os dados de entrada do usuário referentes às condições de contornos de modo a calcular as diferentes variáveis presentes no escoamento e prever como ele se comporta em função do tempo. Os principais dados de entrada são as vazões ou velocidades superficiais dos fluidos na entrada do *pipeline*, a pressão no separador e os dados do sistema *pipeline-riser*.

Primeiramente o modelo calcula o escoamento para um estado estacionário e a partir desse ponto o cálculo transiente se inicia. O subsistema referente ao *pipeline* calcula três principais variáveis que são a fração de vazio, que é considerada constante em todo seu comprimento, a penetração de líquido no *pipeline* e a pressão de gás. As velocidades superficiais na base do *riser* são enviadas desse sub-sistema para o subsistema do *riser*. Nesta outra rotina as variáveis do *riser* são calculadas. Pressão, fração de vazio e velocidades superficiais são as principais variáveis. Após esse cálculo a pressão na base do *riser* é enviada a rotina do *pipeline*.

Esse procedimento continua até que ocorra uma convergência das variáveis calculadas. No modelo de inércia a injeção de gás na base do *riser* e a presença de uma válvula *choke* também podem ser consideradas. Uma descrição mais completa das sub-rotinas é mostrada nas próximas subseções. A descrição é referente ao modelo de inércia por ser mais completo.

D.1 Pipeline

A Figura [D.1](#) mostra as principais variáveis consideradas na formulação do *pipeline*. Existem duas condições básicas que podem ocorrer no *pipeline*: a) $x = 0$, ou seja, sem penetração de líquido no *pipeline* ou b) $x > 0$ que indica penetração de líquido. A primeira condição ($x = 0$) considera que:

$$\dot{j}_{gs} = \dot{j}_{gb} \quad (27)$$

$$\dot{j}_{ls} = \dot{j}_{lb} \quad (28)$$

$$P_{ps} = P_{pb} \quad (29)$$

Onde o subíndice s indica os valores das propriedades na frente de líquido e b na base do *riser* ([D.1](#)). As equações de conservação de massa e energia para as duas fases resultam em:

Figura D.1: Definição de variáveis no *pipeline*

$$\frac{d\alpha_p}{dt} = \frac{1}{l} \left(j_{lb} - \frac{Q_{l0}}{A} \right) \quad (30)$$

$$\frac{d\bar{P}_g}{dt} = \frac{-\bar{P}_g \left(j_{gb} + j_{lb} - \frac{Q_{l0}}{A} \right) + \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{g0}}{l\alpha_p + l_e} \quad (31)$$

Para a condição $x > 0$, temos que:

$$j_{gb} = 0 \quad (32)$$

Onde as equações de conservação de massa para as fases líquida e gasosa acabam resultando em:

$$\frac{d\alpha_p}{dt} = \frac{j_{lb} - \frac{Q_{l0}}{A} + \alpha_p \frac{dx}{dt}}{l - x} \quad (33)$$

$$\frac{d\bar{P}_g}{dt} = \frac{-\bar{P}_g \left(j_{lb} - \frac{Q_{l0}}{A} \right) + \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{g0}}{(l - x)\alpha_p + l_e} \quad (34)$$

D.2 Riser

A Figura D.2 mostra as principais variáveis consideradas na formulação do *riser*. No *riser* as velocidades superficiais das fases são obtidas usando a correlação de *drift* de modo que as equações de continuidade usadas são:

$$\frac{D_g \alpha}{Dt} + \alpha \frac{\partial}{\partial s} (C_d j + U_d) - \frac{\partial j}{\partial s} = 0 \quad (35)$$

$$\alpha \frac{D_g P}{Dt} + P \frac{\partial j}{\partial s} = 0 \quad (36)$$

Figura D.2: Definição de variáveis no riser

Onde:

$$\frac{D_g}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_g \frac{\partial}{\partial s} \quad (37)$$

Uma equação de momento da mistura também é considerada no qual os termos de inércia correspondentes as fases líquida e gasosa foram incluídas:

$$\frac{\partial P}{\partial s} = -\rho_m \left(g \sin \theta + 2 \frac{\bar{f}}{D} j |j| \right) - \alpha \rho_g \frac{D_g u_g}{Dt} - (1 - \alpha) \rho_l \frac{D_l u_l}{Dt} \quad (38)$$

Onde:

$$\rho_m = \rho_l (1 - \alpha) + \frac{P}{R_g T_g} \alpha \quad (39)$$

$$\frac{D_l}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_l \frac{\partial}{\partial s} \quad (40)$$

O riser é dividido em N nós onde o nó N possui como condição de contorno a pressão no separador. O procedimento geral da rotina consiste em calcular a velocidade superficial total, de líquido e de gás do ponto mais baixo (primeiro nó) até o último nó tendo como entrada os valores de velocidades superficiais obtidos na rotina do *pipeline*. Em seguida a fração de vazio é calculada usando o método das características e por último a pressão é obtida realizando a

integração do último ao primeiro nó.

D.3 Acoplamento entre *pipeline* e o *riser*

Considerando que a área de passagem é a mesma, sabe-se que os valores de pressão e velocidades superficiais na base do *riser* são contínuas:

$$P(s = 0, t) = P_{pb}(t) \quad (41)$$

$$j_g(s = 0, t) = j_{gb}(t) \quad (42)$$

$$j_l(s = 0, t) = j_{lb}(t) \quad (43)$$

Onde a fração de vazio, que é a condição de contorno, pode ser obtida da seguinte forma:

$$\alpha(s = 0, t) = \alpha_b(t) = \frac{j_{gb}}{C_{db}j_b + U_{db}} \quad (44)$$

APÊNDICE E - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Outros gráficos e as tabelas de incertezas experimentais são mostrados neste apêndice. Devido ao grande volume de dados foram considerados todos os casos instáveis e somente alguns casos estáveis. Os gráficos mostrados são as flutuações de pressão na base do *riser* e de velocidades superficiais no tempo. Os gráficos mostrados anteriormente não são apresentados aqui.

E.1 Inclinação do *pipeline*: +10 graus

Tabela E.1: Tabela de incertezas para o caso com *pipeline* a +10 graus.

Caso	$j_{g0}(m/s)$	Incerteza (m/s)	$j_{l0}(m/s)$	Incerteza (m/s)
1	0,053	0,006	0,0548	0,001
2	0,054	0,006	0,0685	0,001
3	0,054	0,006	0,0822	0,001
4	0,052	0,006	0,0959	0,001
5	0,054	0,006	0,1096	0,001
6	0,053	0,006	0,1233	0,001
7	0,053	0,006	0,1508	0,002
8	0,055	0,006	0,1782	0,002
9	0,043	0,006	0,1782	0,002
10	0,043	0,006	0,1508	0,002
11	0,043	0,006	0,1233	0,001
12	0,042	0,006	0,1096	0,001
13	0,041	0,006	0,0959	0,001
14	0,040	0,006	0,0822	0,001
15	0,042	0,006	0,0685	0,001
16	0,040	0,006	0,0548	0,001
17	0,031	0,006	0,0548	0,001
18	0,031	0,006	0,0685	0,001
19	0,031	0,006	0,0822	0,001
20	0,032	0,006	0,0959	0,001
21	0,031	0,006	0,1096	0,001
22	0,033	0,006	0,1233	0,001
23	0,033	0,006	0,1508	0,002
24	0,034	0,006	0,1782	0,002

A seguir são mostrados os gráficos restantes de flutuação de pressão para os casos instáveis:

Figura E.1: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 14 da Tabela 3.2).

Figura E.2: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 16 da Tabela 3.2).

Figura E.3: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 17 da Tabela 3.2).

Figura E.4: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 18 da Tabela 3.2).

Figura E.5: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 19 da Tabela 3.2).

Figura E.6: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 20 da Tabela 3.2).

A seguir são mostrados os gráficos de velocidades superficiais para os casos instáveis:

Figura E.7: Velocidades superficiais (Caso 14 da Tabela 3.2).

Figura E.8: Velocidades superficiais (Caso 15 da Tabela 3.2).

Figura E.9: Velocidades superficiais (Caso 16 da Tabela 3.2).

Figura E.10: Velocidades superficiais (Caso 17 da Tabela 3.2).

Figura E.11: Velocidades superficiais (Caso 18 da Tabela 3.2).

Figura E.12: Velocidades superficiais (Caso 19 da Tabela 3.2).

Figura E.13: Velocidades superficiais (Caso 20 da Tabela 3.2).

Por fim, alguns gráficos referentes a casos estáveis:

Figura E.14: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 2 da Tabela 3.2).

Figura E.15: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 11 da Tabela 3.2).

Figura E.16: Velocidades superficiais (Caso 2 da Tabela 3.2).

Figura E.17: Velocidades superficiais (Caso 11 da Tabela 3.2).

E.2 Inclinação do *pipeline*: +9 graus

Tabela E.2: Tabela de incertezas para o caso com *pipeline* a +9 graus.

Caso	$j_{g0}(m/s)$	Incerteza (m/s)	$j_{l0}(m/s)$	Incerteza (m/s)
1	0,033	0,006	0,055	0,001
2	0,035	0,006	0,069	0,001
3	0,035	0,006	0,082	0,001
4	0,036	0,006	0,096	0,001
5	0,037	0,006	0,110	0,001
6	0,037	0,006	0,123	0,001
7	0,038	0,006	0,151	0,002
8	0,038	0,006	0,178	0,002
9	0,054	0,006	0,055	0,001
10	0,052	0,006	0,069	0,001
11	0,054	0,006	0,082	0,001
12	0,053	0,006	0,096	0,001
13	0,052	0,006	0,110	0,001
14	0,053	0,006	0,123	0,001
15	0,054	0,006	0,151	0,002
16	0,054	0,006	0,178	0,002
17	0,043	0,006	0,178	0,002
18	0,042	0,006	0,151	0,002
19	0,041	0,006	0,123	0,001
20	0,040	0,006	0,110	0,001
21	0,041	0,006	0,096	0,001
22	0,041	0,006	0,082	0,001
23	0,042	0,006	0,069	0,001
24	0,042	0,006	0,055	0,001

A seguir são mostrados os gráficos restantes de flutuação de pressão para os casos instáveis:

Figura E.18: Flutuação de pressão na base do riser (Caso 1 da Tabela 3.6).

Figura E.19: Flutuação de pressão na base do riser (Caso 2 da Tabela 3.6).

Figura E.20: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 3 da Tabela 3.6).

Figura E.21: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 22 da Tabela 3.6).

Figura E.22: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 23 da Tabela 3.6).

Figura E.23: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 24 da Tabela 3.6).

A seguir são mostrados os gráficos de velocidades superficiais para os casos instáveis:

Figura E.24: Velocidades superficiais (Caso 1 da Tabela 3.6).

Figura E.25: Velocidades superficiais (Caso 2 da Tabela 3.6).

Figura E.26: Velocidades superficiais (Caso 3 da Tabela 3.6).

Figura E.27: Velocidades superficiais (Caso 4 da Tabela 3.6).

Figura E.28: Velocidades superficiais (Caso 22 da Tabela 3.6).

Figura E.29: Velocidades superficiais (Caso 23 da Tabela 3.6).

Figura E.30: Velocidades superficiais (Caso 24 da Tabela 3.6).

Por fim, alguns gráficos referentes a casos estáveis:

Figura E.31: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 8 da Tabela 3.6).

Figura E.32: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 14 da Tabela 3.6).

Figura E.33: Velocidades superficiais (Caso 8 da Tabela 3.6).

Figura E.34: Velocidades superficiais (Caso 14 da Tabela 3.6).

E.3 Inclinação do *pipeline*: +8 graus

Tabela E.3: Tabela de incertezas para o caso com *pipeline* a +8 graus.

Caso	$j_{g0}(m/s)$	Incerteza (m/s)	$j_{l0}(m/s)$	Incerteza (m/s)
1	0,054	0,006	0,178	0,002
2	0,053	0,006	0,151	0,002
3	0,053	0,006	0,123	0,001
4	0,054	0,006	0,110	0,001
5	0,056	0,006	0,096	0,001
6	0,053	0,006	0,082	0,001
7	0,052	0,006	0,069	0,001
8	0,055	0,006	0,055	0,001
9	0,044	0,006	0,055	0,001
10	0,043	0,006	0,069	0,001
11	0,044	0,006	0,082	0,001
12	0,043	0,006	0,096	0,001
13	0,043	0,006	0,110	0,001
14	0,043	0,006	0,123	0,001
15	0,042	0,006	0,151	0,002
16	0,041	0,006	0,178	0,002
17	0,033	0,006	0,178	0,002
18	0,032	0,006	0,151	0,002
19	0,032	0,006	0,123	0,001
20	0,033	0,006	0,110	0,001
21	0,033	0,006	0,096	0,001
22	0,034	0,006	0,082	0,001
23	0,031	0,006	0,069	0,001
24	0,033	0,006	0,055	0,001

A seguir são mostrados os gráficos restantes de flutuação de pressão para os casos ins-táveis:

Figura E.35: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 9 da Tabela 3.10).

Figura E.36: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 10 da Tabela 3.10).

Figura E.37: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 22 da Tabela 3.10).

Figura E.38: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 24 da Tabela 3.10).

A seguir são mostrados os gráficos de velocidades superficiais para os casos instáveis:

Figura E.39: Velocidades superficiais (Caso 9 da Tabela 3.10).

Figura E.40: Velocidades superficiais (Caso 10 da Tabela 3.10).

Figura E.41: Velocidades superficiais (Caso 22 da Tabela 3.10).

Figura E.42: Velocidades superficiais (Caso 23 da Tabela 3.10).

Figura E.43: Velocidades superficiais (Caso 24 da Tabela 3.10).

Por fim, alguns gráficos referentes a casos estáveis:

Figura E.44: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 3 da Tabela 3.10).

Figura E.45: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 16 da Tabela 3.10).

Figura E.46: Velocidades superficiais (Caso 3 da Tabela 3.10).

Figura E.47: Velocidades superficiais (Caso 16 da Tabela 3.10).

E.4 Inclinação do *pipeline*: +7 graus

Tabela E.4: Tabela de incertezas para o caso com *pipeline* a +7 graus.

Caso	$j_{g0}(m/s)$	Incerteza (m/s)	$j_{l0}(m/s)$	Incerteza (m/s)
1	0,053	0,006	0,055	0,001
2	0,052	0,006	0,069	0,001
3	0,054	0,006	0,082	0,001
4	0,052	0,006	0,096	0,001
5	0,054	0,006	0,110	0,001
6	0,054	0,006	0,123	0,001
7	0,054	0,006	0,151	0,002
8	0,054	0,006	0,178	0,002
9	0,046	0,006	0,055	0,001
10	0,046	0,006	0,069	0,001
11	0,046	0,006	0,082	0,001
12	0,044	0,006	0,096	0,001
13	0,044	0,006	0,110	0,001
14	0,044	0,006	0,123	0,001
15	0,046	0,006	0,151	0,002
16	0,045	0,006	0,178	0,002
17	0,034	0,006	0,178	0,002
18	0,034	0,006	0,151	0,002
19	0,034	0,006	0,123	0,001
20	0,033	0,006	0,110	0,001
21	0,034	0,006	0,096	0,001
22	0,035	0,006	0,082	0,001
23	0,035	0,006	0,069	0,001
24	0,034	0,006	0,055	0,001

A seguir é mostrado o gráfico restante de flutuação de pressão para o outro caso instável:

Figura E.48: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 24 da Tabela 3.14).

A seguir são mostrados os gráficos de velocidades superficiais para os casos instáveis:

Figura E.49: Velocidades superficiais (Caso 23 da Tabela 3.14).

Figura E.50: Velocidades superficiais (Caso 24 da Tabela 3.14).

Por fim, alguns gráficos referentes a casos estáveis:

Figura E.51: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 8 da Tabela 3.14).

$P (10^5 Pa)$

Figura E.52: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 14 da Tabela 3.14).

 $j (m/s)$

Figura E.53: Velocidades superficiais (Caso 8 da Tabela 3.14).

Figura E.54: Velocidades superficiais (Caso 14 da Tabela 3.14).

E.5 Inclinação do *pipeline*: +6 graus

Tabela E.5: Tabela de incertezas para o caso com *pipeline* a +6 graus.

Caso	$j_{g0}(m/s)$	Incerteza (m/s)	$j_{l0}(m/s)$	Incerteza (m/s)
1	0,053	0,006	0,055	0,001
2	0,052	0,006	0,069	0,001
3	0,052	0,006	0,082	0,001
4	0,052	0,006	0,096	0,001
5	0,053	0,006	0,110	0,001
6	0,053	0,006	0,123	0,001
7	0,051	0,006	0,151	0,002
8	0,054	0,006	0,178	0,002
9	0,043	0,006	0,055	0,001
10	0,042	0,006	0,069	0,001
11	0,043	0,006	0,082	0,001
12	0,043	0,006	0,096	0,001
13	0,041	0,006	0,110	0,001
14	0,043	0,006	0,123	0,001
15	0,043	0,006	0,151	0,002
16	0,042	0,006	0,178	0,002
17	0,033	0,006	0,178	0,002
18	0,032	0,006	0,151	0,002
19	0,032	0,006	0,123	0,001
20	0,032	0,006	0,110	0,001
21	0,032	0,006	0,096	0,001
22	0,032	0,006	0,082	0,001
23	0,033	0,006	0,069	0,001
24	0,033	0,006	0,055	0,001

A seguir é mostrado o gráfico de velocidades superficiais para o caso instável:

Figura E.55: Velocidades superficiais (Caso 24 da Tabela 3.18).

Por fim, alguns gráficos referentes a casos estáveis:

Figura E.56: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 5 da Tabela 3.18).

Figura E.57: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 11 da Tabela 3.18).

Figura E.58: Velocidades superficiais (Caso 5 da Tabela 3.18).

Figura E.59: Velocidades superficiais (Caso 11 da Tabela 3.18).

E.6 Inclinação do *pipeline*: +5 graus

Tabela E.6: Tabela de incertezas para o caso com *pipeline* a +5 graus.

Caso	$j_{g0}(m/s)$	Incerteza (m/s)	$j_{l0}(m/s)$	Incerteza (m/s)
1	0,032	0,006	0,055	0,001
2	0,041	0,006	0,096	0,001
3	0,031	0,006	0,096	0,001
4	0,030	0,006	0,110	0,001
5	0,031	0,006	0,069	0,001
6	0,031	0,006	0,082	0,001
7	0,032	0,006	0,123	0,001
8	0,031	0,006	0,151	0,002
9	0,030	0,006	0,178	0,002
10	0,041	0,006	0,055	0,001
11	0,041	0,006	0,069	0,001
12	0,041	0,006	0,082	0,001
13	0,042	0,006	0,110	0,001
14	0,041	0,006	0,123	0,001
15	0,040	0,006	0,151	0,002
16	0,040	0,006	0,178	0,002
17	0,050	0,006	0,055	0,001
18	0,051	0,006	0,069	0,001
19	0,051	0,006	0,082	0,001
20	0,052	0,006	0,096	0,001
21	0,051	0,006	0,110	0,001
22	0,052	0,006	0,123	0,001
23	0,050	0,006	0,151	0,002
24	0,050	0,006	0,178	0,002

A seguir é mostrado o gráfico de velocidades superficiais para o caso instável:

Figura E.60: Velocidades superficiais (Caso 1 da Tabela 3.19).

Por fim, alguns gráficos referentes a casos estáveis:

Figura E.61: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 5 da Tabela 3.19).

Figura E.62: Flutuação de pressão na base do *riser* (Caso 13 da Tabela 3.19).

Figura E.63: Velocidades superficiais (Caso 5 da Tabela 3.19).

Figura E.64: Velocidades superficiais (Caso 13 da Tabela 3.19).