

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Modelagem e Simulação de Escoamentos Multifásicos.
Aplicação à Intermitência Severa em
Sistemas de Produção de Petróleo

Natália Argene Lovate Pereira

São Paulo

2008

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Modelagem e Simulação de Escoamentos Multifásicos.
Aplicação à Intermitência Severa em
Sistemas de Produção de Petróleo

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Natália Argene Lovate Pereira

Orientador: Jorge Luis Baliño

Área de concentração
Engenharia Mecânica

São Paulo

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Pereira, Natália Argene Lovate

Modelagem e simulação de escoamentos multifásicos : aplicação à intermitência severa em sistemas de produção de petróleo / N.A.L. Pereira. - São Paulo, 2008.

57 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Intermitência Severa 2. Riser 3. Estabilidade 4. Petróleo 5. Escoamento multifásico 6. Sistemas de Produção I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Mecânica II.t.

AGRADECIMENTO

Agradeço à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e aos Professores, por estes cinco anos de exemplo, ensinamentos, dedicação e postura, que fizeram com que eu me tornasse a pessoa que sou hoje, especialmente por me formar Engenheira Politécnica.

Agradeço ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo auxílio ao projeto de iniciação científica, e à Petrobras (Petróleo Brasileiro S. A.) pela possibilidade de participar de projeto na área de desenvolvimento em tecnologia de exploração *offshore*.

Agradeço especialmente ao Professor Jorge Luis Baliño, pelo voto de confiança e oportunidade de trabalhar na sua equipe e também pela sua atenção e dedicação como meu orientador na Iniciação Científica e Trabalho de Formatura.

RESUMO

Este projeto tem como objetivo o estudo de modelos de escoamentos multifásicos utilizados em sistemas de produção de petróleo e sua aplicação a simulações do fenômeno de intermitência severa (*severe slugging*) utilizando um programa de dinâmica dos fluidos computacional.

Após estudo sobre o assunto, foram simulados e analisados diversos casos de escoamentos, baseados em uma configuração básica, onde variavam as vazões de gás e líquido no interior do *riser*, a pressão de separação, o tempo e o número de nós na simulação. O tempo de simulação foi determinado de maneira que o sistema atingisse a condição oscilatória permanente ou ciclo limite.

Foi possível classificar cada caso segundo seu tipo de estabilidade (estável, SS1, SS2 ou SS3) e então construir uma curva de estabilidade para a configuração de escoamento em questão. Além disso, foram calculados, para cada caso, alguns parâmetros que caracterizam o ciclo de intermitência severa. Tais parâmetros auxiliam na análise do comportamento da pressão na base do *riser* e na influência da vazão de gás no ciclo de intermitência.

ABSTRACT

The aim of this project is to study multiphase flow models used in crude oil production techniques and their application in simulating severe slugging phenomena with the aid of a computational fluid dynamics software.

After studying the topic, different flow cases were simulated and analyzed, based on a set configuration, where the gas and liquid flow rates inside the risers were modified, as was the separation pressure, the time and the number of nodes in the simulation. The simulation time was chosen in order to let the system reach the steady oscillatory condition or limit cycle

It was then possible to classify each case by its stability type (stable, SS1, SS2 or SS3) and then construct a stability curve for the individual flow configurations. In addition, for each case, certain parameters which characterize the severe slugging cycle were determined. Such parameters aid in analyzing the pressure behavior at the base of the risers and what influence the gas flow rate may have on the slugging cycle.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E METODOLOGIA	3
2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS - CICLO DE INTERMITÊNCIA SEVERA	3
2.2. VARIÁVEIS EM ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS UNIDIMENSIONAIS	6
2.3. O MODELO	7
2.3.1. <i>Características do Modelo.....</i>	<i>8</i>
2.3.2. <i>Programa Computacional</i>	<i>8</i>
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
3.1. PARÂMETROS QUE CARACTERIZAM OS CASOS A SEREM ANALISADOS	10
3.2. DADOS DE ENTRADA	11
3.3. DADOS DE SAÍDA	11
3.4. ANÁLISE DOS DADOS DE SAÍDA	12
3.4.1. <i>Severe Slugging 1, SS1</i>	<i>13</i>
3.4.2. <i>Severe Slugging 2, SS2</i>	<i>15</i>
3.4.3. <i>Severe Slugging 3, SS3</i>	<i>17</i>
3.4.4. <i>Estável</i>	<i>18</i>
3.5. CURVA DE ESTABILIDADE	19
3.6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS TEÓRICOS COM OS DADOS EXPERIMENTAIS	21
3.7. MAPAS DE ESTABILIDADE PARA DIFERENTES VALORES DE PRESSÃO DE SEPARAÇÃO	24
3.7.1. <i>Pressão de Separação 3 bar</i>	<i>24</i>
3.7.2. <i>Pressão de Separação 4 bar</i>	<i>26</i>
3.8. COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE ESTABILIDADE PARA DIFERENTES VALORES DE PRESSÃO DE SEPARAÇÃO	29
3.8. CURVAS DE DIFERENTES TIPO DE INSTABILIDADE.....	31
3.9. PARÂMETROS ADICIONAIS	35
3.10. ESTUDOS REALIZADOS COM RISERS VERTICAIS	39
3.10.1. <i>Análise do Programa Computacional – Convergência e Comparação com Dados Experimentais</i>	<i>39</i>
3.10.2. <i>Comparação dos Resultados com os Obtidos a Partir de Outros Modelos.....</i>	<i>43</i>
4. CONCLUSÕES	45
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Pontos teóricos na curva de estabilidade de 2 bar.	21
Tabela 2: Dados experimentais para 2 bar.....	22
Tabela 3: Pontos teóricos na curva de estabilidade de 3 bar.	24
Tabela 4: Dados experimentais para 3 bar.....	25
Tabela 5: Pontos teóricos na curva de estabilidade de 4 bar.	27
Tabela 6: Dados experimentais para 4 bar.....	27
Tabela 7: Pontos Teóricos na curva de Instabilidade SS2-SS3.....	33
Tabela 8: Pontos Teóricos na curva de Instabilidade SS1-SS2.....	33
Tabela 9: Dados Experimentais de Estabilidade.....	34
Tabela 10: Parâmetros temporais, caso $\dot{m}_{g0} = 1\text{E-}4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894\text{E-}3 \text{ m}^3/\text{s}$...	37
Tabela 11: Parâmetros temporais, caso $\dot{m}_{g0} = 1\text{E-}3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841\text{E-}3 \text{ m}^3/\text{s}$...	38
Tabela 12: Parâmetros temporais, caso $\dot{m}_{g0} = 4,5\text{E-}3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894 \text{ m}^3/\text{s}$	38
Tabela 13: Comparação de períodos do modelo com experimentais (Jansen, 1990).	42
Tabela 14: Comparação entre os períodos obtidos através dos diversos modelos.....	44
Tabela 15: Comparação entre os comprimentos de penetração obtidos através dos diversos modelos.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estado permanente de escoamento (Taitel, 1986).....	3
Figura 2: Formação do <i>slug</i> (<i>slug build-up</i>) (Taitel, 1986).....	4
Figura 3: Produção do <i>slug</i> (<i>slug production</i>) (Taitel, 1986).....	5
Figura 4: Penetração do gás (<i>bubble penetration</i>) (Taitel, 1986).	5
Figura 5: Despressurização do <i>pipeline</i> (<i>gas blowdown</i>) (Taitel, 1986).....	6
Figura 6: Pressão na base do <i>riser</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS1).....	13
Figura 7: Pressão do gás no <i>pipeline</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS1).....	14
Figura 8: Comprimento de penetração de líquido no <i>riser</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS1).....	14
Figura 9: Fração de vazio na base do <i>riser</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS1).....	15
Figura 10: Pressão na base do <i>riser</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 5E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS2).....	15
Figura 11: Comprimento de penetração de líquido no <i>pipeline</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 5E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS2).....	16
Figura 12: Fração de vazio na base do <i>riser</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 5E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS2).....	16
Figura 13: Pressão na base do <i>riser</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-3 \text{ kg/s}$ e para $Q_{l0} = 1,94841E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS3).....	17
Figura 14: Comprimento de penetração de líquido no <i>pipeline</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS3).....	17
Figura 15: Pressão na base do <i>riser</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 5E-3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 3,24735E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (estável).	18
Figura 16: Comprimento de penetração de líquido no <i>pipeline</i> para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 5E-3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 3,24735E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (estável).	18
Figura 17: Curva de estabilidade para $P_s = 2E5Pa$	20
Figura 18: Comparação dos dados teóricos com os experimentais para $P_s = 2E5Pa$	23
Figura 19: Comparação dos dados teóricos com os experimentais para $P_s = 3E5Pa$	26
Figura 20: Comparação dos dados teóricos com os experimentais para $P_s = 4E5Pa$	28

Figura 21: Curvas de estabilidade para pressão de separação de $2E5Pa$, $3E5Pa$ e $4E5Pa$	29
Figura 22: Curvas de estabilidade para pressão de separação de $2E5Pa$, $3E5Pa$ e $4E5Pa$	30
Figura 23: Curvas de diferentes tipos de instabilidade para $P_s = 2E5Pa$	32
Figura 24: Curvas de diferentes tipos de instabilidade e dados experimentais.....	35

1. INTRODUÇÃO

A grande maioria dos escoamentos que ocorrem na natureza e na tecnologia é do tipo multifásico. A ampla presença de escoamentos multifásicos mostra a necessidade de uma descrição geral para compreender seu comportamento. Em um escoamento multifásico, as diferentes fases são distinguíveis fisicamente umas das outras. Como dentro de cada fase podemos ter diferentes componentes e fenômenos turbulentos, a complexidade destes escoamentos é ainda maior. Além disso, a forma e posição das interfaces são desconhecidas.

As diferenças de velocidades entre as fases e a sua geometria (configuração) têm uma influência tão grande sobre o comportamento do escoamento, que servem de base para a classificação dos possíveis regimes. A direção do escoamento em relação à gravidade e as propriedades físicas das fases (densidade, viscosidade e tensão superficial) também influenciam tal comportamento.

Os objetivos do projeto apresentado são:

- Estudo de modelos de escoamento multifásicos utilizados em sistemas de produção de petróleo;
- Estudo de técnicas de discretização espacial e temporal e utilização de *software* para simulação de transientes em escoamentos multifásicos;
- Estudo de modelos de intermitência severa;
- Aplicação de modelos de escoamentos multifásicos para simulação de transientes de intermitência severa.

1.1. Justificativa

Nos sistemas de produção de petróleo, o fluido que sai do meio poroso possui gás em solução e vem acompanhado de gás livre e água, dificultando a determinação de parâmetros simples como o gradiente de pressão na coluna de elevação. Neste tipo de exploração, os mecanismos de transporte do fluido tendem a ser condutos bem

compridos até as plataformas e, assim, o aumento da profundidade dos poços apresenta desafios particulares para a garantia do escoamento.

O padrão de escoamento mais freqüente é o intermitente, em golfada ou *slug*, caracterizado por uma distribuição axial intermitente de gás e líquido. O gás é transportado como bolhas entre golfadas de líquido. O padrão em golfadas pode mudar em determinadas condições geométricas e de escoamento e originar um fenômeno indesejável, conhecido como intermitência severa ou golfada severa (*severe slugging*). Tal fenômeno ocorre geralmente num ponto com uma cota baixa na topografia do conduto, por exemplo, em um trecho de tubulação descendente seguido de um trecho ascendente ou *riser*.

Uma situação típica é que o líquido se acumula no fundo do *riser*, bloqueando a passagem de gás e iniciando um ciclo de golfada de longo período. Os pré-requisitos para que isto aconteça são pressões e vazões baixas, tipicamente quando o poço já tem um tempo importante de exploração.

A intermitência severa está associada a grandes oscilações de pressão e problemas de dimensionamento nas unidades de separação na plataforma, provocando sua saída de serviço e consideráveis perdas econômicas. Em particular, a empresa Petrobras tem reportado vários casos de golfadas severas nos sistemas linha-*riser*.

Além dos aspectos técnicos específicos da proposta de trabalho, existem justificativas e motivações institucionais importantes. Uma delas é a necessidade de formar um grupo de trabalho na área de escoamento multifásico, com o objetivo de aplicar os conhecimentos específicos em problemas tecnológicos associados a sistemas de produção de petróleo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E METODOLOGIA

2.1. Fundamentos teóricos - Ciclo de Intermitência Severa

O fenômeno denominado intermitência severa é dominado pela topografia na qual escoo o fluido e pode ocorrer em sistemas multifásicos quando um trecho de conduto descendente é seguido por outro trecho ascendente (*riser*).

Na operação em estado permanente, existem oscilações moderadas das variáveis associadas ao padrão de escoamento intermitente. Em determinadas condições (baixas vazões das fases), o escoamento pode sofrer uma instabilidade, na qual a fase líquida bloqueia de maneira prolongada a entrada de gás, estabelecendo-se uma operação cíclica com períodos grandes (da ordem de horas). A intermitência severa origina grandes oscilações nas variáveis e grandes volumes intermitentes de líquido e gás, inutilizando os sistemas de separação.

A Figura 1 mostra o comportamento das fases no estado permanente de escoamento.

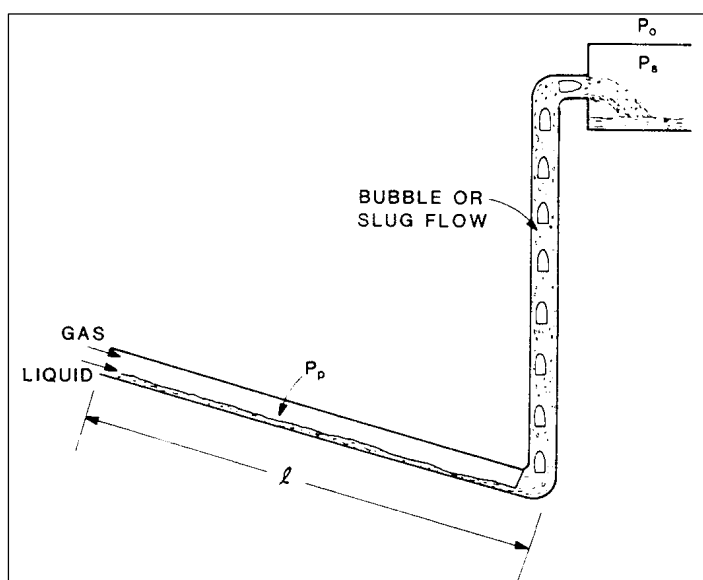


Figura 1: Estado permanente de escoamento (Taitel, 1986).

Uma vez que o sistema se desestabiliza e a passagem de gás fica bloqueada na base do *riser*, o líquido continua entrando e o gás existente no *riser* continua saindo. Como consequência, a coluna do *riser* se torna mais pesada e a pressão na base aumenta, comprimindo o gás no *pipeline* e criando uma região de acumulação de líquido.

Quando o nível de líquido atinge o topo do *riser* enquanto a passagem de gás permanece bloqueada, a pressão na base atinge seu valor máximo e há somente líquido escoando no *riser*. Como o gás continua entrando no *pipeline*, em certo instante a frente de líquido é puxada de volta até que atinge a base do *riser*, recomeçando a etapa de penetração de gás.

O ciclo de intermitência severa é dividido em quatro estágios característicos.

2.1.1. Tempo de formação do slug (*slug build-up time*, T_1): é o tempo transcorrido entre o instante em que a base do *riser* é bloqueada com líquido e o instante em que não existe gás no *riser* e o nível do líquido atinge o topo (ver Figura 2).

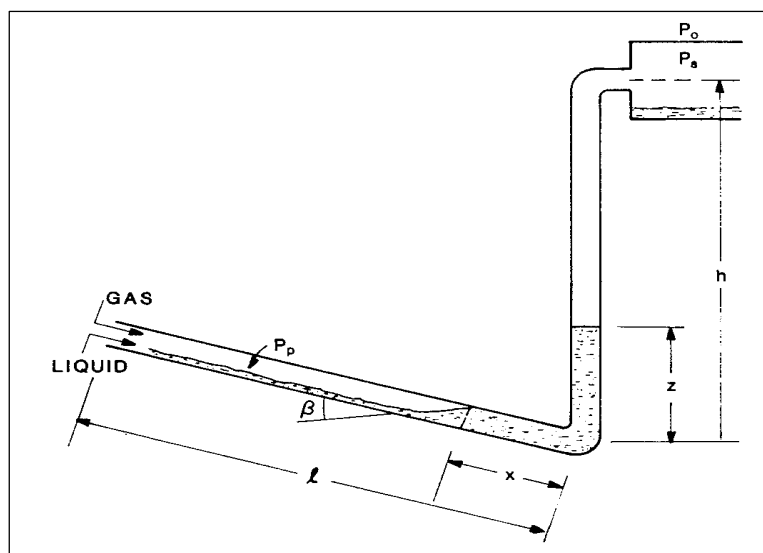


Figura 2: Formação do slug (*slug build-up*) (Taitel, 1986).

2.1.4 Tempo de despressurização do *pipeline* (gas blowdown time, T4): é o tempo transcorrido entre o instante final do T3 e o instante inicial do T1. Neste período, existe passagem livre de gás no *riser* e uma rápida despressurização do *pipeline* (ver Figura 5).

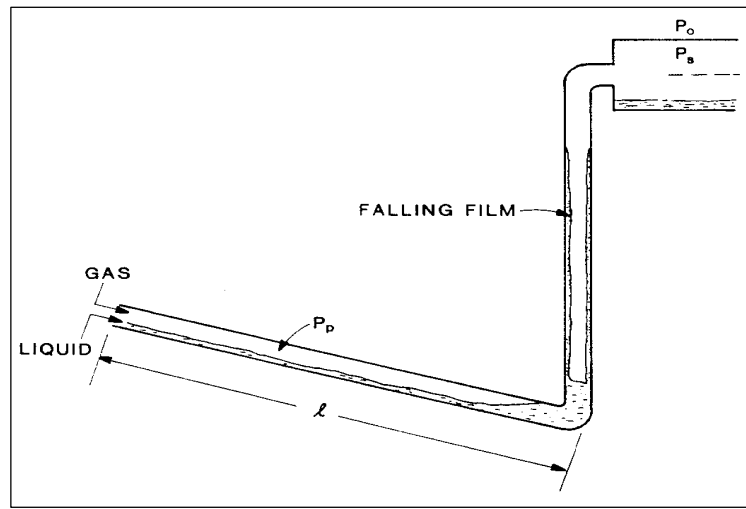


Figura 5: Despressurização do *pipeline* (gas blowdown) (Taitel, 1986).

2.2. Variáveis em Escoamentos Multifásicos Unidimensionais

Para o estudo do escoamento de fluidos multifásicos, são definidas algumas variáveis particulares (Wallis, 1969; Whalley, 1996).

Comprimento de penetração de líquido no *pipeline* (x): comprimento de *pipeline* cheio de líquido quando todo o *riser* está tomado pela fase líquida.

Fração de vazio (void fraction α): fração da área de passagem ocupada pela fase gasosa.

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad ; \quad A = A_f + A_g \quad ; \quad 1 - \alpha = \frac{A_f}{A} \quad (i)$$

onde A_g e A_f são as áreas de passagem das fases gasosa e líquida, respectivamente, e A é a área da seção do *riser*.

Velocidades médias das fases (u_g e u_f):

$$u_g = \frac{W_g}{\rho_g \cdot A_g} ; \quad u_f = \frac{W_f}{\rho_f \cdot A_f} \quad (\text{ii})$$

onde ρ_g e ρ_f são as densidades das fases gasosa e líquida, respectivamente, e W_g e W_f são as vazões mássicas das fases gasosa e líquida, respectivamente.

Velocidade superficial ou fluxo volumétrico j : vazão volumétrica por unidade de área.

$$j = \frac{Q}{A} \quad (\text{iii})$$

onde Q é a vazão volumétrica total.

Velocidades superficiais ou fluxos volumétricos das fases (j_g e j_f):

$$j_g = \frac{Q_g}{A} ; \quad j_f = \frac{Q_f}{A} \quad (\text{iv})$$

Onde Q_g e Q_f são as vazões volumétricas das fases gasosa e líquida, respectivamente.

Com base nessas definições, demonstra-se que:

$$j_g = u_g \cdot A ; \quad j_f = u_f \cdot A \quad (\text{v})$$

2.3. O modelo

Neste projeto, é analisado o comportamento do escoamento no interior de um *riser* de geometria catenária, e o fluido é considerado bifásico, ou seja, existe uma fase gasosa

e uma líquida. As simulações são realizadas utilizando-se um programa de dinâmica de fluidos computacional, escrito na linguagem Fortran.

2.3.1. Características do Modelo

O modelo desenvolvido (Baliño, 2006; Baliño *et al.*, 2007; Baliño *et al.*, 2008) considera os seguintes subsistemas:

- Tanque pulmão de gás e conduto descendente, com um padrão de escoamento estratificado. Este padrão de escoamento pode acontecer no comprimento total do conduto ou até a posição correspondente ao comprimento de penetração de líquido. Desta maneira, o conduto descendente pode se encontrar em dois estados: penetração contínua de gás ou não penetração de gás;
- *Riser*, considerado como um sistema bifásico de parâmetros distribuídos, onde se desprezam a inércia e o atrito e se utiliza um modelo de fluxo de deriva (*drift flux*) como lei de fechamento. Como característica deste sistema, é modelado o nível de líquido variável;
- Região de gás no topo do *riser*, na condição na qual o *riser* não está cheio (o nível de líquido não atinge o topo).

As características do modelo permitem simular uma grande variedade de dados experimentais encontrados na literatura para sistemas água-ar e, em particular, o caso de *riser* em catenária.

2.3.2. Programa Computacional

O programa utilizado na simulação dos casos está escrito em linguagem Fortran e é utilizado o método das características para resolver as equações de conservação, com um esquema implícito e preditor-corretor para o tratamento das não linearidades. A condição inicial para o programa dinâmico é a solução de estado estacionário do problema.

O esquema de cálculo está baseado na iteração da velocidade superficial no último nó do *riser*, de maneira de atingir convergência nas pressões e frações de vazio. O esquema pode ser resumido como segue:

- Define-se a discretização espacial (número de nós) e calcula-se o estado permanente, o qual é considerado sempre como condição inicial para os transientes;
- Determinam-se o passo temporal baseado nas velocidades do gás nos nós do *riser*, a posição e a velocidade da superfície de líquido;
- Recalculam-se as novas posições dos nós depois do deslocamento com a velocidade de gás;
- Considerando todas as variáveis no passo K+1 iguais às do passo K, é necessário garantir a continuidade entre o *pipeline* e o *riser*. É importante notar que o *pipeline* pode mudar o estado durante o passo temporal, de maneira que foi montado um esquema de resolução para contemplar esta possibilidade;
- Atualizam-se os valores calculados e volta-se a conferir se todas as variáveis no passo K+1 são iguais às do passo K, até atingir-se convergência global.

O programa foi desenvolvido como parte de um projeto mais amplo em parceria com a empresa Petrobras. No atual projeto, foram feitos apenas rodagem do programa e na análise dos dados de saída.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Parâmetros que caracterizam os casos a serem analisados

Os parâmetros a seguir caracterizam os casos a serem analisados e são utilizados no programa de simulação.

- Densidade do líquido (kg/m^3): 1.00000E+03;
- Aceleração da gravidade (m/s^2): 9.80000E+00;
- Constante do gás ($m^2/s^2/K$): 2.87000E+02;
- Temperatura do gás (K): 2.98000E+02;
- Comprimento do *pipeline* (m): 5.74000E+01;
- Comprimento equivalente *buffer* do *pipeline* (m): 0.0;
- Diâmetro interior do *pipeline* e do *riser* (m): 5.25018E-02;
- Rugosidade do *pipeline* (m): 4.60000E-05;
- Ângulo de inclinação do *pipeline* (graus sexagesimais): 2.00;
- Constante da válvula de estrangulamento (-): 0.00000E+00;
- Altura do *riser* em catenária (m): 9.88600E+00;
- Abcissa do *riser* em catenária (m): 6.43500E+00;
- Constante da catenária (m): 3.01818E+00;
- Comprimento do *riser* (m): 1.25463E+01;
- Tolerância de convergência (-): 1.00000E-06;
- Fator de sub-relaxamento (-): 2.00000E-01;
- Tempo do passo de referência (s): 1.00000E+02;
- Referência total do passo de velocidade superficial (m/s): 1.00000E-01.

3.2. Dados de entrada

Os dados de entrada são:

- Vazão volumétrica de líquido (m^3/s);
- Vazão mássica de gás (kg/s);
- Pressão absoluta de separação (Pa);
- Tempo de simulação (s);
- Número de nós.

Inicialmente são simulados alguns casos principais, considerando a pressão absoluta de separação de $2E5 Pa$ (2 bar), com as vazões mássicas de gás de: $1E-4$, $5E-4$, $1E-3$, $5E-3$ e $1E-2 kg/s$. Estes valores possuem nomenclaturas especiais para maior organização dos dados. São M14, M54, M13, M53 e M12, respectivamente.

As vazões volumétricas de líquido principais são: $0,064947E-3$; $0,108245E-3$; $0,1623675E-3$; $0,21649E-3$; $0,64947E-3$; $1,29894E-3$; $1,94841E-3$; $3,24735E-3$ e $5,41225E-3 m^3/s$. Suas nomenclaturas especiais são W1 a W9, respectivamente.

O tempo de simulação adotado é $1500 s$, mas em casos que demoram mais para convergir este tempo é aumentado de acordo com a necessidade. O número de nós adotado é 151, mas em casos com menor vazão mássica de gás este número é aumentado para 251 ou até mais, de maneira a diminuir as oscilações numéricas.

3.3. Dados de saída

As saídas são dois arquivos. Um deles, MAIN_RESULTS.OUT, apresenta uma tabela com a evolução temporal de um conjunto de variáveis principais: pressão no topo do *riser*, pressão na base do *riser*, comprimento de penetração do líquido no *pipeline*, velocidade superficial do fluido na base, velocidade superficial do gás na base, velocidade superficial do líquido na base, fração de vazio na base, altura da fronteira de líquido no *riser*, altura da coluna de fluido no *riser*, fração de vazio no topo do *riser*,

velocidade superficial do fluido no topo, velocidade superficial do gás no topo, velocidade superficial do líquido no topo.

O segundo arquivo, SLUGGING.OUT, lista os dados básicos e um conjunto de parâmetros geométricos e correspondentes ao estado permanente.

3.4. Análise dos dados de saída

Da análise dos dois arquivos .OUT em conjunto, é possível plotar gráficos das variáveis principais em função do tempo e, assim, obter o comportamento do escoamento no interior do *riser*.

É possível também, a partir desta análise, classificar o regime de escoamento segundo sua estabilidade. Assim, ele pode ser considerado estável ou instável, sendo que existem ainda três tipos de instabilidade, SS1, SS2 e SS3, as quais são apresentadas a seguir (Wordsworth *et al.*, 1998):

Severe Slugging 1, SS1: a pressão no *riser* atinge um valor máximo e permanece por um tempo nesta condição, o que é evidenciado por patamares nestes valores nos gráficos de pressão. Isto se deve ao fato de que o *riser* está todo cheio de líquido e, portanto, sob a condição de máxima pressão. Por este motivo também o comprimento de penetração de líquido é maior que zero ($x > 0$), ou seja, devido a essa pressão máxima, a frente de líquido penetra pelo *pipeline* de um comprimento x .

Severe Slugging 2, SS2: o *riser* ainda se apresenta todo cheio de líquido ($x > 0$), no entanto, a pressão não atinge um valor máximo ou então, tão logo o atinge, já ocorre penetração de gás pelo *riser* e a pressão cai. Assim, não se forma patamar nos gráficos de pressão.

Severe Slugging 3, SS3: o comprimento de penetração de líquido vale zero ($x = 0$), ou seja, não é atingido o valor máximo de pressão no *riser*, pois este nunca estará totalmente cheio de líquido. No entanto, nem todas as variáveis são constantes com o tempo.

Estável: todo o conjunto de variáveis é constante no tempo.

Na sequência são apresentados alguns gráficos para ilustrar cada um dos casos acima apresentados.

3.4.1. *Severe Slugging 1, SS1*

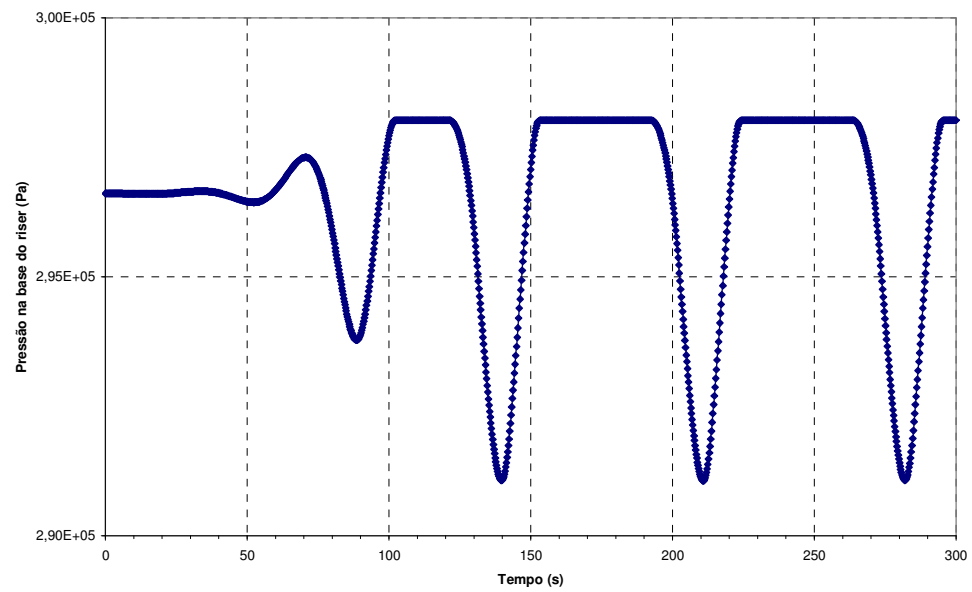


Figura 6: Pressão na base do *riser* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS1).

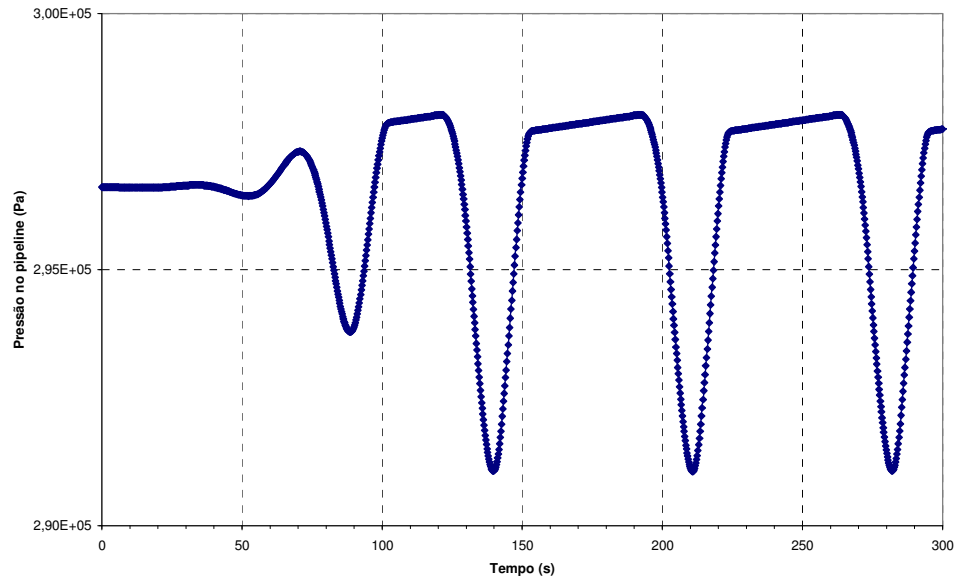


Figura 7: Pressão do gás no *pipeline* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894E-3 \text{ m}^3/s$ (SS1).

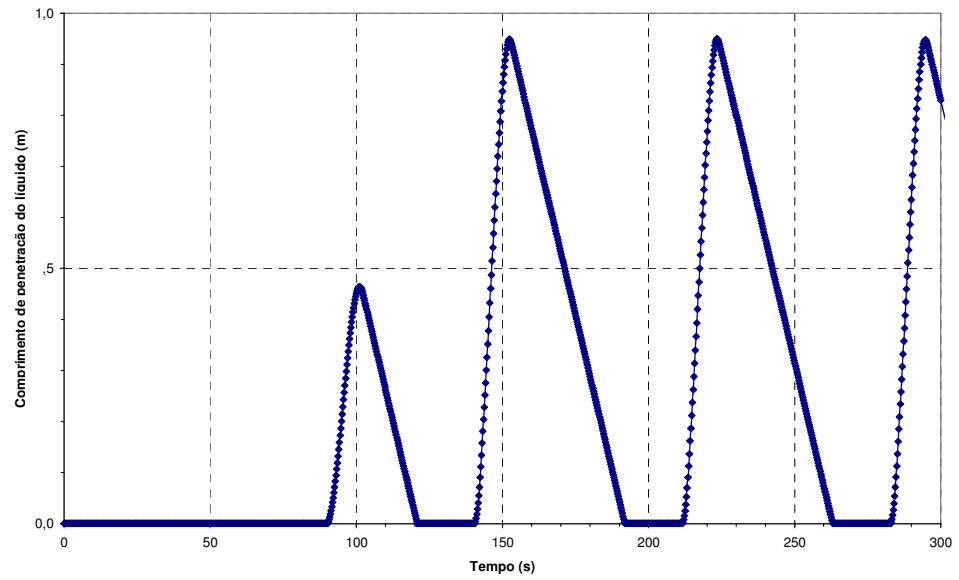


Figura 8: Comprimento de penetração de líquido no *riser* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894E-3 \text{ m}^3/s$ (SS1).

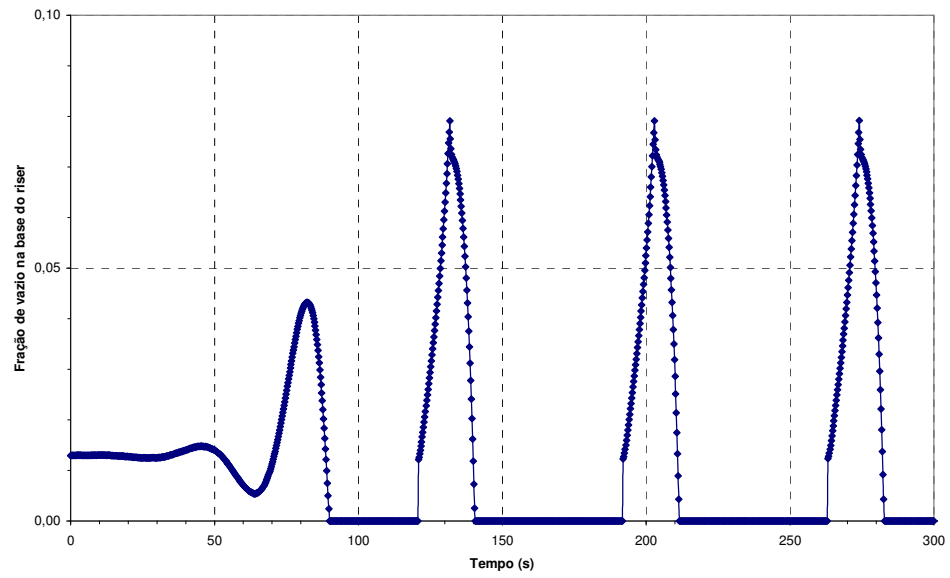


Figura 9: Fração de vazio na base do *riser* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894E-3 \text{ m}^3/s$ (SS1).

3.4.2. Severe Slugging 2, SS2

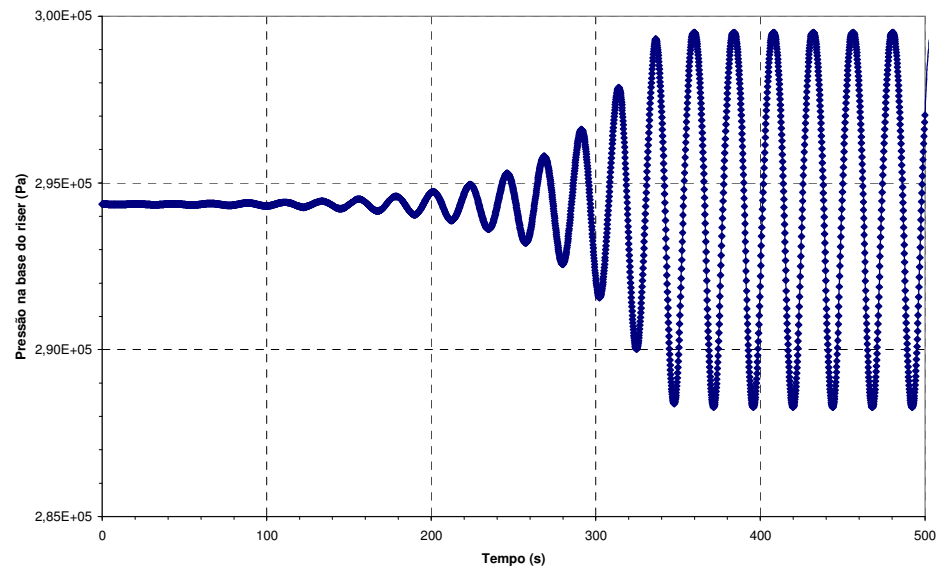


Figura 10: Pressão na base do *riser* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 5E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841E-3 \text{ m}^3/s$ (SS2).

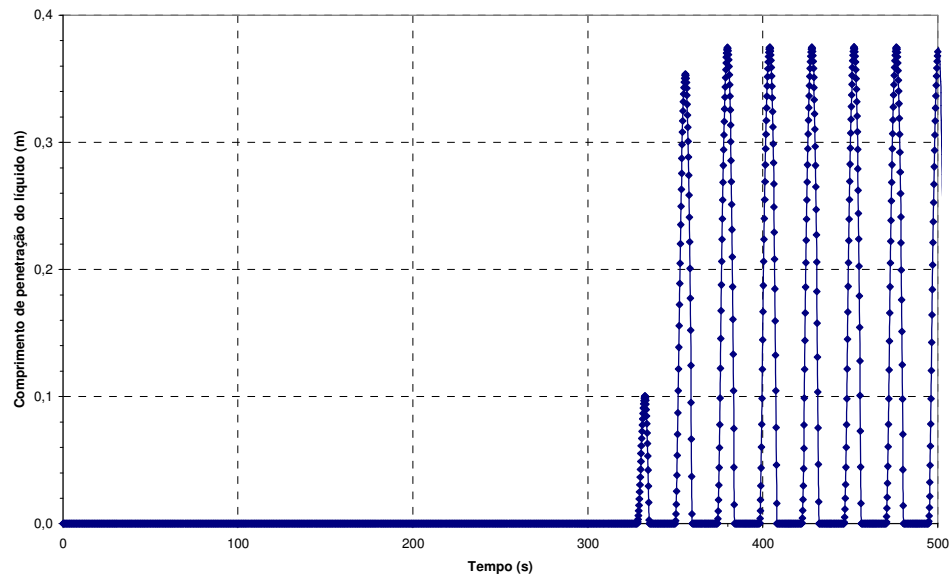


Figura 11: Comprimento de penetração de líquido no *pipeline* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 5E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS2).

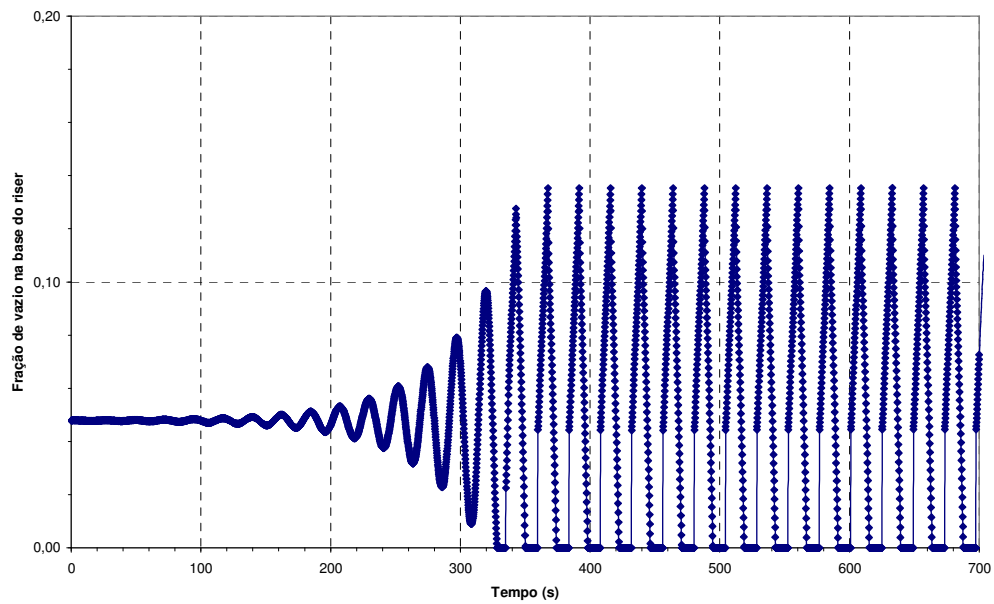


Figura 12: Fração de vazio na base do *riser* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 5E-4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ (SS2).

3.4.3. Severe Slugging 3, SS3

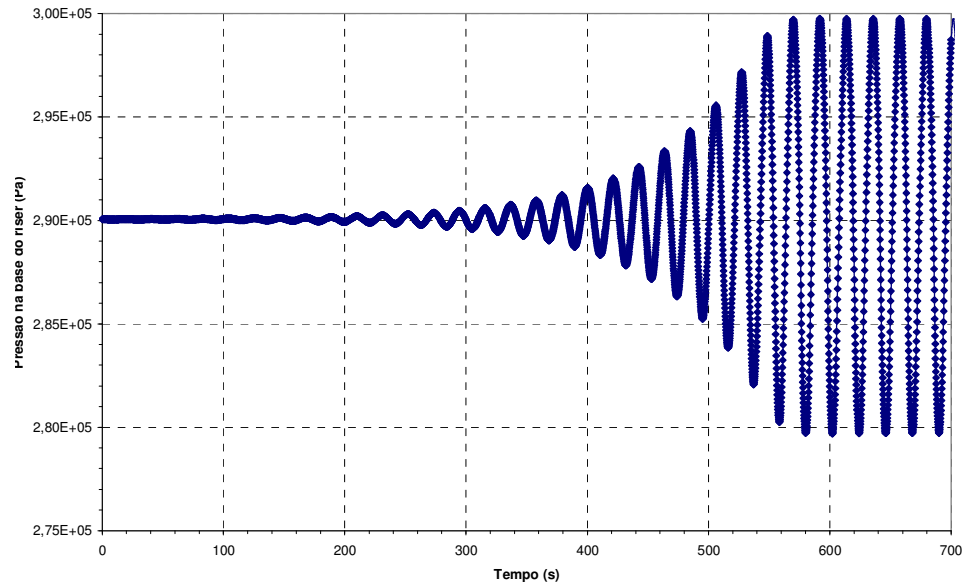


Figura 13: Pressão na base do *riser* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-3 \text{ kg/s}$ e para $Q_{l0} = 1,94841E-3 \text{ m}^3/s$ (SS3).

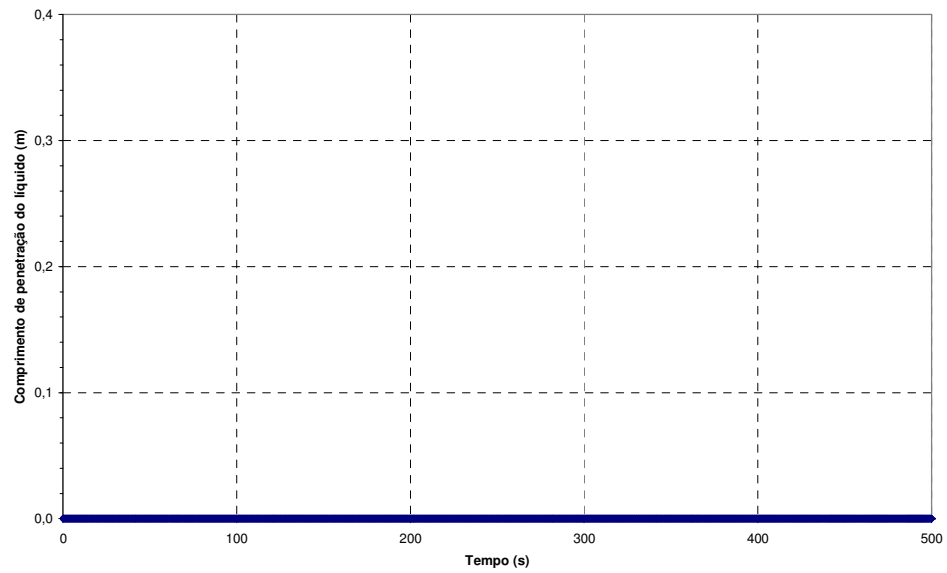


Figura 14: Comprimento de penetração de líquido no *pipeline* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 1E-3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841E-3 \text{ m}^3/s$ (SS3).

3.4.4. Estável

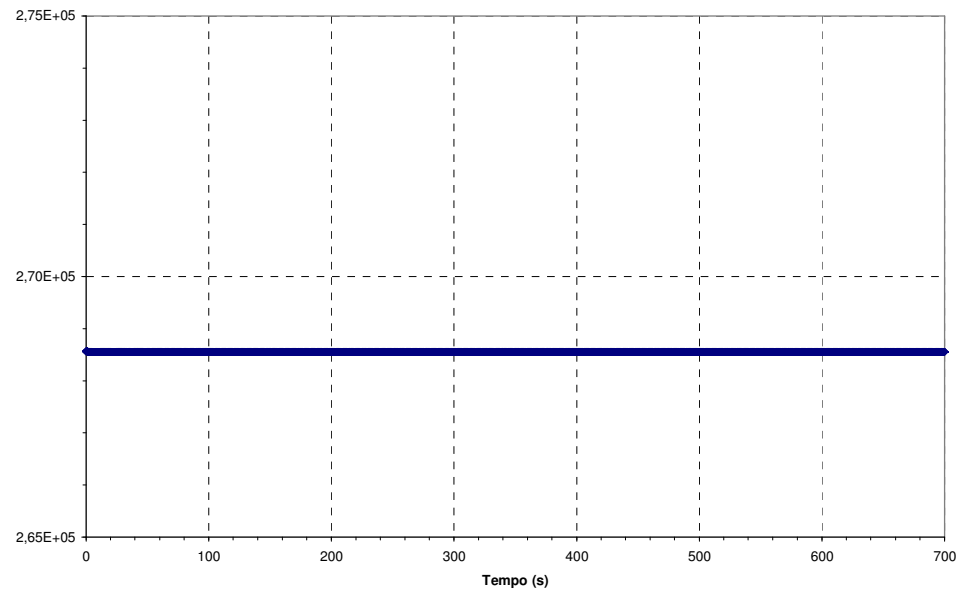


Figura 15: Pressão na base do *riser* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 5E-3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 3,24735E-3 \text{ m}^3/s$ (estável).

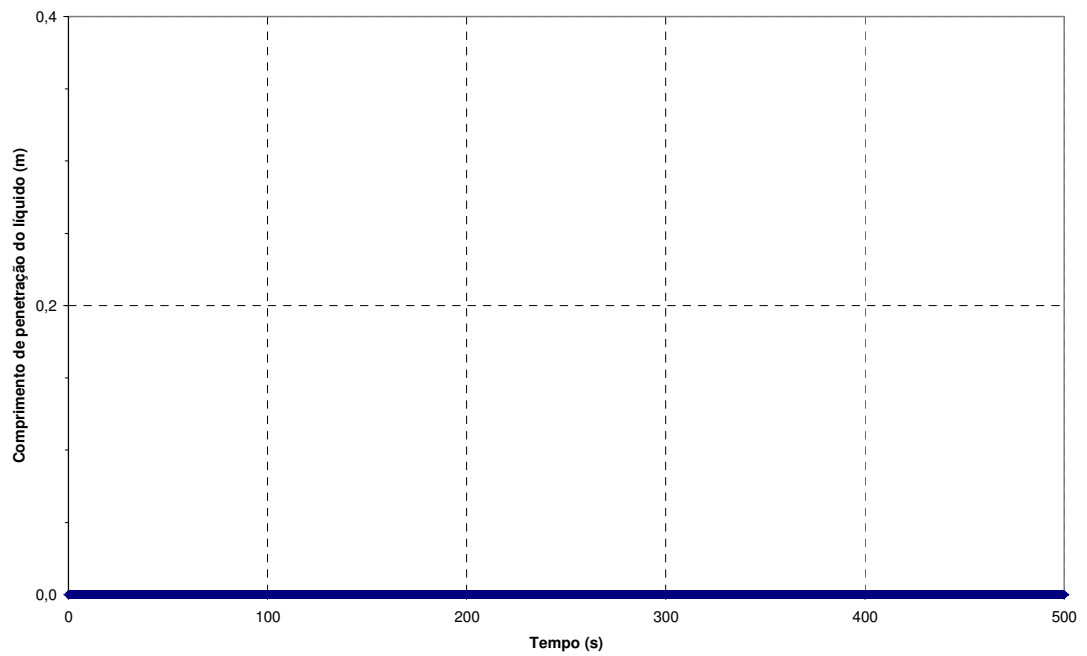


Figura 16: Comprimento de penetração de líquido no *pipeline* para $P_s = 2E5Pa$, $\dot{m}_{g0} = 5E-3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 3,24735E-3 \text{ m}^3/s$ (estável).

3.5. Curva de Estabilidade

Classificados os casos segundo sua estabilidade, é possível construir um mapa de estabilidade e observar que existem regiões estáveis, regiões SS1, SS2 e SS3. Pode-se, portanto, construir uma curva de estabilidade, que determina a separação entre a região dos casos estáveis e a dos casos instáveis.

Para a construção da curva foram encontrados 13 pontos nela contidos e, então, fez-se interpolação entre eles. Para se chegar a cada um desses pontos foi adotado o método da bissecção, partindo-se dos casos principais simulados, até que se alcançasse uma precisão de 5% na sua localização, quer dizer o erro relativo resultou $\frac{\Delta \dot{m}_g}{\dot{m}_g} \leq 0,05$.

Inicialmente, a vazão de líquido foi fixada em alguns valores principais (W1 a W9, apresentados no item 3.2) e variou-se a vazão mássica de gás até que o ponto de limite de estabilidade fosse encontrado. Assim, o erro na determinação destes pontos está vinculado à vazão mássica de gás unicamente. A seguir, para um melhor refinamento da curva em regiões mais complicadas, foram calculados alguns pontos fixando-se a vazão mássica de gás e variando-se a vazão de líquido.

Para se chegar aos 13 pontos que definem a curva, foram necessárias 106 simulações, a fim de se alcançar a precisão desejada.

Os resultados são apresentados na Figura 17 em vazão volumétrica de líquido por vazão mássica de gás, $\dot{m}_{g0} \times Q_{l0}$, ambos na escala logarítmica. A região acima e à direita da curva contém os casos estáveis. A região abaixo e à esquerda da curva conta com os casos de instabilidade SS1, SS2 e SS3.

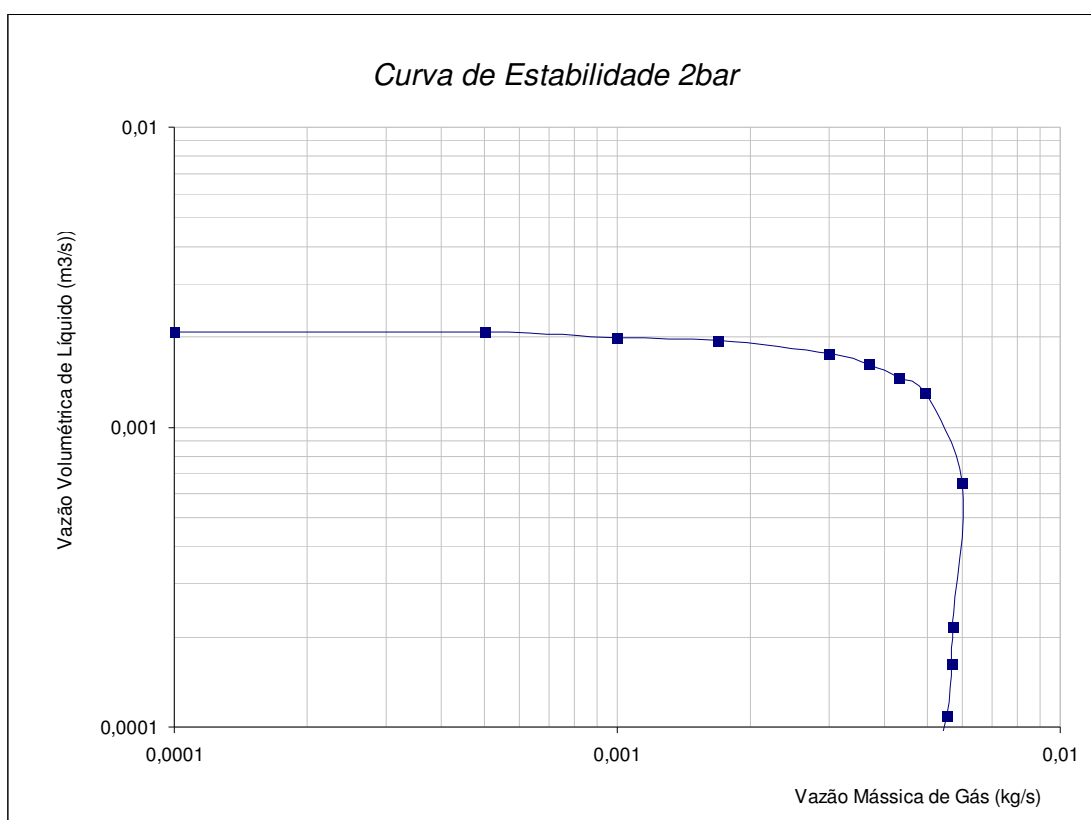


Figura 17: Curva de estabilidade para $P_s = 2E5Pa$.

Tabela 1: Pontos teóricos na curva de estabilidade de 2 bar.

$\dot{m}_{g0}$ (kg/s)	Q_{l0} (m ³ /s)
1,0000E-04	2,0702E-03
5,0000E-04	2,0702E-03
1,0000E-03	1,9890E-03
1,6875E-03	1,9484E-03
3,0000E-03	1,7657E-03
3,6875E-03	1,6237E-03
4,3125E-03	1,4613E-03
4,9375E-03	1,2989E-03
6,0156E-03	6,4947E-04
5,7031E-03	2,1649E-04
5,6836E-03	1,6237E-04
5,5469E-03	1,0825E-04
4,9375E-03	6,4947E-05

3.6. Comparação dos Resultados Teóricos com os Dados Experimentais

Para observar a validade desta curva de estabilidade, os resultados obtidos são comparados com os dados experimentais fornecidos pela empresa CALTec para a Petrobras (Wordsworth *et al.*, 1998). Para o caso de pressão de separação de 2E5 Pa, os dados obtidos experimentalmente são os apresentados a seguir na Tabela 2.

Tabela 2: Dados experimentais para 2 bar.

$\dot{m}_{g0}$ (kg/s)	Q_{l0} (m ³ /s)	Classificação
7,71E-04	2,22E-04	SS1 (círculo)
5,20E-04	2,84E-04	SS1 (círculo)
5,01E-04	5,66E-04	SS1 (círculo)
8,41E-04	1,14E-03	SS1 (círculo)
1,37E-03	3,43E-04	SS3 (triângulo)
1,97E-03	5,96E-04	SS3 (triângulo)
2,65E-03	2,12E-04	SS3 (triângulo)
2,62E-03	2,28E-04	SS3 (triângulo)
3,33E-03	6,10E-04	SS3 (triângulo)
4,35E-03	4,00E-04	SS3 (triângulo)
4,93E-03	6,26E-04	SS3 (triângulo)
9,25E-04	3,01E-03	Slug - Plug (cruz)
5,20E-03	1,18E-03	Slug - Plug (cruz)
8,19E-03	1,18E-03	Slug - Plug (cruz)
1,46E-02	1,78E-03	Slug - Plug (cruz)
7,19E-04	1,65E-03	Osc (traço)
2,02E-03	1,16E-03	Osc (traço)
1,88E-03	1,83E-03	Osc (traço)
3,32E-03	1,17E-03	Osc (traço)
3,49E-03	1,82E-03	Osc (traço)
7,45E-03	6,49E-04	Trans (quadrado)

Os dados fornecidos pelo sistema de aquisição (vazão volumétrica de gás e de líquido na condição de injeção, temperatura e pressão de injeção em função do tempo) tiveram de ser manipulados para se chegar à vazão mássica de gás e vazão volumétrica de líquido nos mesmos formatos adotados neste projeto. Foi necessário calcular a média

destes valores e também a vazão mássica de gás a partir da sua vazão volumétrica e relação de gás ideal.

A classificação dos dados experimentais apresenta algumas diferenças em relação à classificação adotada neste projeto. *Slug - Plug* corresponde ao caso estável, os casos *Osc* e *Trans* correspondem a casos indefinidos, próximos à curva de estabilidade tanto na região estável como na instável.

Na Figura 18 os dados experimentais são apresentados juntamente com a curva de estabilidade.

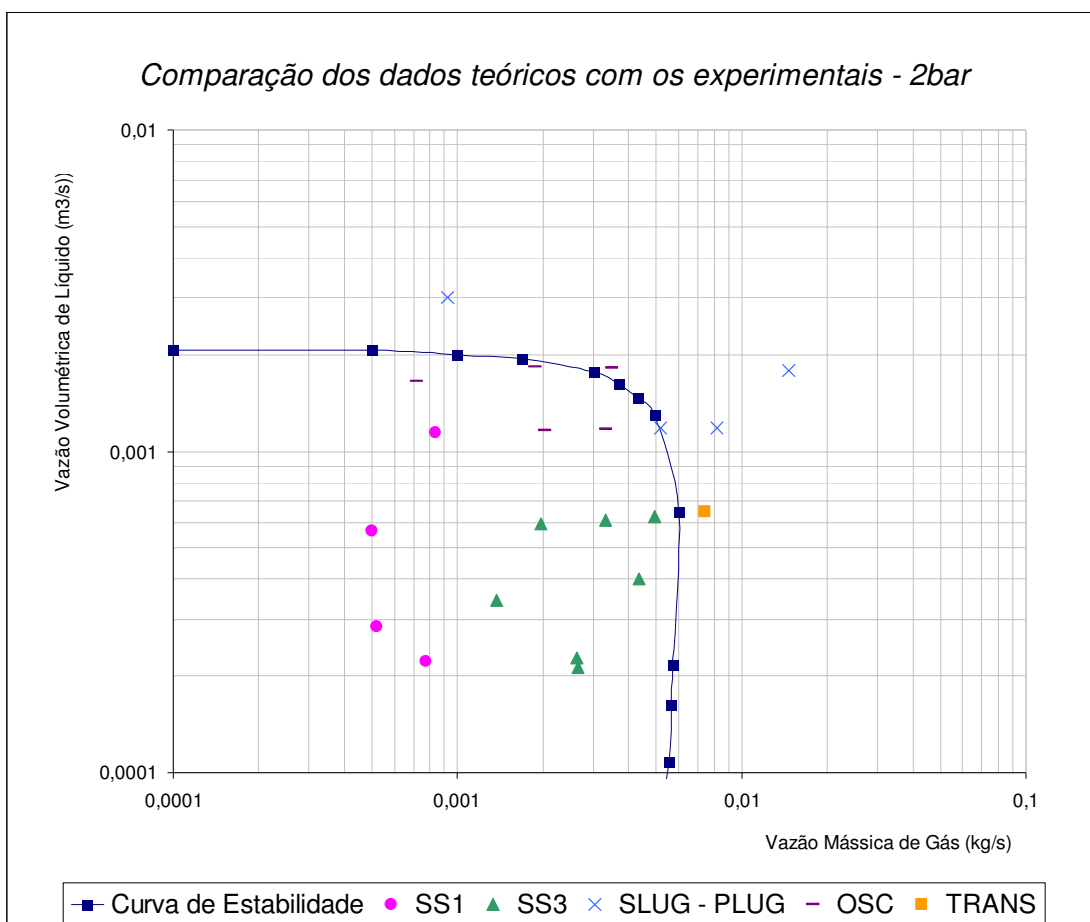


Figura 18: Comparação dos dados teóricos com os experimentais para $P_s = 2E5Pa$.

3.7. Mapas de Estabilidade para Diferentes Valores de Pressão de Separação

Variando-se o valor da pressão de separação, é possível construir novos mapas de estabilidade. O método para obtenção da curva e comparação com os resultados experimentais é idêntico ao apresentado anteriormente.

3.7.1. Pressão de Separação 3 bar

Foram rodados 45 casos para se chegar aos 11 pontos principais da curva de estabilidade, que foram, então, interpolados. Os pontos principais são mostrados na Tabela 3, enquanto os dados experimentais fornecidos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 3: Pontos teóricos na curva de estabilidade de 3 bar.

$\dot{m}_{g0}$ (kg/s)	Q_{l0} (m ³ /s)
1,00E-04	1,68E-03
5,00E-04	1,65E-03
1,00E-03	1,58E-03
2,03E-03	1,46E-03
2,69E-03	1,30E-03
4,19E-03	9,74E-04
5,06E-03	6,49E-04
4,94E-03	2,16E-04
4,81E-03	1,62E-04
4,81E-03	1,08E-04
4,69E-03	6,49E-05

Tabela 4: Dados experimentais para 3 bar.

$\dot{m}_{g0}$ (kg/s)	Q_{10} (m ³ /s)	Classificação
2,82E-04	6,28E-04	SS1 (losango)
5,37E-04	1,98E-04	SS1 (losango)
6,11E-04	6,28E-04	SS1 (losango)
1,03E-03	2,18E-04	SS2 (triângulo)
8,27E-04	2,77E-04	SS2 (triângulo)
2,16E-03	3,03E-04	SS2 (triângulo)
2,61E-03	6,49E-04	SS2 (triângulo)
4,27E-03	6,80E-04	SS2 (triângulo)
1,71E-03	2,28E-04	SS3 (cruz)
3,74E-03	3,26E-04	SS3 (cruz)
1,17E-03	1,81E-03	SF-BB (traço)
1,41E-03	2,98E-03	SF-BB (traço)
6,32E-03	1,83E-03	SF-BB (traço)
8,96E-04	5,66E-04	SS (círculo grande)
9,51E-04	1,23E-03	SS (círculo grande)
2,43E-03	1,32E-03	Osc (círculo)
1,76E-03	2,12E-03	Osc (círculo)
4,17E-03	1,40E-03	Osc (círculo)
5,64E-03	6,42E-04	Osc (círculo)
9,25E-03	6,74E-04	Osc (círculo)

Novamente, a classificação apresenta diferenças em relação à adotada neste projeto. SF-BB corresponde a casos estáveis e SS são casos instáveis.

A curva de estabilidade juntamente com os pontos experimentais é apresentada a na Figura 19.

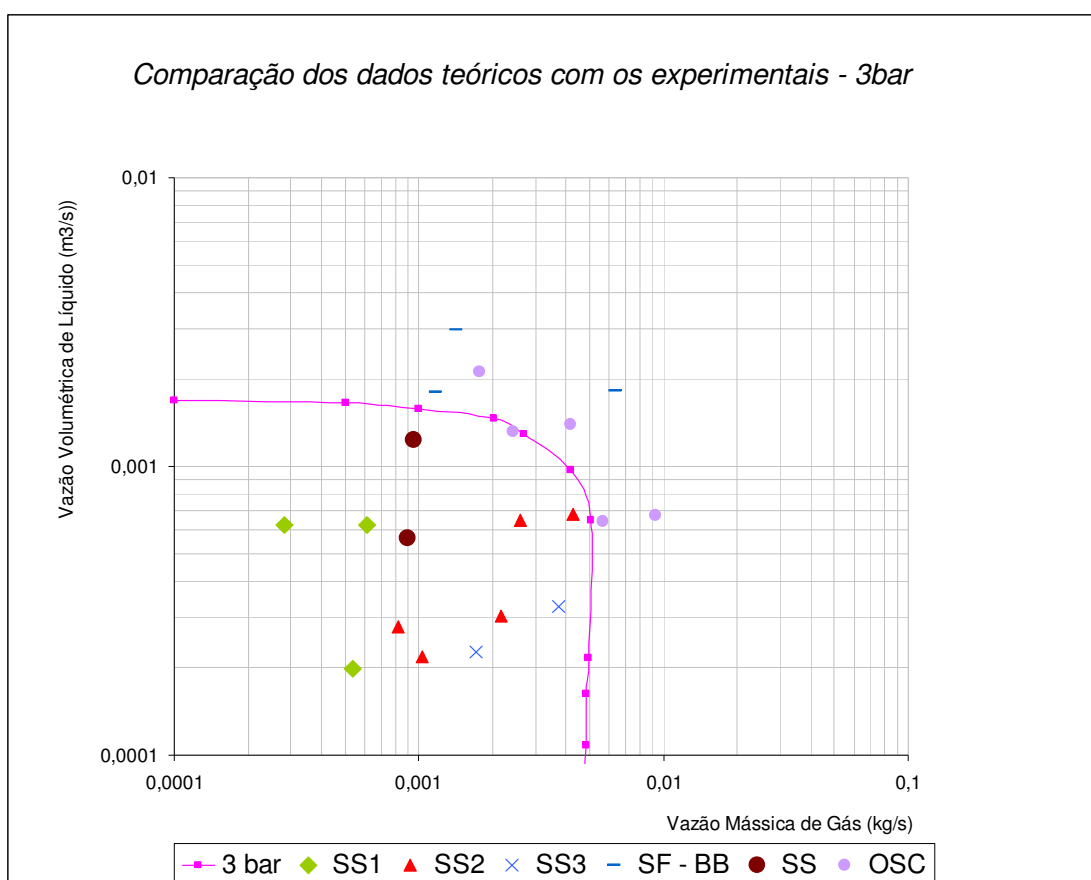


Figura 19: Comparação dos dados teóricos com os experimentais para $P_s = 3E5Pa$.

3.7.2. Pressão de Separação 4 bar

Foram rodados 41 casos para se chegar aos 9 pontos principais da curva de estabilidade, que foram, então, interpolados. Os pontos principais são mostrados na Tabela 5 e os dados experimentais fornecidos são mostrados na Tabela 6.

Tabela 5: Pontos teóricos na curva de estabilidade de 4 bar.

$\dot{m}_{g0}$ (kg/s)	Q_{l0} (m ³ /s)
3,69E-03	6,49E-05
3,81E-03	1,08E-04
3,94E-03	1,62E-04
3,94E-03	2,16E-04
3,56E-03	6,49E-04
2,47E-03	9,74E-04
1,53E-03	1,14E-03
5,00E-04	1,24E-03
1,00E-04	1,28E-03

Tabela 6: Dados experimentais para 4 bar.

$\dot{m}_{g0}$ (kg/s)	Q_{l0} (m ³ /s)	Classificação
2,77E-03	2,87E-04	SS3 (círculo)
2,77E-03	2,86E-04	SS3 (círculo)
1,15E-03	2,88E-04	SS3 (círculo)
1,71E-03	6,46E-04	SS3 (círculo)
4,80E-03	2,86E-04	Osc (quadrado)
5,40E-03	1,28E-03	Osc (quadrado)
3,30E-03	1,30E-03	Osc (quadrado)
1,06E-03	1,29E-03	Osc (quadrado)
3,22E-03	6,53E-04	Osc (quadrado)
5,58E-03	6,51E-04	Osc (quadrado)
8,11E-03	6,54E-04	Osc (quadrado)
1,39E-03	1,79E-03	BB (traço)
8,65E-03	1,29E-03	Trans (triângulo)

A curva de estabilidade juntamente com os pontos experimentais é apresentada na Figura 20.

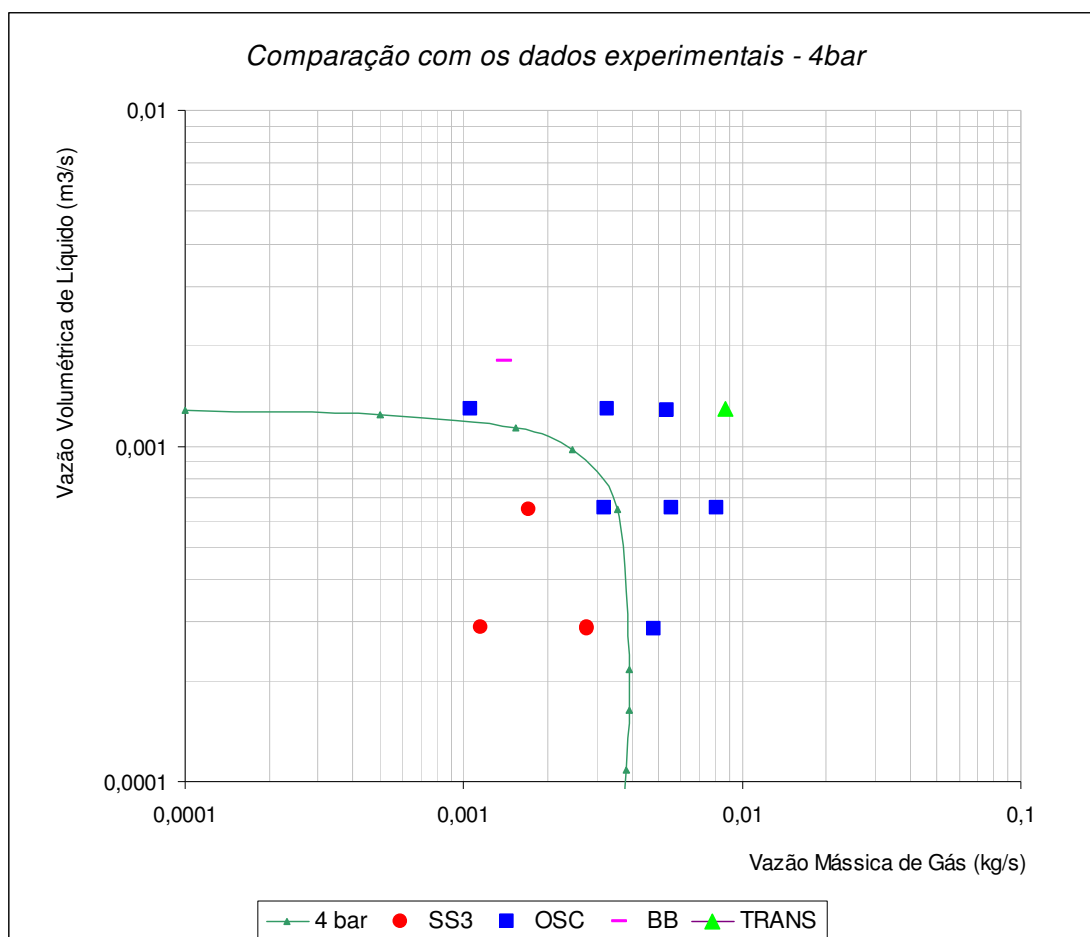


Figura 20: Comparação dos dados teóricos com os experimentais para $P_s = 4E5 Pa$.

Os resultados obtidos para os três valores de pressão são muito satisfatórios qualitativamente, uma vez que as curvas de estabilidade correspondem aos dados experimentais. Estes resultados validam, além das curvas construídas, o programa computacional utilizado nas simulações.

3.8. Comparação entre as Curvas de Estabilidade para Diferentes Valores de Pressão de Separação

As curvas de estabilidade podem ser apresentadas em um único diagrama, como na Figura 21. Assim, é possível analisar a influência da pressão de separação na estabilidade do escoamento analisado.

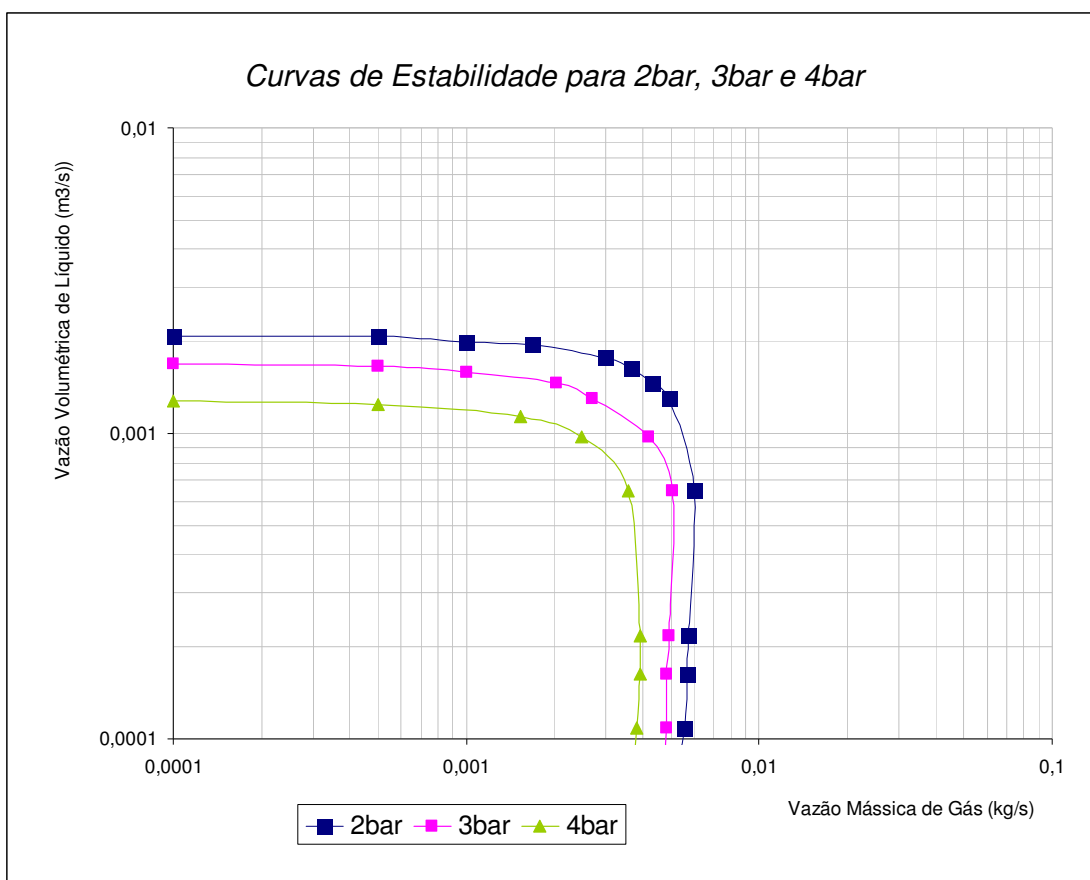


Figura 21: Curvas de estabilidade para pressão de separação de $2E5Pa$, $3E5Pa$ e $4E5Pa$.

Aumentando-se a pressão de separação, aumenta-se a região de estabilidade do escoamento. E as curvas de estabilidade possuem o mesmo formato.

Esta conclusão é também apresentada nos relatórios baseados em dados experimentais fornecidos pela Petrobras.

Na Figura 22 são representadas as curvas de estabilidade dispostas em três dimensões. As variáveis nos eixos são: vazão mássica de gás ($\dot{m}_{g0}$ em kg/s), vazão volumétrica de líquido (Q_{l0} em m^3/s) e pressão de separação (P_s em Pa). O gráfico foi construído utilizando-se o programa MATLAB (Matsumoto, 2001).

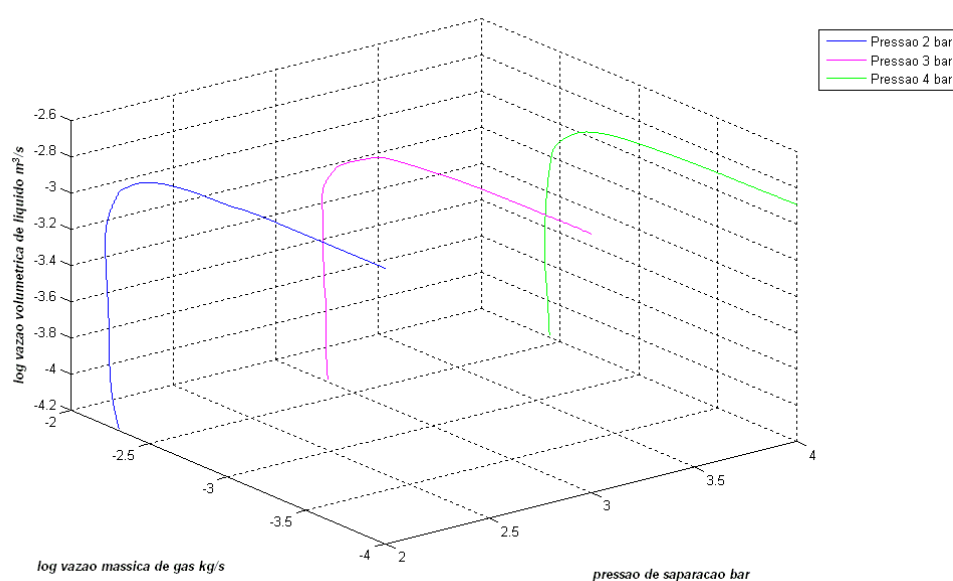


Figura 22: Curvas de estabilidade para pressão de separação de $2E5Pa$, $3E5Pa$ e $4E5Pa$.

3.8. Curvas de diferentes tipo de Instabilidade

Para completar o estudo sobre a estabilidade do escoamento multifásico em *risers* de geometria catenária, foram traçadas as curvas que separam as diferentes regiões de instabilidade, SS1, SS2 e SS3, considerando pressão de separação de 2 *bar*.

Para a construção destas curvas foram encontrados 15 pontos contidos na curva de separação entre as regiões SS2 e SS3 (curva SS2-SS3) e 14 pontos contidos na curva de separação entre as regiões SS1 e SS2 (curva SS1-SS2). Fez-se, então, interpolação entre os pontos pertencentes a uma mesma curva. Para se chegar a cada um desses pontos foi adotado o método da bissecção, até que se alcançasse uma precisão de 5% na sua localização.

Como na construção das curvas de estabilidade, inicialmente, a vazão de líquido foi fixada em alguns valores principais e variou-se a vazão mássica de gás até que o ponto de limite de instabilidade fosse encontrado. Assim, o erro na determinação destes pontos está vinculado à vazão mássica de gás unicamente. A seguir, para um melhor refinamento da curva em regiões mais complicadas, foram calculados alguns pontos fixando-se a vazão mássica de gás e variando-se a vazão de líquido.

Para se chegar aos 29 pontos que definem as duas curvas de separação entre as regiões instáveis foram necessárias 119 simulações, a fim de se alcançar a precisão desejada.

Os resultados são apresentados na Figura 23 em vazão volumétrica de líquido por vazão mássica de gás, $\dot{m}_{g0} \times Q_{l0}$, ambos na escala logarítmica. Nas tabelas 7 e 8 são apresentados os pontos calculados para as diferentes transições.

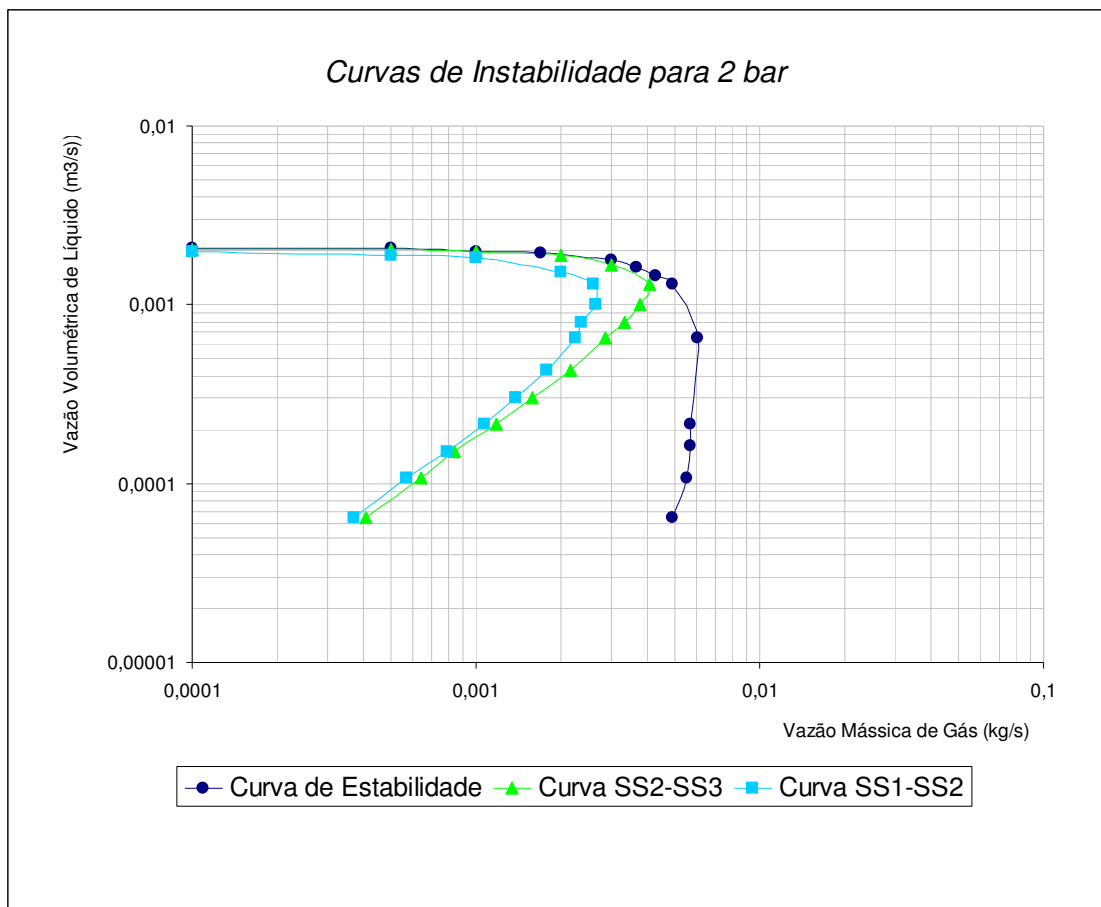


Figura 23: Curvas de diferentes tipos de instabilidade para $P_s = 2E5Pa$.

Tabela 7: Pontos Teóricos na curva de Instabilidade SS2-SS3.

Curva SS2-SS3	
$\dot{m}_{g0}$ (kg/s)	Q_{l0} (m ³ /s)
1,00E-04	2,05E-03
5,00E-04	2,05E-03
1,00E-03	1,98E-03
2,00E-03	1,88E-03
3,00E-03	1,68E-03
4,1000E-03	1,2989E-03
3,8000E-03	1,0000E-03
3,3500E-03	8,0000E-04
2,8500E-03	6,4947E-04
2,1500E-03	4,3000E-04
1,5800E-03	3,0000E-04
1,1750E-03	2,1649E-04
8,4000E-04	1,5000E-04
6,4000E-04	1,0825E-04
4,1000E-04	6,4947E-05

Tabela 8: Pontos Teóricos na curva de Instabilidade SS1-SS2.

Curva SS1-SS2	
$\dot{m}_{g0}$ (kg/s)	Q_{l0} (m ³ /s)
1,00E-04	1,98E-03
5,00E-04	1,90E-03
1,00E-03	1,83E-03
2,00E-03	1,53E-03
2,6000E-03	1,2989E-03
2,6500E-03	1,0000E-03
2,3500E-03	8,0000E-04
2,2500E-03	6,4947E-04
1,7800E-03	4,3000E-04
1,3800E-03	3,0000E-04
1,0750E-03	2,1649E-04
7,9000E-04	1,5000E-04
5,7000E-04	1,0825E-04
3,7000E-04	6,4947E-05

Para observar a validade destas curvas de instabilidade, os resultados obtidos são comparados com os dados experimentais fornecidos pela empresa CALTec para a Petrobras (Wordsworth *et al.*, 1998). Para o caso de pressão de separação de 2E5 Pa, os dados obtidos experimentalmente são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Dados Experimentais de Estabilidade.

$\dot{m}_{g0}$ (kg/s)	Q_{l0} (m ³ /s)	Classificação
7,7100E-04	2,2200E-04	SS1 (círculo)
5,2000E-04	2,8400E-04	SS1 (círculo)
5,0100E-04	5,6600E-04	SS1 (círculo)
8,4100E-04	1,1400E-03	SS1 (círculo)
1,3700E-03	3,4300E-04	SS3 (triângulo)
1,9700E-03	5,9600E-04	SS3 (triângulo)
2,6500E-03	2,1200E-04	SS3 (triângulo)
2,6200E-03	2,2800E-04	SS3 (triângulo)
3,3300E-03	6,1000E-04	SS3 (triângulo)
4,3500E-03	4,0000E-04	SS3 (triângulo)
4,9300E-03	6,2600E-04	SS3 (triângulo)
9,2500E-04	3,0100E-03	Slug-Plug (cruz)
5,2000E-03	1,1800E-03	Slug-Plug (cruz)
8,1900E-03	1,1800E-03	Slug-Plug (cruz)
1,4600E-02	1,7800E-03	Slug-Plug (cruz)
7,1900E-04	1,6500E-03	OSC (traço)
2,0200E-03	1,1600E-03	OSC (traço)
1,8800E-03	1,8300E-03	OSC (traço)
3,3200E-03	1,1700E-03	OSC (traço)
3,4900E-03	1,8200E-03	OSC (traço)
7,4500E-03	6,4900E-04	TRANS (quadrado)

Novamente, os dados fornecidos tiveram de ser manipulados para se chegar à vazão mássica de gás e vazão volumétrica de líquido nos mesmos formatos adotados neste projeto.

Na Figura 24, os dados experimentais são apresentados juntamente com a curva de estabilidade.

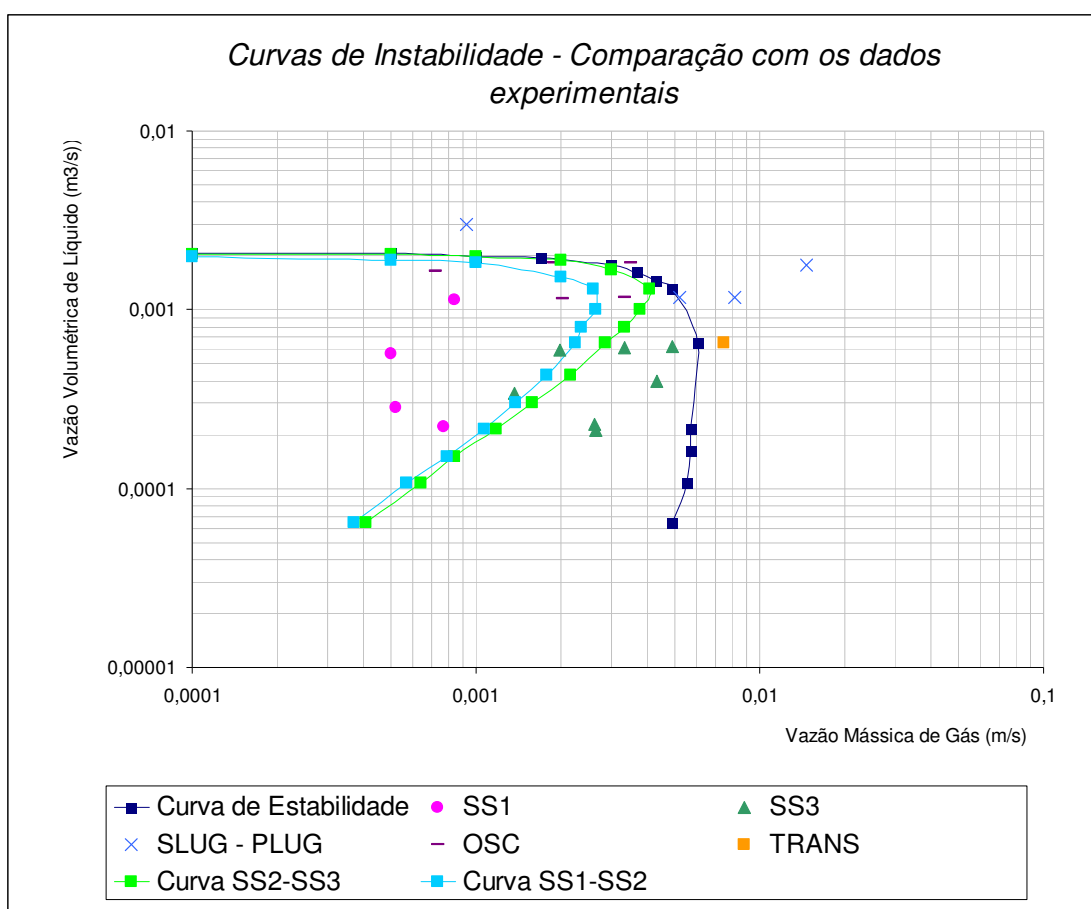


Figura 24: Curvas de diferentes tipos de instabilidade e dados experimentais.

Os resultados obtidos são muito satisfatórios qualitativamente, uma vez que as curvas de instabilidade correspondem aos dados experimentais. Estes resultados validam, além das curvas construídas, o programa computacional utilizado nas simulações.

3.9. Parâmetros Adicionais

Podem-se também calcular alguns parâmetros básicos que caracterizam o ciclo de intermitência severa, ou seja, formação, produção, penetração das bolhas de gás e posterior despressurização do *pipeline* (que já foram apresentados no item 2.1.). Calcula-

se, ainda, o comprimento de intermitência severa e a pressão média na base do *riser*. Tais parâmetros são calculados baseado no arquivo MAIN_RESULTS.OUT, que resulta da simulação. Basta observar os ciclos de repetição da fração de vazio na base α_{rb} e topo do *riser* α_{ru} .

- T1 (s), tempo de formação do *slug* (*slug build-up time*):

De $\alpha_{rb} = 0$ e $s_u = s_t$ até $\alpha_{ru} = 0$;

- T2 (s), tempo de produção do *slug* (*slug production time*):

De $\alpha_{rb} = 0$ até $\alpha_{rb} \neq 0$;

- T3 (s), tempo de penetração do gás (*bubble penetration time*):

De $\alpha_{rb} \neq 0$ até $\alpha_{ru} \neq 0$;

- T4 (s), tempo de despressurização do *pipeline* (*gas blowdown time*):

De $\alpha_{ru} \neq 0$ até $\alpha_{rb} = 0$;

- $T = T_f - T_i$ (s), período do ciclo;

- Pressão média na base: $\bar{p}_b = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_b \cdot dt$. OBS: calcula-se pressão média em

cada par de pontos em todo um ciclo, somam-se os termos e então se divide o resultado pelo tempo total do ciclo;

- Comprimento de intermitência severa: $S_L = \bar{j}_{lu} \cdot tempo$, desde $\alpha_{ru} = 0$ até $\alpha_{ru} \neq 0$ no mesmo ciclo. OBS: em cada dois pontos de medida tira-se $\bar{j}_{lu}$ e multiplica-se pelo Δt , somam-se todos os termos e então se divide o resultado pelo tempo total do ciclo.

Pode-se mostrar que, mantendo constante a vazão de líquido, o período do ciclo diminui com a vazão mássica de gás. Além disso, nota-se que a pressão média na base do *riser* resulta maior que a pressão calculada no estado permanente (quando o tempo é igual a zero), apresentada no arquivo MAIN_RESULTS.OUT. Disto resultam perdas de produção em intermitência severa, o que é indesejável.

Casos SS1 e alguns SS2 possuem estes parâmetros muito bem definidos. Para o caso $\dot{m}_{g0} = 1\text{E-}4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894\text{E-}3 \text{ m}^3/\text{s}$, a pressão média na base vale $2,98\text{E+}05 \text{ Pa}$ e o comprimento de intermitência severa vale $6,22\text{E-}01 \text{ m}$. Na Tabela 10 são apresentadas as durações dos tempos T1 a T4.

Tabela 10: Parâmetros temporais, caso $\dot{m}_{g0} = 1\text{E-}4 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894\text{E-}3 \text{ m}^3/\text{s}$.

TEMPO	DURAÇÃO (s)
T1	12,0
T2	39,4
T3	10,9
T4	8,9
T (total)	71,2

Casos SS3 e alguns casos SS2 não possuem todos esses parâmetros definidos. No caso $\dot{m}_{g0} = 1\text{E-}3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841\text{E-}3 \text{ m}^3/\text{s}$, T2 e T3 foram unificados, pois o instante de limite entre eles não existe. Assim, é necessário adaptar os cálculos. Neste caso, a pressão média vale $2,92\text{E+}05 \text{ Pa}$ e o comprimento de penetração $1,22\text{E+}00 \text{ m}$. As durações dos tempos do ciclo são mostradas na Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros temporais, caso $\dot{m}_{g0} = 1\text{E-}3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,94841\text{E-}3 \text{ m}^3/\text{s}$.

TEMPO	DURAÇÃO (s)
T1	8,2
T2 T3	0,5
T4	13,3
T (total)	22,0

Para $\dot{m}_{g0} = 4,5\text{E-}3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894 \text{ m}^3/\text{s}$, nenhum tempo intermediário pode ser definido (ou eles resultam todos iguais a zero), já que existe penetração contínua de gás na base do *riser*. Assim, há necessidade de adaptar os cálculos novamente. Então, T1 foi considerado o ponto onde se atingiu a menor pressão na base e T2 o ponto onde se atingiu uma menor pressão novamente. A pressão média ainda pode ser calculada e vale $2,66\text{E+}05 \text{ Pa}$, mas o comprimento de *slug* é igual a zero. Os tempos do ciclo são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros temporais, caso $\dot{m}_{g0} = 4,5\text{E-}3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894 \text{ m}^3/\text{s}$.

TEMPO	DURAÇÃO (s)
T1	1,16E+03
T2	1,18E+03
T (total)	19,4

Em casos estáveis obviamente não é possível realizar esses cálculos, uma vez que não ocorre ciclo, todos os parâmetros são estáveis.

3.10. Estudos Realizados com *Risers* Verticais

A seguir são apresentados alguns estudos de convergência do programa computacional utilizado neste projeto. Também é feita uma comparação entre os dados obtidos neste estudo com os obtidos a partir de outros modelos e os experimentais.

Este tipo de estudo foi realizado considerando *risers* verticais, porque existem mais dados na literatura referentes a esta geometria do que à catenária.

3.10.1. Análise do Programa Computacional – Convergência e Comparação com Dados Experimentais

O programa computacional utilizado neste projeto simula escoamentos multifásicos em *risers* para gás e líquido sem transferência de massa.

Para que seja validado, o programa deve satisfazer o critério de convergência, ou seja, a solução deve tender a um valor limite quando é aumentada a discretização espacial (número de nós). Além disso, o modelo deve ser suficientemente detalhado para que represente com a melhor aproximação a realidade que simula. Esta representação da realidade pode ser avaliada por meio de uma comparação com dados experimentais.

A análise de convergência e a comparação com dados experimentais são apresentadas nos próximos itens.

3.10.1.1. Casos Analisados

Os casos aqui analisados levam em conta alguns parâmetros fixos e outros variáveis. Os parâmetros fixos caracterizam a instalação, o escoamento e as condições do experimento simulado, e estão apresentados a seguir.

- Viscosidade do gás ($kg/m/s$): 1.8E-5;
- Viscosidade do líquido ($kg/m/s$): 1.E-3;
- Massa específica do líquido (kg/m^3): 1.E3;
- Aceleração da gravidade (m/s^2): 9.8E0;
- Constante do gás ($m^2/s^2/K$): 2.87E2;
- Temperatura absoluta do gás (K): 2.98E2;
- Comprimento do *pipeline* descendente (m): 9.14E0;
- Comprimento equivalente de conduto *buffer* (m): 9.5E0;
- Diâmetro interno do *pipeline* (m): 2.54E-2;
- Rugosidade do conduto do *pipeline* e do *riser* (m): 2.0E-5;
- Ângulo de inclinação do *pipeline*, em graus sexagesimais (grad): 1.0E0;
- Índice de geometria do *riser* IGEOMRISER: 1 (vertical);
- Altura do topo do *riser* (m): 3.0E0;
- Ângulo constante do *riser* (grad): 90;
- Pressão absoluta de separação (Pa): 1.0D5;
- Fator de convergência: 1.D-6;
- Fator de sub-relaxamento: 0.1D0.

Os parâmetros variáveis são as velocidades superficiais das fases líquida e gasosa j_{l0} e j_{g0} e nodalização N considerada na simulação. Os valores dessas variáveis utilizados foram os mesmos presentes na literatura, especialmente nos estudos de Taitel (1986) e Sarica & Shoham (1991), para que os resultados fossem comparados.

Os resultados obtidos das simulações, utilizados nas comparações, são o período de intermitência severa (T_{ciclo}) e o comprimento máximo de penetração de líquido no *pipeline* (x_{max}).

3.10.1.2. Convergência

A convergência do programa computacional pode ser avaliada comparando-se os resultados obtidos das simulações, considerando diferentes nodalizações. Na análise aqui apresentada, foram simulados casos de escoamento multifásico em *riser* vertical considerando 151, 101, 51, 11 e 6 nós. Esta comparação foi realizada para três diferentes casos, os quais estão apresentados a seguir.

Caso 1:

$$\dot{j}_{g0} = 0.069 \text{ m/s}$$

$$\dot{j}_{l0} = 0.146 \text{ m/s}$$

Para todas as nodalizações analisadas (101, 51, 11 e 6 nós) os resultados obtidos foram $T_{ciclo} = 44,0 \text{ s}$ e $x_{max} = 1,7 \text{ m}$. Assim, o programa mostrou-se convergente.

Caso 2:

$$\dot{j}_{g0} = 0.171 \text{ m/s}$$

$$\dot{j}_{l0} = 0.146 \text{ m/s}$$

Para este caso foram simulados os casos com 101 e 51 nós. Para ambos os casos foram encontrados os valores de $T_{ciclo} = 20,0 \text{ s}$ e $x_{max} = 0.2 \text{ m}$, o que indica convergência do programa computacional.

Caso 3:

$$\dot{j}_{g0} = 0.079 \text{ m/s}$$

$$\dot{j}_{l0} = 0.065 \text{ m/s}$$

Neste caso, foram simulados os casos com 151, 101, 51, 11 e 6 nós. Os valores de $x_{\max}$ obtidos para estas nodalizações foram de 0,46, 0,46, 0,47, 0,51 e 0,56 metros, respectivamente. Os períodos de intermitência severa T_{ciclo} obtidos foram 50,2, 50,3, 50,6, 53,0 e 54,7 s, respectivamente. Nota-se que, aumentando a nodalização, os resultados convergem.

3.10.1.3. Comparação com Dados Experimentais

O programa computacional é considerado satisfatório quando os resultados obtidos das simulações numéricas representam com boa aproximação os mesmos obtidos em experimentos. Neste projeto, os dados das simulações são comparados com os dados experimentais de Jansen (1990). Uma comparação de resultados é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13: Comparação de períodos do modelo com experimentais (Jansen, 1990).

Caso analisado			T_{ciclo}		
Número	j_{g0} (m/s)	j_{l0} (m/s)	Experimental (s)	Simulação (s)	Erro (%)
1	0,069	0,146	42,0	44,0	4,8
2	0,171	0,146	19,5	20,0	2,5
3	0,079	0,065	38,5	50,2	30,0
4	0,116	0,066	32,5	33,0	1,5
5	0,275	0,155	15,2	13,0	-14,5

A maioria das simulações apresenta erros pequenos entre os valores simulado e experimental. Como existem tanto erros positivos quanto negativos, fica evidente que esta imprecisão é aleatória, ou seja, não é causada por um erro sistemático.

Para todos os casos, a amplitude da variação da pressão na base do *riser* obtida a partir das simulações é condizente com a amplitude obtida experimentalmente.

3.10.2. Comparação dos Resultados com os Obtidos a Partir de Outros Modelos

Os resultados obtidos neste estudo foram comparados com os obtidos com os modelos publicados por Taitel (1986) e Sarica & Shoham (1991), referências no campo em questão.

Sarica & Shoham (1991) apresentam diferentes valores para o tempo de ciclo e comprimento de penetração máximo quando utiliza nodalizações diferentes, o que evidencia falta de convergência do seu método. Ainda assim, os resultados foram comparados, utilizando-se os valores obtidos com a nodalização mais refinada disponível ($\Delta t = 0,1$ s).

Estas comparações são apresentadas nas Tabelas 14 e 15. Nota-se que os erros envolvidos nos períodos da simulação aqui analisada são quase sempre menores do que os erros dos resultados de Taitel (1986) e Sarica & Shoham (1991), quando comparados com os valores experimentais.

Na Tabela 15, nota-se que os resultados simulados neste projeto são próximos dos resultados de Taitel (1986) e Sarica & Shoham (1991). Não estão disponíveis os dados experimentais.

Tabela 14: Comparação entre os períodos obtidos através dos diversos modelos.

Caso analisado			T_{ciclo}			
Número	$\dot{J}_{g0}$ (m/s)	$\dot{J}_{l0}$ (m/s)	Experimental (s)	Simulação (s)	Taitel (s)	Sarica & Shoham (s)
1	0,069	0,146	42,0	44,0	55,9	54,7
2	0,171	0,146	19,5	20,0	22,6	22,8
3	0,079	0,065	38,5	50,2	52,7	52,5
4	0,116	0,066	32,5	33,0	0	38
5	0,275	0,155	15,2	13,0	0	15

Tabela 15: Comparação entre os comprimentos de penetração obtidos através dos diversos modelos.

Caso analisado			x_{max}			
Número	$\dot{J}_{g0}$ (m/s)	$\dot{J}_{l0}$ (m/s)	Experimental (m)	Simulação (m)	Taitel (m)	Sarica & Shoham (m)
1	0,069	0,146	-	1,7	2,12	2,033
2	0,171	0,146	-	0,2	0,52	0,514
3	0,079	0,065	-	0,8	0,52	0,515
4	0,116	0,066	-	0	0	0
5	0,275	0,155	-	0	0	0

4. CONCLUSÕES

A simulação e análise dos casos rodados de escoamentos em *riser* de geometria catenária tiveram como objetivo principal o estudo da dinâmica e estabilidade do sistema.

Os resultados obtidos são muito satisfatórios qualitativamente, já que as curvas de estabilidade e instabilidade correspondem aos dados experimentais fornecidos pela Petrobras. Estas curvas, uma vez validadas, têm uma imensa importância no caso em estudo, pois só existem na literatura pontos experimentais. Esta foi a primeira vez que foram construídas teoricamente curvas de estabilidade e de diferentes tipos de instabilidade para escoamentos em *risers* de geometria catenária.

A partir das simulações considerando *risers* verticais, conclui-se que o presente modelo é o que melhor representa a realidade, se comparado com os modelos de Taitel (1986) e Sarica & Shoham (1991). Como estes dois últimos modelos são referências na literatura, então o presente modelo é considerado satisfatório.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baliño, Jorge Luis (coordenador), Análise de Intermittência Severa em Risers de Geometria Catenária. *Relatório Final FUSP/Petrobras*, 2006.

Baliño, J. L., Burr, K. P., Pereira, N. A. L., Modeling and simulation of severe slugging in pipeline-riser systems, *XIX International Congress of Mechanical Engineering* (COBEM 2007), 8 p., Brasília, 2007.

Baliño, J. L., Burr, K. P., Pereira, N. A. L., Modelado y simulación de intermitencia severa en sistemas línea-riser (em espanhol), aceito em *Anales de la Asociación Física Argentina*, 7 p., 2008.

Jansen, F. E., *Elimination of severe slugging in a pipeline-riser system*. M.S. Thesis, The University of Tulsa, Tulsa, 1990.

Matsumoto, Élia Y., *MATLAB 6: Fundamentos de Programação*. São Paulo, Brasil. Érica, 2001.

Sarica, C. & Shoham, O., A Simplified Transient Model for Pipeline-Riser Systems, Tulsa, EUA, *Chemical Engineering Science*, Vol. 46, No. 9, pp.2167-2179, 1991.

Taitel, Y., Stability of severe slugging, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 12, pp. 203-217, 1986.

Wallis, Graham B., *One-dimensional Two-phase Flow*. Nova York, EUA, McGraw-Hill 1969.

Whalley, P.B.. *Two-Phase Flow and Heat Transfer*. Oxford, EUA: Oxford University Press 1996. cap. 1-5, p. 1-32.

Wordsworth, C., Das, I., Loh, W. L., McNulty, G., Lima, P. C. & Barbuto, F.. Multiphase Flow Behaviour in a Catenary Shaped Riser, *CALtec Report*, vol. 1, Inglaterra, 1998.