

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Simulação de Escoamentos Multifásicos. Aplicação a  
Intermitência Severa em Sistemas de Produção de Petróleo**

Ricardo da Carvalhinha Thomaz

São Paulo

2009

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Simulação de Escoamentos Multifásicos. Aplicação a  
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

Ricardo da Carvalhinha Thomaz

Orientador: Jorge Luis Baliño

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica

São Paulo

2009

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Thomaz, Ricardo da Carvalhinha**

**Simulação de escoamentos multifásicos. Aplicação a intermitência severa em sistemas de produção de petróleo / R.C. Thomaz. – São Paulo, 2009.**

**60 p.**

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

**1. Escoamento multifásico 2. Petróleo (Produção) 3. Estabilidade 4. Dutos 5. Engenharia mecânica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.**

## **DEDICATÓRIA**

Agradeço ao Prof. Doutor Jorge Luis Baliño, pela paciência e presteza não só durante a realização deste trabalho, mas também durante todo o desenvolvimento do projeto de iniciação científica; ao Núcleo de Dinâmica e Fluidos (NDF), cujas instalações estiveram sempre à minha plena disposição; à minha família, pelo suporte e paciência durante estes cinco (longos) anos de graduação; e a Deus, que me guarda e me rege em todo o tempo.

## RESUMO

O projeto em questão 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 programas de Dinâmica de Fluidos Computacional. Após um período de tempo gasto com a familiarização desta questão e das variáveis inerentes a ela, foram feitas diversas simulações computacionais, variando-se parâmetros de entrada tais quais vazão volumétrica de líquido e vazão mássica de gás no início do *pipeline*, e o comprimento de *buffer* do sistema. Tais resultados foram comparados com trabalhos experimentais presentes na literatura, de modo a avaliar a proximidade do modelo utilizado com um escoamento real. Em uma segunda parte do trabalho, foram confeccionados ainda mapas de estabilidade para conjuntos de dados de entrada de interesse, de modo a se delimitar uma fronteira entre condições em que o fenômeno de intermitência severa ocorre ou não, bem como caracterizar regiões que determinam que tipo de instabilidade acontece.

## **ABSTRACT**

The objective of this project is to study multi-phase flows models applied into oil production systems, as well as their applications in simulations of the severe slugging phenomenon, using Computational Fluid Dynamics programs. Several computer simulations were made, changing input parameters like liquid volumetric flow rate and gas mass flow rate, besides the buffer length of the system. These results were compared with experimental results existent in the literature, in order to evaluate the proximity of the model used with a real situation. In a second part of the project, stability maps were constructed using input data of interest, in order to determine a boundary between the conditions in which the severe slugging phenomenon occurs or not, as well as to characterize the areas that may determine the type of instability that occurs.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	4
2.1	Definições .....	4
2.1.1	Fração de vazio .....	4
2.1.2	Velocidades médias das fases .....	5
2.1.3	Fluxo volumétrico ou velocidade superficial.....	5
2.1.4	Fluxos volumétricos ou velocidades superficiais das fases .....	5
2.1.5	Velocidades relativas entre as fases .....	6
2.1.6	Velocidades de deriva ( <i>drift velocity</i> ) .....	6
2.1.7	Fluxos de deriva das fases ( <i>drift flux</i> ) .....	6
2.1.8	Relação entre as velocidades superficiais e médias das fases.....	7
2.2	Sistemas de Produção de Petróleo.....	7
2.2.1	O Fenômeno de Intermitência Severa .....	8
3.	APRESENTAÇÃO DO MODELO .....	20
3.1	<i>Pipeline</i> .....	20
3.1.1	Condição com penetração de líquido no <i>pipeline</i> ( $x > 0$ ) .....	22
3.1.2	Condição sem penetração de líquido no <i>pipeline</i> ( $x = 0$ ).....	23
3.1.3	Teoria de equilíbrio local para escoamento estratificado.....	24
3.2	<i>Riser</i> .....	25

3.2.1	Parâmetros de <i>drift</i> .....	27
3.3	Garantia de continuidade entre <i>pipeline</i> e <i>riser</i> .....	28
4.	DESCRIÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL.....	29
4.1	Discretização .....	29
4.2	Entrada de dados .....	30
4.3	Saída de dados.....	31
5.	RESULTADOS.....	34
5.1	Simulações Computacionais .....	34
5.1.1	Simulações para comprimento de <i>buffer</i> 1,69 m.....	36
5.1.2	Simulações para comprimento de <i>buffer</i> 5,1 m.....	37
5.1.3	Simulações para comprimento de <i>buffer</i> 10 m.....	39
5.1.4	Resumo das simulações.....	40
5.2	Mapas de estabilidade .....	41
5.2.1	Procedimento de obtenção das curvas de estabilidade.....	41
5.2.2	Procedimento de obtenção das curvas SS2-SS3 .....	42
5.2.3	Procedimento de obtenção das curvas SS1-SS2 .....	43
5.2.4	Mapa de estabilidade para comprimento de <i>buffer</i> 1,69 m .....	43
5.2.5	Mapa de estabilidade para comprimento de <i>buffer</i> 5,1 m .....	47
5.2.6	Mapa de estabilidade para comprimento de <i>buffer</i> 10 m .....	50
5.2.7	Comparação entre as curvas de estabilidade.....	54

5.2.8	Comparação entre as curvas SS2-SS3.....	55
5.2.9	Comparação entre as curvas SS1-SS2.....	56
6.	CONCLUSÕES .....	58
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5-1: Comparação entre resultados experimentais e numéricos para $L_e = 1,69m$ .	36
Tabela 5-2: Comparação entre resultados experimentais e numéricos para $L_e = 5,1m$ .	38
Tabela 5-3: Comparação entre resultados experimentais e numéricos para $L_e = 10m$ .	39
Tabela 5-4: Desvio das simulações em relação aos dados experimentais. ....	40
Tabela 5-5 – Dados experimentais para $L_e = 1,69m$ (TAITEL <i>et al.</i> , 1990).....	43
Tabela 5-6 – Pontos para a construção da curva de estabilidade ( $L_e = 1,69m$ ). ....	45
Tabela 5-7 – Pontos para a construção da curva SS2-SS3 ( $L_e = 1,69m$ ). ....	45
Tabela 5-8 – Pontos para a construção da curva SS1-SS2 ( $L_e = 1,69m$ ). ....	45
Tabela 5-9 – Dados experimentais para $L_e = 5,1m$ (TAITEL <i>et al.</i> , 1990).....	47
Tabela 5-10 – Pontos para a construção da curva de estabilidade ( $L_e = 5,1m$ ). ....	48
Tabela 5-11– Pontos para a construção da curva SS2-SS3 ( $L_e = 5,1m$ ). ....	49
Tabela 5-12 – Pontos para a construção da curva SS1-SS2 ( $L_e = 5,1m$ ). ....	49
Tabela 5-13 – Dados experimentais para $L_e = 10m$ (TAITEL <i>et al.</i> , 1990). ....	51
Tabela 5-14 – Pontos para a construção da curva de estabilidade ( $L_e = 10m$ ). ....	52
Tabela 5-15 – Pontos para a construção da curva SS2-SS3 ( $L_e = 10m$ ). ....	52

Tabela 5-16 – Pontos para a construção da curva SS1-SS2 ( $L_e = 10m$ ). .....	53
--	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – escoamento em estado permanente (TAITEL, 1986).....	7
Figura 2-2 – Formação do <i>slug</i> (TAITEL, 1986).....	9
Figura 2-3 – Produção do <i>slug</i> (TAITEL, 1986).....	9
Figura 2-4 – Penetração de gás (TAITEL, 1986).....	10
Figura 2-5 – Expulsão de gás (TAITEL, 1986). ....	11
Figura 2-6 – Gráfico de pressão na base do <i>riser</i> em função do tempo, característico de SS1 ( $L = 5,1m$ , $W_g = 1E - 4kg / s$ , $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ).....	12
Figura 2-7 – Gráfico do comprimento de penetração de líquido em função do tempo, característico de SS1 ( $L = 5,1m$ , $W_g = 1E - 4kg / s$ , $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ). ....	13
Figura 2-8 – Gráfico da fração de vazio na base do <i>riser</i> em função do tempo, característico de SS1 ( $L = 5,1m$ , $W_g = 1E - 4kg / s$ , $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ). ....	14
Figura 2-9 – Gráfico de pressão na base do <i>riser</i> em função do tempo, característico de SS2 ( $L = 5,1m$ , $W_g = 2E - 4kg / s$ , $Q_l = 2E - 4m^3 / s$ ).....	15
Figura 2-10 – Gráfico do comprimento de penetração de líquido em função do tempo, característico de SS2 ( $L = 5,1m$ , $W_g = 2E - 4kg / s$ , $Q_l = 2E - 4m^3 / s$ ). ....	16
Figura 2-11 – Gráfico da fração de vazio na base do <i>riser</i> em função do tempo, característico de SS2 ( $L = 5,1m$ , $W_g = 2E - 4kg / s$ , $Q_l = 2E - 4m^3 / s$ ). ....	17
Figura 2-12 – Gráfico de pressão na base do <i>riser</i> em função do tempo, característico de SS3 ( $L = 5,1m$ , $W_g = 2E - 4kg / s$ , $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ).....	18

Figura 2-13 – Gráfico do comprimento de penetração de líquido em função do tempo, característico de SS3 ( $L = 5,1m$ , $W_g = 2E - 4kg / s$ , $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ). .....	18
Figura 2-14 – Gráfico da fração de vazio na base do riser em função do tempo, característico de SS3 ( $L = 5,1m$ , $W_g = 2E - 4kg / s$ , $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ). .....	19
Figura 3-1 – Volume de controle para o pipeline (BALIÑO, 2008).....	21
Figura 3-2 – escoamento estratificado para a teoria de equilíbrio local (BALIÑO, 2008). .....	24
Figura 3-3 – Volume de controle do riser (BALIÑO, 2008).....	25
Figura 5-1: Aparato experimental (TAITEL et al., 1990).....	35
Figura 5-2 – Mapa de estabilidade para comprimento de buffer $L_e = 1,69m$ .....	46
Figura 5-3 – Mapa de estabilidade para comprimento de buffer $L_e = 5,1m$ .....	50
Figura 5-4 - Mapa de estabilidade para comprimento de buffer $L_e = 10m$ .....	53
Figura 5-5 – Comparação entre as curvas de estabilidade em termos das velocidades superficiais das fases, variando-se o comprimento de buffer.....	55
Figura 5-6 – Comparação entre as curvas SS2-SS3 em termos das velocidades superficiais das fases, variando-se o comprimento de buffer.....	56
Figura 5-7 – Comparação entre as curvas SS1-SS2 em termos das velocidades superficiais das fases, variando-se o comprimento de buffer.....	57

## 1. INTRODUÇÃO

Uma parcela significativa dos escoamentos que ocorrem na natureza e na tecnologia é de caráter multifásico. Petróleo, gás e água coexistem na cortiça terrestre. As nuvens são gotas de líquido mexendo-se em um gás. A transferência de calor por ebulição é de fundamental importância na geração de energia elétrica. Os processos químicos envolvem misturas, emulsões e catálises. Na área de alimentação, tomamos bebidas carbonatadas (como refrigerantes, cerveja, etc.) e comemos emulsões e suspensões (como maionese, manteiga, etc.). 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.

Como acontece em escoamentos turbulentos, para os escoamentos multifásicos recorre-se a um tratamento estatístico. Parâmetros de interesse que surgem do processo de média estatística (*ensemble average*) neste tipo de problemas são a fração de vazio (*void fraction*) e a densidade de área interfacial (*interfacial area*).

Uma grande dificuldade adicional para o estudo de escoamentos multifásicos é que a forma e posição das interfaces são desconhecidas. As diferenças de velocidades entre as fases e a sua geometria (configuração) influenciam, sobretudo, o comportamento sendo, portanto, as bases para a classificação dos regimes de escoamento. Por sua vez, a distribuição das fases depende da direção do escoamento em relação à gravidade. As propriedades físicas (densidade, viscosidade, tensão superficial) também influenciam o comportamento.

Existem na literatura diferentes modelos para tratar problemas de escoamento multifásico, dos mais simples (modelo homogêneo) até os mais complexos (como o de escoamentos separados), nos quais se modelam os termos de interação entre as

diferentes fases. O estado da arte na modelagem de escoamento multifásico ainda não evoluiu suficientemente para garantir o bom comportamento matemático das equações resultantes.

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.

O conhecimento dos mecanismos de transporte multifásico de gás, petróleo e água tem se tornado importante na tecnologia de exploração *offshore*. A tendência de poços satélites conectados por condutos em árvore dá lugar a condutos de transporte mais compridos até as plataformas. Além disto, a maior profundidade dos poços apresenta desafios particulares para a garantia do escoamento.

Com as vazões existentes em condutos, linhas de surgência e *risers*, o padrão de escoamento mais freqüente é o padrão “intermitente”, em “golfada” ou *slug*, caracterizado por uma distribuição axial intermitente de líquido e gás. 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*).

Diante deste panorama apresentado, objetiva-se, através de simulações computacionais, auxiliar o contínuo aperfeiçoamento de modelos do fenômeno, analisando-se assim o potencial das ferramentas disponíveis para a análise deste tipo de escoamento. Para este trabalho, foram tomados como referência dados experimentais e resultados de simulações numéricas presentes na literatura (TAITEL et al., 1990) e comparados com os resultados obtidos através de simulações feitas amparadas pelo modelo proposto, utilizando-se dos mesmos dados de entrada. Foi feito ainda um estudo, determinando-se uma fronteira para os parâmetros de entrada (vazões de gás e de líquido) entre as regiões de estabilidade, que são as ideais para operação, e as regiões de instabilidade, onde ocorre o fenômeno de intermitência severa. Dentro destas últimas, determinaram-se ainda regiões que caracterizam o tipo

de instabilidade que ocorre para dado conjunto de vazões. Tais mapas são particularmente úteis quando se deseja determinar rapidamente se determinada combinação de valores para vazões volumétrica de líquido e mássica de gás resultam ou não em escoamentos estáveis, sem a necessidade de se realizar longas e enfadonhas simulações numéricas.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Na literatura, existem diversos modelos utilizados para abordagem de escoamentos multifásicos. Dentre eles, os mais amplamente aceitos e aplicados são o modelo homogêneo, no qual se considera que ambas as fases, líquida e gasosa, têm mesma velocidade, portanto não apresentam escorregamento entre si; e o modelo de fluxo de deriva (*drift flux model*), no qual a eventual diferença de velocidade entre as fases não é desprezível, fazendo-se assim necessário que a velocidade individual de cada fase seja levada em conta. À luz destes modelos, faz-se necessária a introdução dos principais fatores e variáveis inerentes ao estudo de escoamentos multifásicos.

### 2.1 Definições

Considerando os índices  $l$  e  $g$  correspondentes às fases líquida e gasosa respectivamente, são definidos:

#### 2.1.1 Fração de vazio

Entende-se por fração de vazio ( $\alpha$ ) a fração da área de passagem ocupada pelo gás:

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (1)$$

$$A = A_l + A_g \quad (2)$$

$$1 - \alpha = \frac{A_l}{A} \quad (3)$$

sendo  $A$  a área total de passagem,  $A_l$  a área ocupada por líquido e  $A_g$  a área ocupada por gás.

### 2.1.2 Velocidades médias das fases

As velocidades médias das fases líquida ( $u_l$ ) e gasosa ( $u_g$ ) são dadas respectivamente por:

$$u_l = \frac{W_l}{\rho_l A_l} \quad (4)$$

$$u_g = \frac{W_g}{\rho_g A_g} \quad (5)$$

sendo  $W_f$  e  $W_g$  respectivamente as vazões mássicas de líquido e gás, e  $\rho_f$  e  $\rho_g$  as densidades das fases líquida e gasosa, respectivamente.

### 2.1.3 Fluxo volumétrico ou velocidade superficial

A velocidade superficial é obtida da vazão volumétrica total ( $Q$ ) por unidade de área de passagem:

$$j = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

### 2.1.4 Fluxos volumétricos ou velocidades superficiais das fases

Correspondem às velocidades médias das fases líquida ( $j_l$ ) e gasosa ( $j_g$ ) se estas escoassem em toda a área de passagem.

$$j_l = \frac{Q_l}{A} \quad (7)$$

$$j_g = \frac{Q_g}{A} \quad (8)$$

### 2.1.5 Velocidades relativas entre as fases

De posse das velocidades médias das fases, pode-se calcular a velocidade relativa entre elas:

$$u_{gl} = u_g - u_l = -u_{lg} \quad (9)$$

### 2.1.6 Velocidades de deriva (*drift velocity*)

As velocidades de deriva ( $u_{lj}$  e  $u_{gj}$ ) são dadas pela diferença entre as velocidades das fases e a velocidade superficial.

$$u_{lj} = u_l - j \quad (10)$$

$$u_{gj} = u_g - j \quad (11)$$

### 2.1.7 Fluxos de deriva das fases (*drift flux*)

O fluxo de deriva das fases refere-se ao fluxo volumétrico de uma fase relativo a uma superfície se deslocando com uma velocidade  $j$ .

$$j_{gl} = \alpha(u_g - j) = \alpha u_{gj} \quad (12)$$

$$j_{lg} = (1 - \alpha)(u_l - j) = (1 - \alpha)u_{lj} \quad (13)$$

$$j_{gl} = -j_{lg} = \alpha(1 - \alpha)u_{gl} \quad (14)$$

### 2.1.8 Relação entre as velocidades superficiais e médias das fases

De posse das equações explícitas anteriormente, pode-se facilmente ainda expressar a velocidade superficial de uma fase em função de sua velocidade média e da fração de vazio:

$$j_g = \alpha u_g \quad (15)$$

$$j_l = (1 - \alpha)u_l \quad (16)$$

## 2.2 Sistemas de Produção de Petróleo

Com as vazões existentes em dutos, linhas de surgência e *risers*, o padrão de escoamento mais freqüente é o padrão "intermitente", em "golfada" ou *slug*, caracterizado por uma distribuição axial intermitente de líquido e gás. O gás é transportado como bolhas entre golfadas de líquido, conforme a Figura 2-1.

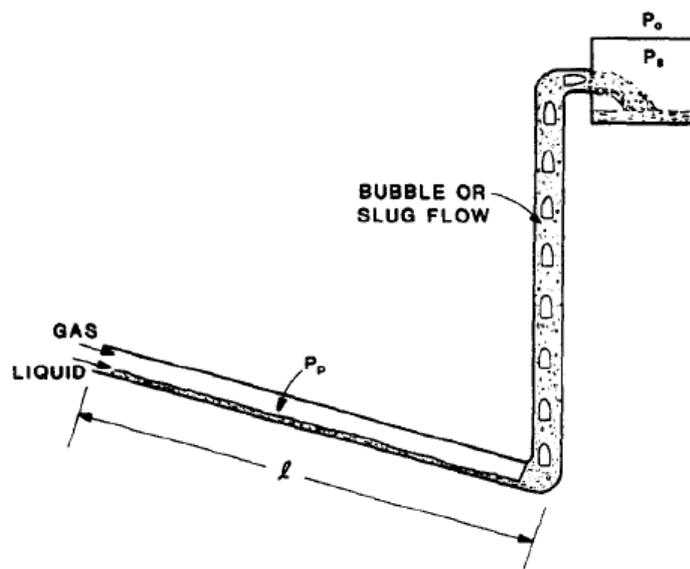


Figura 2-1 – Escoamento em estado permanente (TAITEL, 1986).

Na operação em estado permanente, o padrão de escoamento no *pipeline* pode ser estratificado, enquanto no *riser* resulta intermitente, como mostrado na Figura 2-1.

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*).

### 2.2.1 O Fenômeno de Intermitência Severa

A intermitência severa ocorre geralmente num ponto com uma cota baixa na topografia do conduto, por exemplo, num trecho de tubulação descendente seguido do *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 períodos da ordem de horas, o que é muito maior que o período de passagem de golfadas em operação normal. 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 com grandes oscilações de pressão e problemas de dimensionamento nas unidades de separação na plataforma, provocando sua saída de serviço e importantes perdas econômicas. Em particular, a empresa Petrobrás tem reportado vários casos de golfadas severas nos sistemas linha-*riser*, os primeiros deles durante 1984-1985.

Um ciclo de intermitência severa pode ser descrito em termos das seguintes etapas (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, sendo possível que o nível de líquido fique abaixo do nível máximo no separador. Como consequência disto, 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; esta etapa é conhecida como formação do *slug* (Figura 2-2).

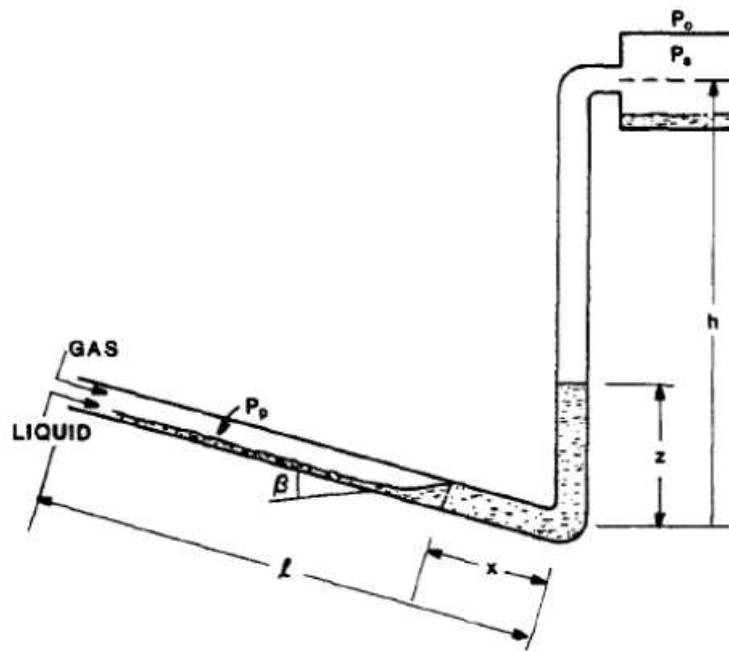


Figura 2-2 – Formação do *slug* (TAITEL, 1986).

Quando o nível de líquido atinge o topo enquanto a passagem de gás permanece bloqueada, a pressão na base atinge seu máximo valor e há somente líquido escoando no *riser*, resultando a etapa de produção do *slug* (Figura 2-3).

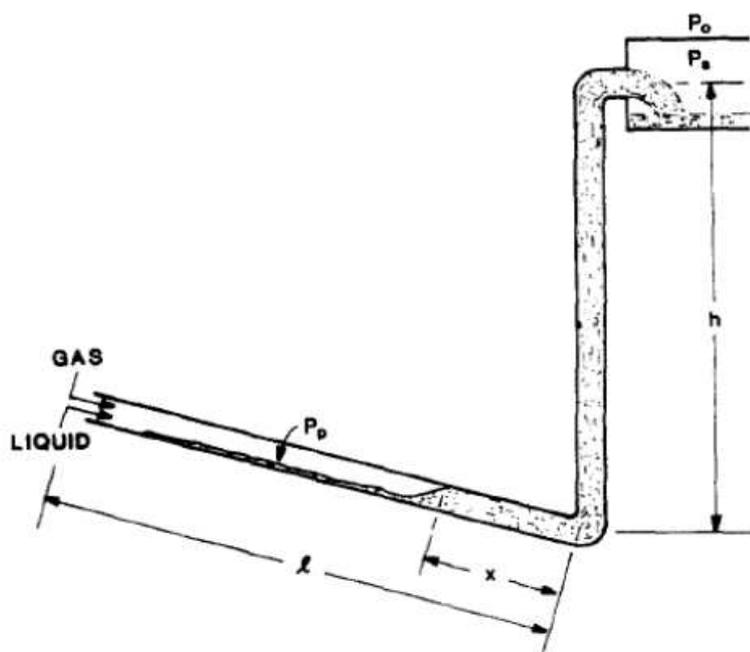


Figura 2-3 – Produção do *slug* (TAITEL, 1986).

Como o gás continua entrando no *pipeline*, a frente de acumulação de líquido é “puxada” de volta até que atinge o base do *riser*, começando a etapa de penetração de gás (Figura 2-4).

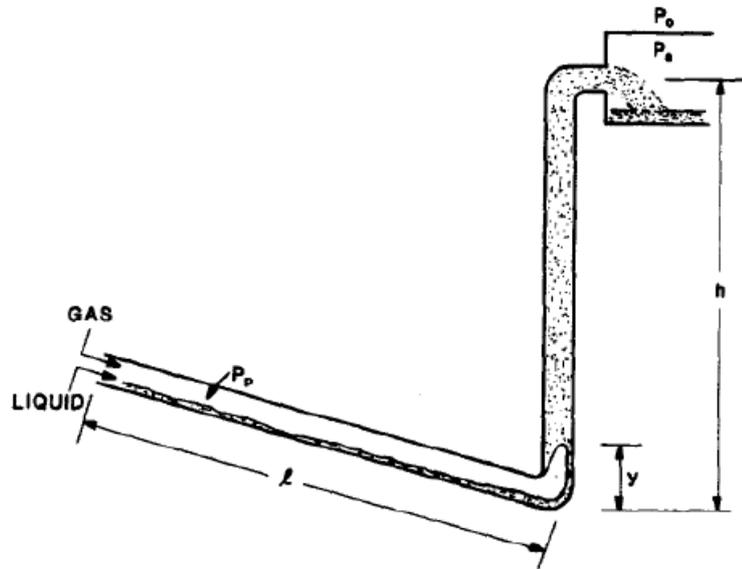


Figura 2-4 – Penetração de gás (TAITEL, 1986).

Na medida em que o gás penetra no *riser*, a coluna se torna mais leve, diminuindo a pressão e aumentando a vazão de gás. Quando o gás atinge o topo, a passagem de gás fica liberada através do escoamento estratificado no *pipeline* e do escoamento intermitente no *riser*, causando uma violenta expulsão e uma rápida descompressão que leva novamente o processo à etapa de formação; esta etapa é conhecida como expulsão de gás (Figura 2-5).

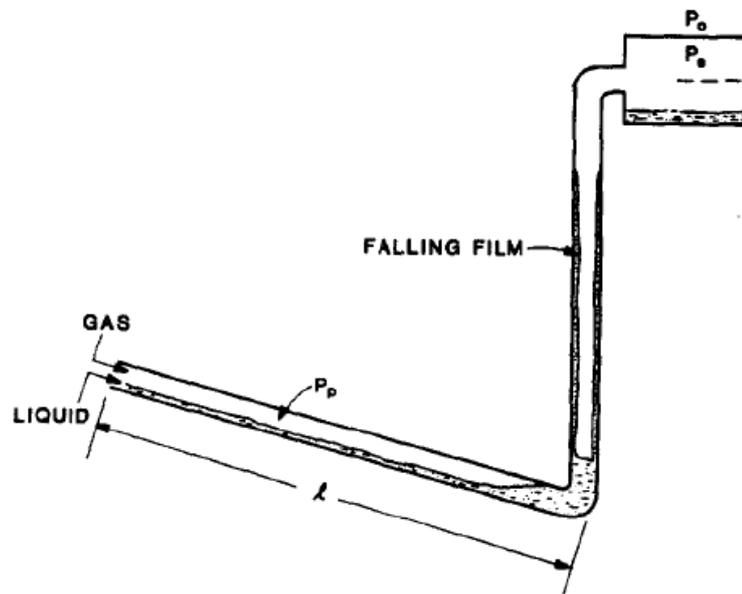


Figura 2-5 – Expulsão de gás (TAITEL, 1986).

Dentre as principais conseqüências indesejáveis causadas pelo fenômeno de intermitência severa estão as seguintes: o aumento da pressão na cabeça do poço, causando consideráveis perdas de produção; grandes vazões instantâneas, com picos da ordem de dez vezes o valor de estado estacionário, causando instabilidades no sistema de controle de líquido nos separadores e eventualmente um *shutdown*; e oscilações de vazão no reservatório.

Ainda sobre o fenômeno em questão, encontra-se comumente na literatura classificações que caracterizam comportamentos típicos e identificáveis do escoamento instável. Tais classificações são *Severe Slugging 1* (SS1), *Severe Slugging 2* (SS2) e, por fim, *Severe Slugging 3* (SS3).

#### 2.2.1.1 Intermitência severa do tipo *Severe Slugging 1* (SS1)

Este é a chamada intermitência severa clássica, caracterizada principalmente pelo fato de que o comprimento do *slug* resulta maior que o comprimento do *riser*. O *riser* se encontra inteiramente tomado por líquido, portanto, a pressão na base atinge seu valor máximo, permanecendo assim por alguns instantes, fato claramente evidenciado por espécies de “patamares” nos gráficos de pressão na base do *riser*. Paralelamente, a frente de líquido penetra ciclicamente pelo *pipeline*, caracterizando-

se  $x > 0$ . Devido à penetração de líquido, nota-se, enquanto a passagem de gás está bloqueada, períodos de tempo em que a fração de vazio na base do *riser* é nula ( $\alpha_b = 0$ ).

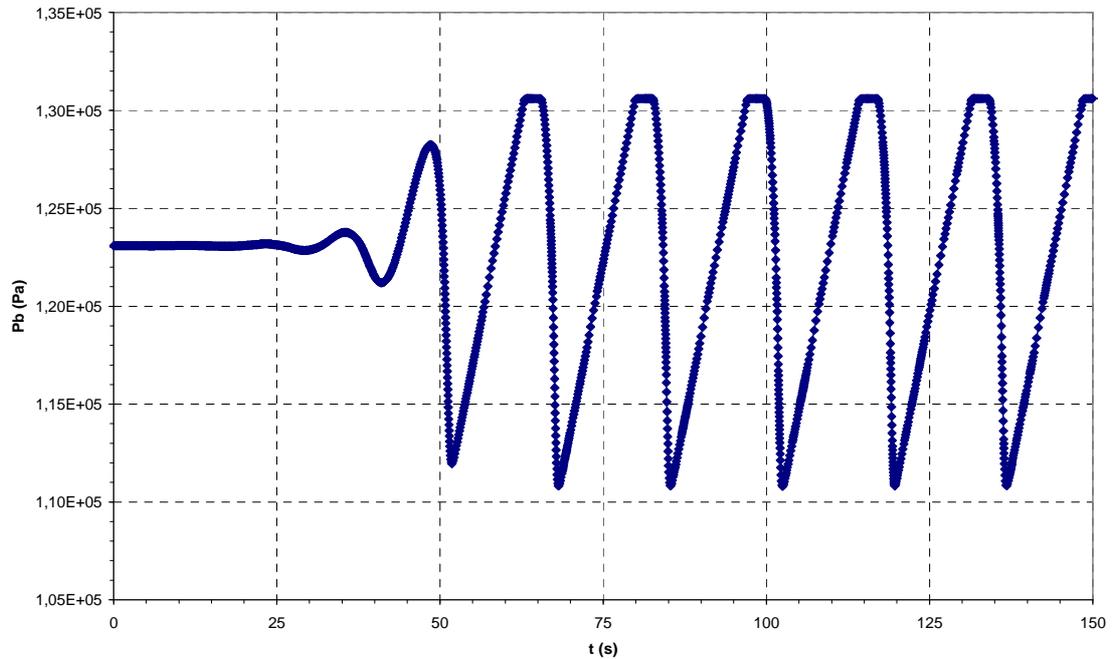


Figura 2-6 – Gráfico de pressão na base do *riser* em função do tempo, característico de SS1 ( $L = 5,1m$ ,  $W_g = 1E - 4kg / s$ ,  $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ).

Da Figura 2-6, que contém o gráfico de pressão na base do *riser* em função do tempo em uma situação típica de SS1 nota-se que, além da oscilação que a própria variável sofre, alguns “patamares” em que o valor da pressão fica constante, após o ciclo entrar em regime de oscilação. Isto ocorre exatamente quando a coluna do *riser* está completamente cheia de líquido.

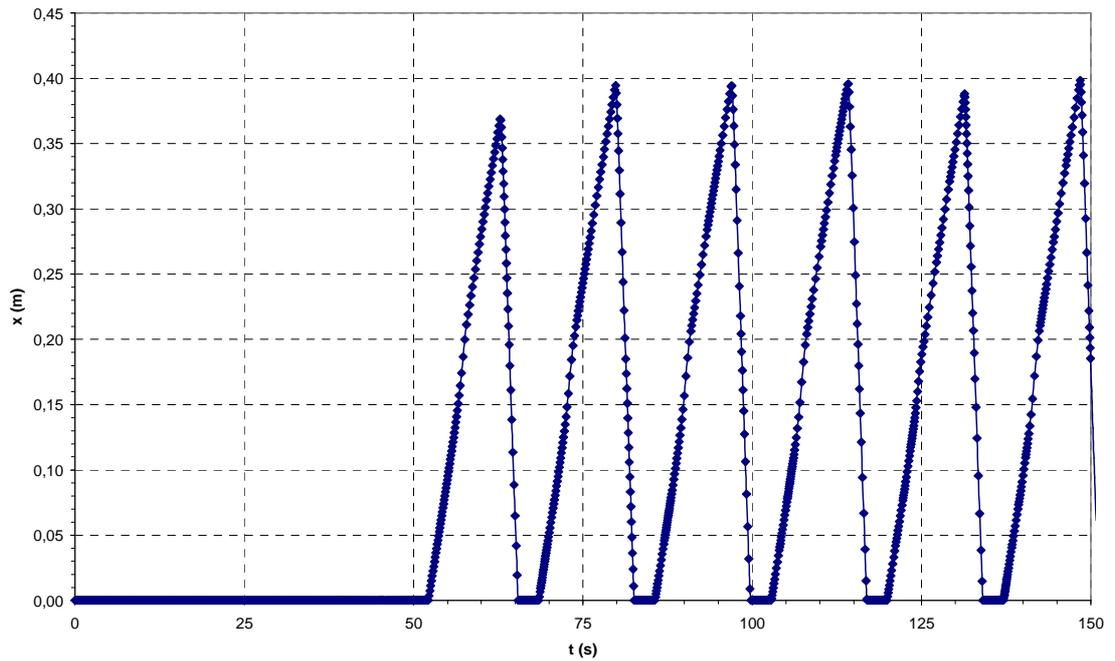


Figura 2-7 – Gráfico do comprimento de penetração de líquido em função do tempo, característico de SS1 ( $L = 5,1m$ ,  $W_g = 1E - 4kg / s$ ,  $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ).

Na Figura 2-7, contendo o comprimento de penetração de líquido no *pipeline* em função do tempo em uma situação típica de SS1, nota-se seu comportamento cíclico.

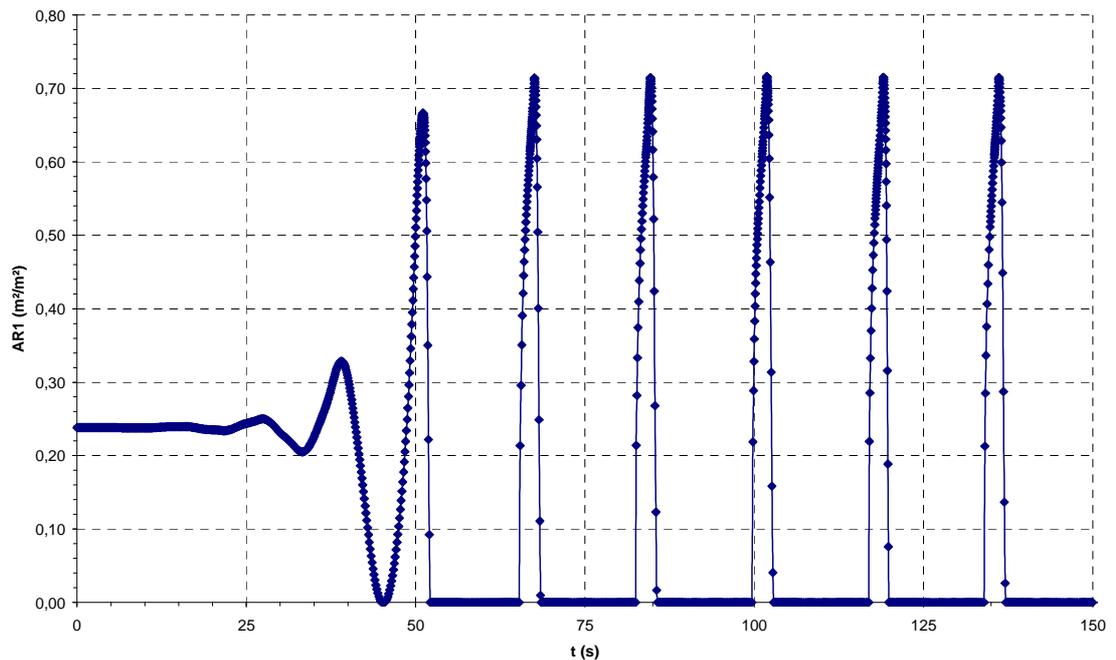


Figura 2-8 – Gráfico da fração de vazio na base do *riser* em função do tempo, característico de SS1 ( $L = 5,1m$ ,  $W_g = 1E - 4kg / s$ ,  $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ).

Na Figura 2-7, contendo a fração de vazio na base do *riser* em função do tempo em uma situação típica de SS1, verificam-se intervalos de tempo através dos quais a fração de vazio permanece nula, caracterizando bloqueio na passagem de gás na transição *pipeline-riser*.

### 2.2.1.2 Intermitência severa do tipo *Severe Slugging 2* (SS2)

Processo semelhante ao tipo SS1, entretanto, com a diferença básica de que o comprimento do *slug* resulta menor que o comprimento do *riser*.

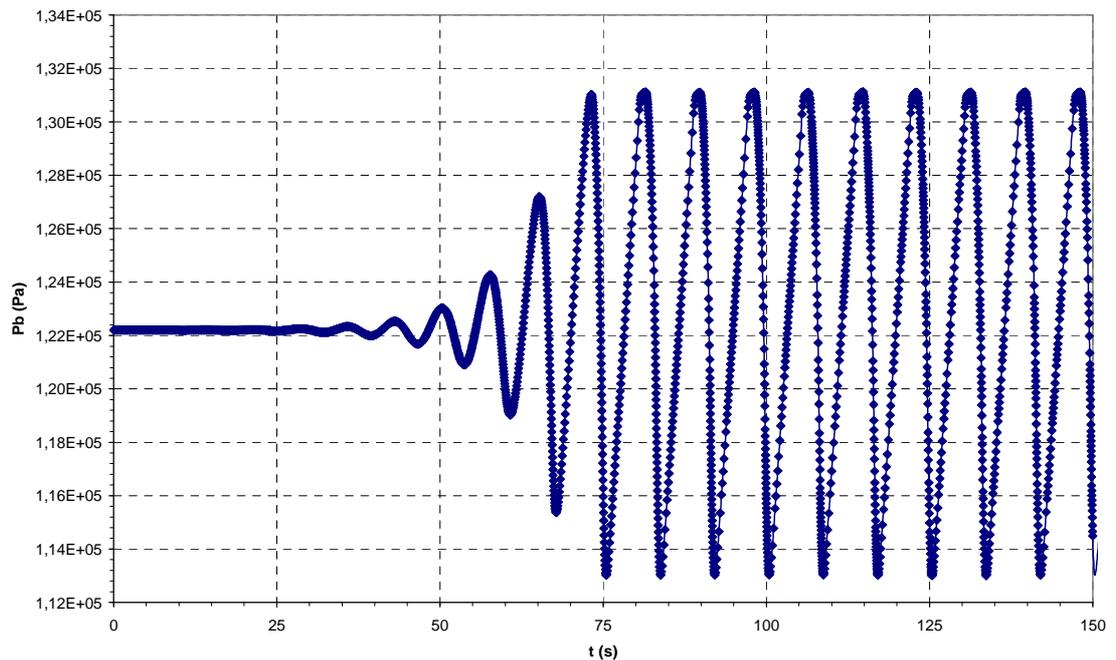


Figura 2-9 – Gráfico de pressão na base do *riser* em função do tempo, característico de SS2 ( $L = 5,1m$ ,  $W_g = 2E - 4kg / s$ ,  $Q_l = 2E - 4m^3 / s$ ).

Da Figura 2-9, que contém o gráfico de pressão na base do *riser* em função do tempo em uma situação típica de SS2, nota-se que, diferentemente da situação de SS1, podem não existir “patamares” em que o valor da pressão fica constante, antes claramente identificáveis. Isto ocorre em virtude de o *riser* pode não ficar completamente cheio de líquido.

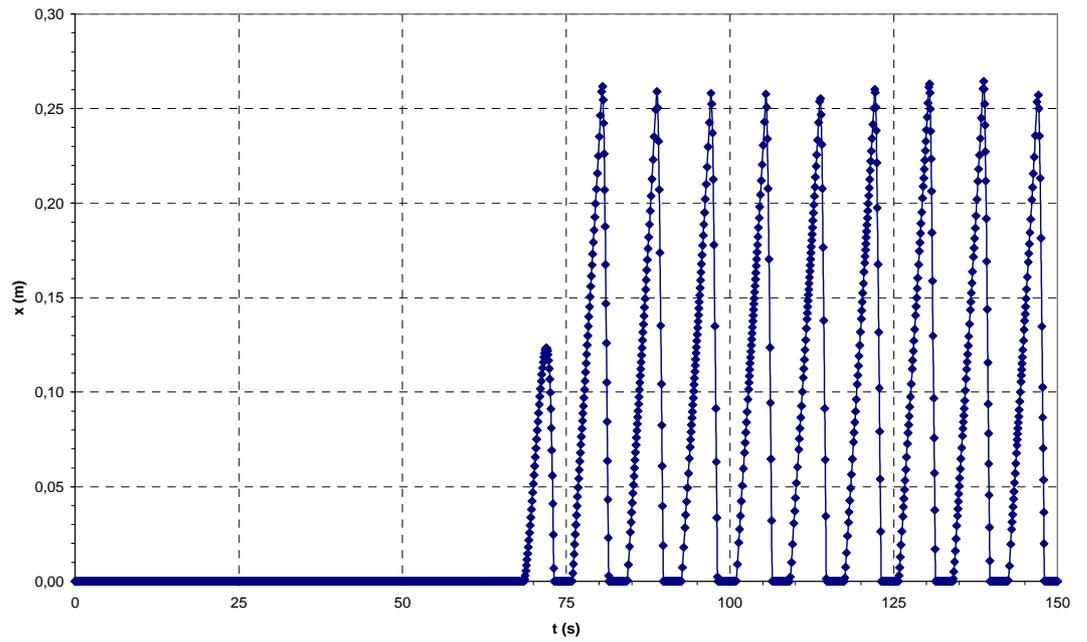


Figura 2-10 – Gráfico do comprimento de penetração de líquido em função do tempo, característico de SS2 ( $L = 5,1\text{ m}$ ,  $W_g = 2E - 4\text{ kg / s}$ ,  $Q_l = 2E - 4\text{ m}^3 / \text{s}$ ).

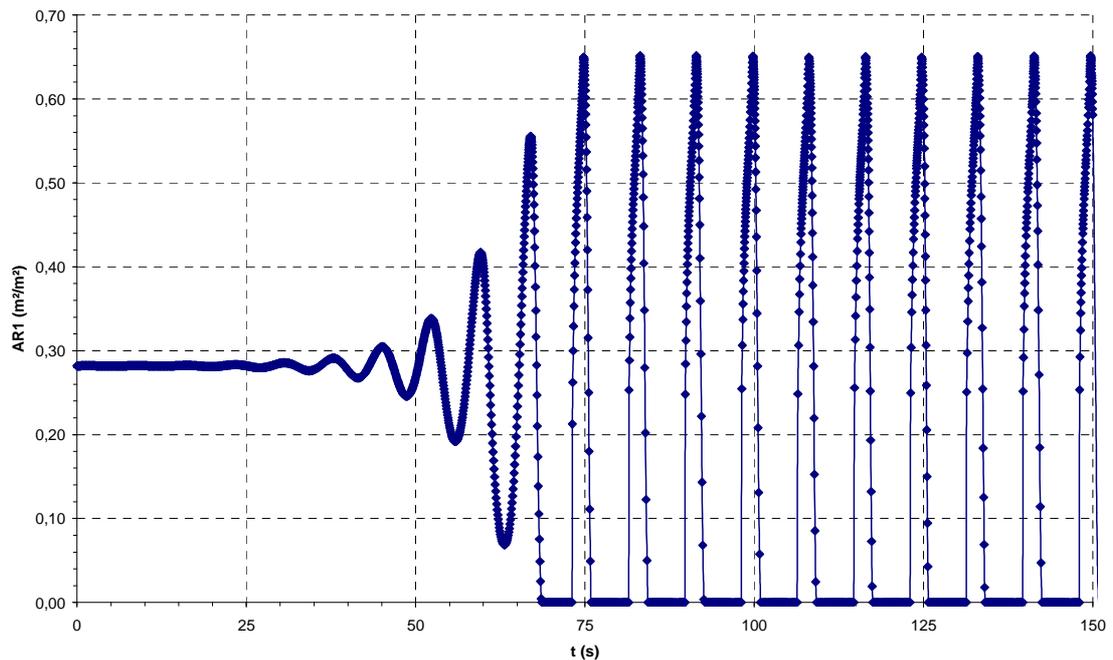


Figura 2-11 – Gráfico da fração de vazio na base do *riser* em função do tempo, característico de SS2 ( $L = 5,1m$ ,  $W_g = 2E - 4kg / s$ ,  $Q_l = 2E - 4m^3 / s$ ).

Nos gráficos do comprimento de penetração de líquido em função do tempo (Figura 2-10) e da fração de vazio na base do *riser* em função do tempo (Figura 2-11) em uma situação típica de SS2, nota-se um comportamento semelhante àquele observado na situação de SS1 (Figura 2-7 e Figura 2-8).

### 2.2.1.3 Intermitência severa do tipo *Severe Slugging 3* (SS3)

Para este terceiro tipo de intermitência severa, ocorrente para conjuntos de vazões mais próximos daqueles em que há escoamento estável, tem-se como principal característica o fato de gás sempre penetrar na interface *pipeline-riser*, apesar de a coluna líquido-gás do *riser* ser instável. Desta forma, tem-se a penetração da frente de líquido no *pipeline* sempre nula ( $x = 0$ ) e a fração de vazio na base do *riser* sempre maior que zero ( $\alpha_b > 0$ ). Paralelamente, outros parâmetros, como a pressão na base do *riser*, são variáveis no tempo, caracterizando regime intermitente.

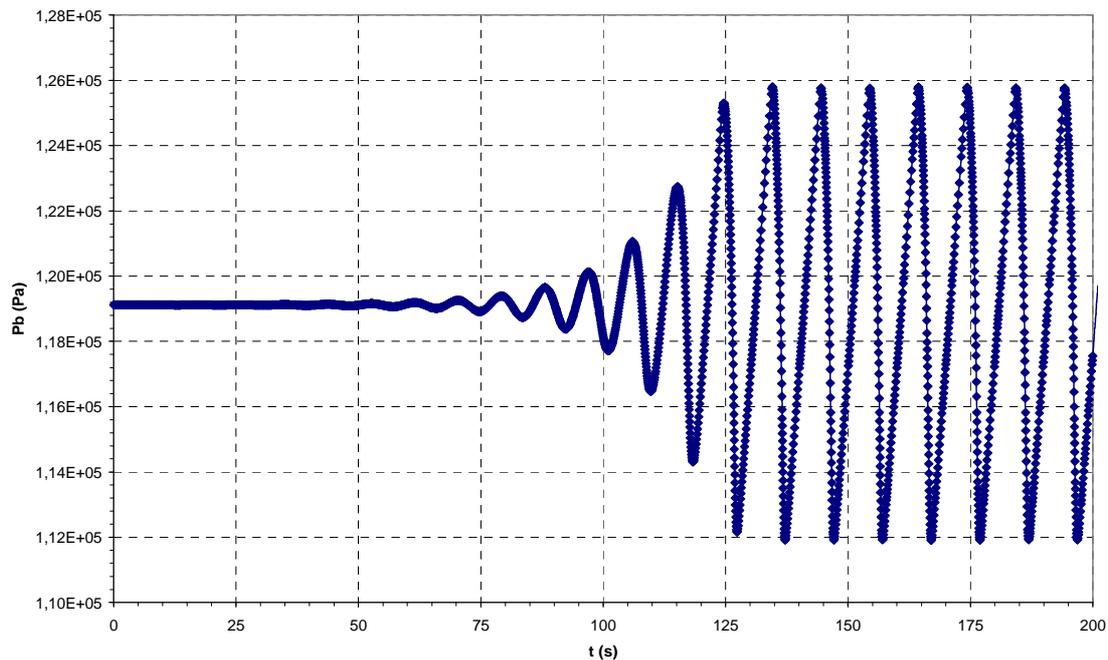


Figura 2-12 – Gráfico de pressão na base do *riser* em função do tempo, característico de SS3 ( $L = 5,1m$ ,  $W_g = 2E - 4kg / s$ ,  $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ).

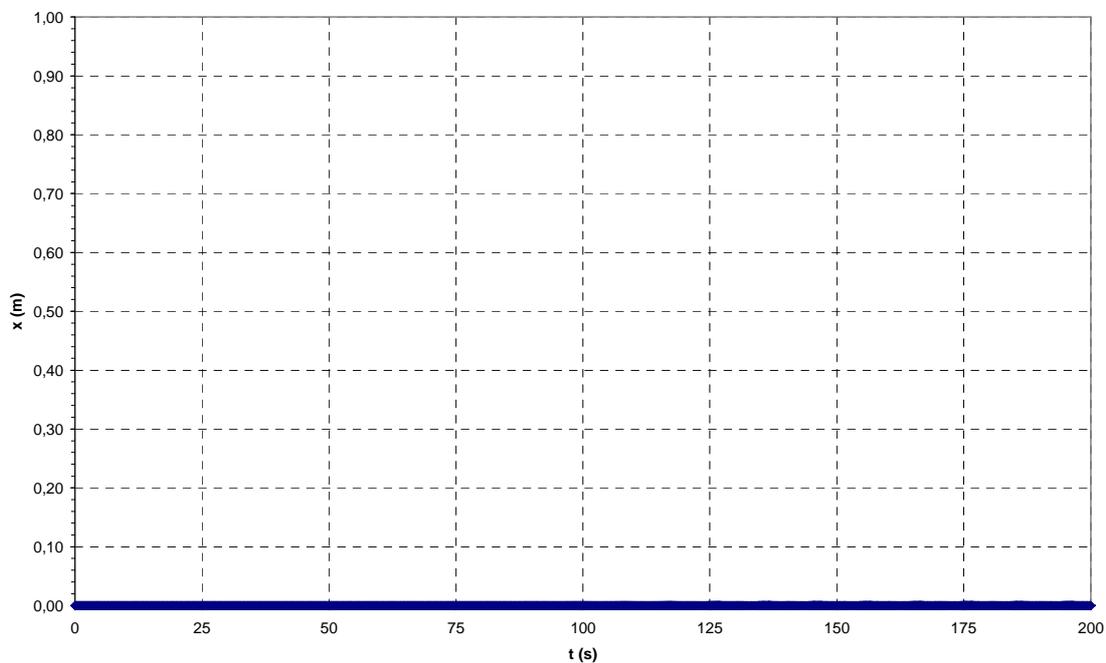


Figura 2-13 – Gráfico do comprimento de penetração de líquido em função do tempo, característico de SS3 ( $L = 5,1m$ ,  $W_g = 2E - 4kg / s$ ,  $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ).

Dos gráficos anteriores, verifica-se que, embora o ciclo limite já tenha sido atingido, quando a pressão na base do *riser* passa a oscilar com período e amplitude bem definidos (Figura 2-12), não há qualquer sinal de penetração da frente de líquido no *pipeline*, sendo  $x = 0$  sempre (Figura 2-13).

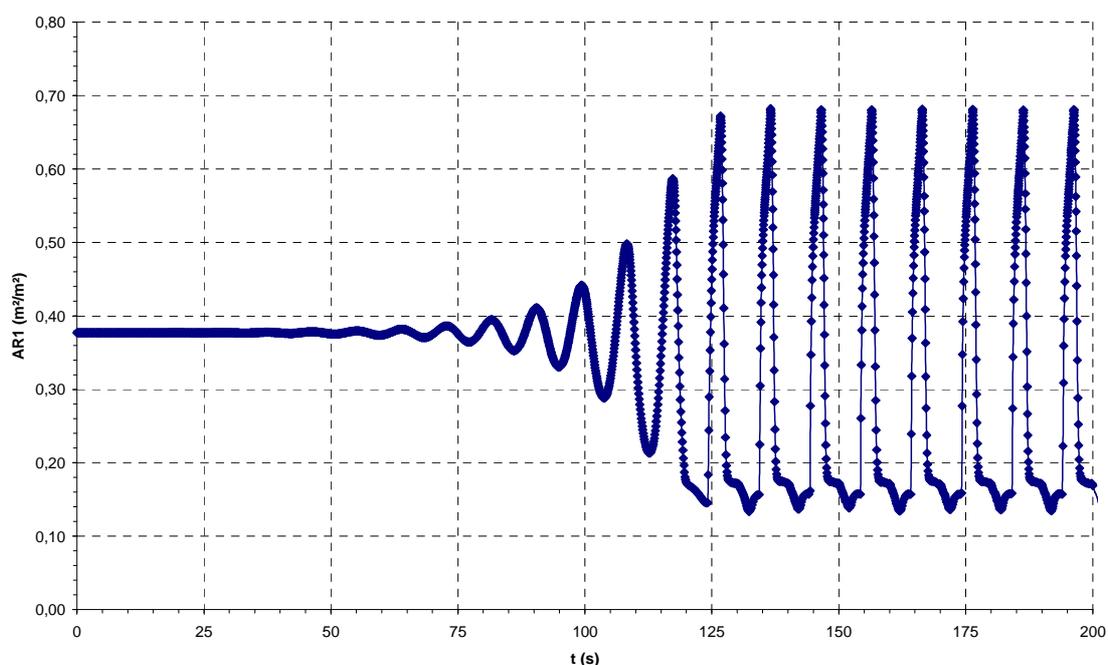


Figura 2-14 – Gráfico da fração de vazio na base do *riser* em função do tempo, característico de SS3 ( $L = 5,1m$ ,  $W_g = 2E - 4kg / s$ ,  $Q_l = 1E - 4m^3 / s$ ).

O gráfico da fração de vazio na base do *riser* em função do tempo (Figura 2-14) em uma situação típica de SS3, que oscila, porém sem nunca atingir o valor nulo, não deixa dúvidas quanto à penetração contínua de gás na interface *pipeline-riser*, caracterizando assim o fenômeno em análise.

### 3. APRESENTAÇÃO DO MODELO

O programa computacional utilizado para as simulações leva em conta um modelo desenvolvido considerando os seguintes subsistemas (BALIÑO, 2008):

- 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 ( $x$ ). Desta maneira, o conduto descendente pode se encontrar em dois estados: penetração contínua de gás ou penetração não-contínua 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;
- Região de gás no topo do *riser*, na condição na qual o *riser* não está cheio (o nível de líquido não atinge o topo);

No *pipeline*, o padrão de escoamento é assumido como sendo estratificado e bifásico (com duas fases), enquanto no *riser*, fatores de inércia são desprezados. Desta forma, a intermitência severa é controlada basicamente pela gravidade no *riser* e compressibilidade no *pipeline*.

Este modelo é ainda capaz de lidar com descontinuidades no escoamento, como por exemplo, acúmulo de líquido no *pipeline*.

As características do modelo permitem simular uma grande variedade de dados experimentais encontrados na literatura.

#### 3.1 Pipeline

Para a devida modelagem do escoamento no *pipeline*, têm-se as variáveis presentes no volume de controle expresso na Figura 3-1.

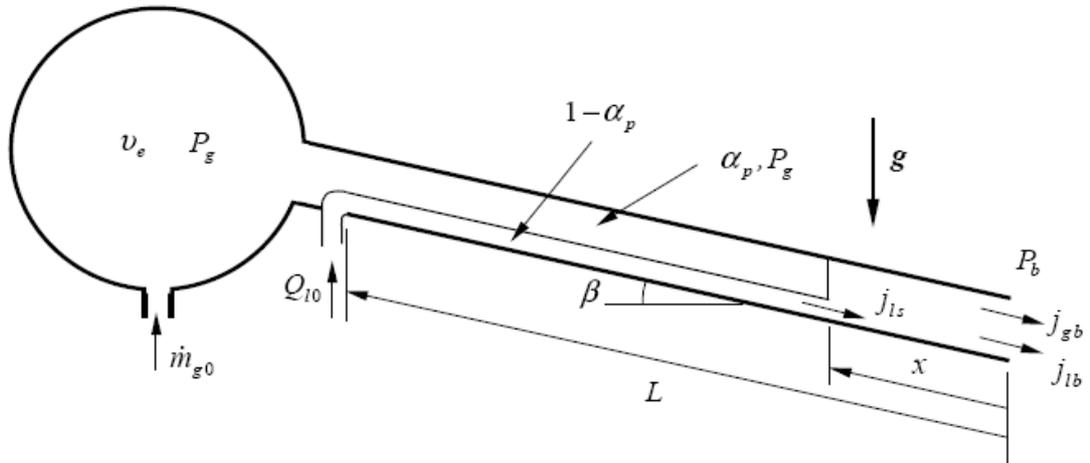


Figura 3-1 – Volume de controle para o *pipeline* (BALIÑO, 2008).

A priori, nota-se certa quantidade de gás na cavidade a uma pressão  $P_g$  e com um volume de *buffer*  $v_e$ . Ao invés de se trabalhar com este volume, define-se o parâmetro comprimento equivalente de *buffer* ( $L_e$ ), à luz da eq. (17):

$$L_e = \frac{v_e}{A} \quad (17)$$

sendo  $A$  a área da seção transversal do *pipeline*.

Outra variável que merece destaque especial é o comprimento de penetração de líquido ( $x$ ), que corresponde à descontinuidade do padrão estratificado do escoamento em função do acúmulo de líquido ao final do *pipeline* (base do *riser*).

Outras propriedades presentes no volume de controle do *pipeline* dizem respeito ao comprimento e à inclinação do conduto (respectivamente  $L$  e  $\beta$ ) à vazão mássica de gás na entrada do conduto ( $\dot{m}_{g0}$ ), à vazão volumétrica de líquido na entrada ( $Q_{l0}$ ), à fração de vazio do *pipeline* ( $\alpha_p$ ) e às velocidades superficiais das fases líquida e gasosa ( $j_l$  e  $j_g$ , respectivamente). O parâmetro  $b$  indica que determinada propriedade está sendo avaliada no final do *pipeline*, ou base do *riser*.

Há duas condições básicas nas quais o *pipeline* pode se encontrar durante a operação: a condição em que líquido penetra no conduto, implicando em não penetração de gás ( $x > 0$ ); e a condição de penetração contínua de gás ( $x = 0$ ).

### 3.1.1 Condição com penetração de líquido no *pipeline* ( $x > 0$ )

A equação de continuidade para a fase líquida (eq. (18)) é dada por:

$$\frac{dv_l}{dt} + u_{lb}A - Q_{l0} = 0 \quad (18)$$

$$v_l = A_l(L - x) + Ax \quad (19)$$

Para a fase gasosa, considerando-se que a velocidade de gás na saída é  $u_{gb} = 0$ , tem-se:

$$\frac{d}{dt}(\rho_g v_g) - \dot{m}_{g0} = 0 \quad (20)$$

$$v_g = A_g(L - x) + v_e \quad (21)$$

Considerando-se a hipótese de gás perfeito, vale a lei dos gases perfeitos, da Eq. (22):

$$P_g = \rho_g R_g T_g \quad (22)$$

Considerando-se variações hidrostáticas, a pressão na base do conduto  $P_b$  resulta em:

$$\boxed{P_b = P_g + \rho_l g x \text{sen}\beta} \quad (23)$$

Em termos das velocidades superficiais, definidas pelas eqs. (7) e (8), considerando-se que para o caso de  $x > 0$  só há líquido na saída do *pipeline*/base do *riser* ( $\alpha_b = 0$ ,  $j_b = u_{lb}$  e  $j_{gb} = 0$ ), e desprezando-se as variações da fração de vazio no *pipeline* ( $\alpha_p = \text{cte.}$ ), tem-se:

$$\boxed{\frac{dx}{dt} = \frac{Q_{l0} - j_{lb}}{\alpha_p}} \quad (24)$$

$$\boxed{\frac{dP_g}{dt} = \frac{-P_g \left( j_{lb} - \frac{Q_{l0}}{A} \right) + \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{g0}}{(L-x)\alpha_p + L_e}} \quad (25)$$

### 3.1.2 Condição sem penetração de líquido no *pipeline* ( $x = 0$ )

As equações de continuidade para as fases líquida e gasosa (Eq. (26) e (27), respectivamente) são dadas por:

$$-L \frac{d\alpha_p}{dt} + u_{lb}(1 - \alpha_p) - \frac{Q_{l0}}{A} = 0 \quad (26)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_g v_g) + \rho_{gb} u_{gb} A_{gb} - \dot{m}_{g0} = 0 \quad (27)$$

$$v_g = A_g L + v_e \quad (28)$$

Adotando-se procedimentos semelhantes aos da seção anterior, em termos das velocidades superficiais, definidas pelas Eq. (7) e (8), considerando-se que para o

caso de  $x = 0$  há penetração de gás na base do *riser* ( $P_b = P_g, \alpha_b = \alpha_g, j_{lb} = u_{lb}(1 - \alpha_p)$  e  $j_{gb} = u_{gb}\alpha_p$ ), e desprezando-se as variações da fração de vazio no *pipeline* ( $\alpha_p = cte.$ ), tem-se:

$$\boxed{j_{lb} = \frac{Q_{l0}}{A}} \quad (29)$$

$$\boxed{\frac{dP_g}{dt} = \frac{-P_g j_{gb} + \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{g0}}{L\alpha_p + L_e}} \quad (30)$$

### 3.1.3 Teoria de equilíbrio local para escoamento estratificado

A teoria de equilíbrio local para escoamento estratificado fornece uma relação algébrica entre as variáveis no *pipeline*, supondo que o padrão de escoamento é estratificado (TAITEL & DUKLER, 1976).

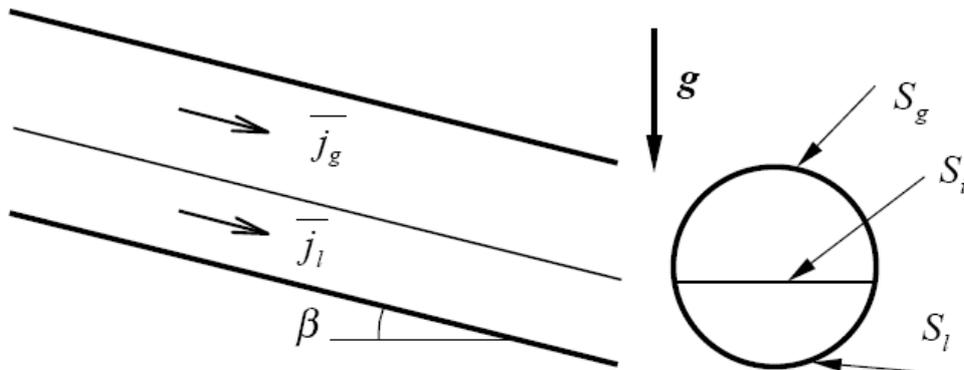


Figura 3-2 – Escoamento estratificado para a teoria de equilíbrio local (BALIÑO, 2008).

Na Figura 3-2, os parâmetros  $S_l$ ,  $S_g$  e  $S_i$  fazem menção, respectivamente, aos perímetros molhados de líquido, gás e interface gás-líquido. Do balanço de momento linear na direção do escoamento para as fases, resulta a seguinte equação:

$$\tau_{wg} \frac{S_g}{\alpha_p} - \tau_{wl} \frac{S_l}{1-\alpha_p} + \tau_i S_i \left( \frac{1}{1-\alpha_p} + \frac{1}{\alpha_p} \right) + (\rho_l - \rho_g) A g \sin\beta = 0 \quad (31)$$

sendo  $\tau_{wg}$ ,  $\tau_{wl}$  e  $\tau_i$  as tensões de cisalhamento entre o líquido e a parede, entre o gás e a parede e na interface gás-líquido. Os perímetros molhado e interfacial (através dos quais fica definida a fração de vazio) são determinados considerando-se geometria estratificada, enquanto as tensões de cisalhamento são relativas às velocidades das fases, considerando-se fatores de atrito. As variáveis devem satisfazer a relação algébrica da eq. (31).

### 3.2 Riser

Para o *riser*, tem-se o volume de controle definido na Figura 3-3.

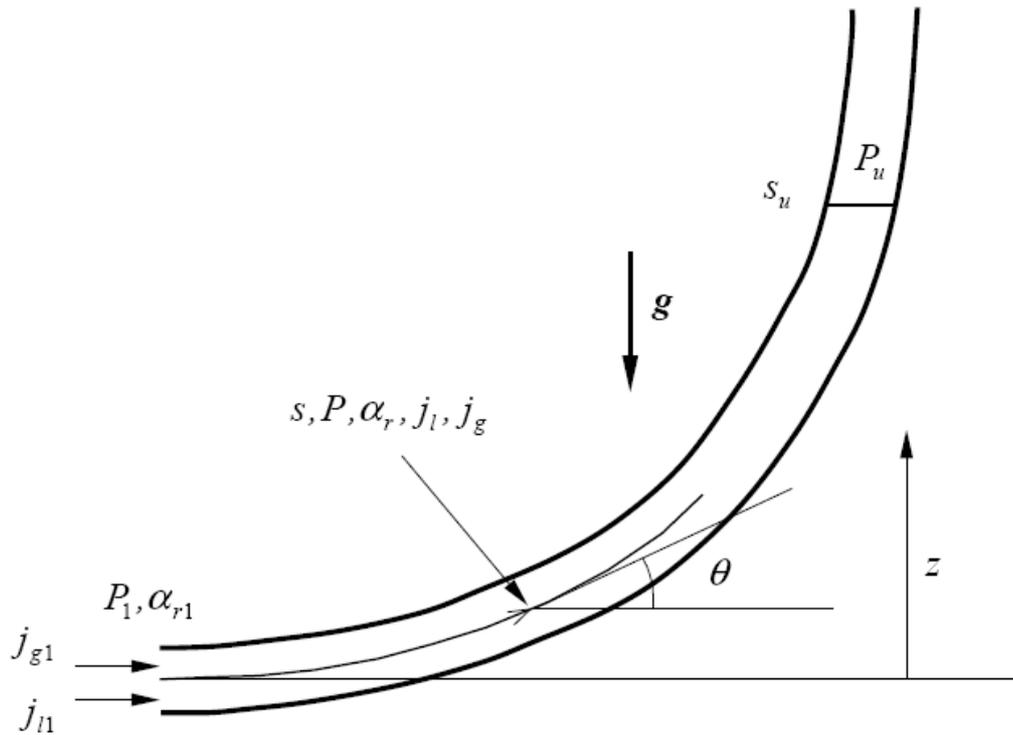


Figura 3-3 – Volume de controle do *riser* (BALIÑO, 2008).

O *riser* pode se encontrar cheio ou com nível de líquido inferior ao máximo da coluna. Assumindo-se escoamento unidimensional e supondo que não existe

transferência de massa por vaporização entre as fases, as equações de continuidade para o líquido e o gás são dadas por:

$$\boxed{-\frac{\partial \alpha_r}{\partial t} + \frac{\partial j_l}{\partial s} = 0} \quad (32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_r) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g j_g) = 0 \quad (33)$$

Da hipótese de gás perfeito (Eq. (22)), a equação da continuidade para o gás fica, em termos da pressão no riser ( $P$ ):

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial t}(P \alpha_r) + \frac{\partial}{\partial t}(P j_g) = 0} \quad (34)$$

No modelo de *riser* desenvolvido, utiliza-se a equação de momento linear da mistura, desprezando-se a inércia das fases e considerando-se a força gravitacional e o atrito com as paredes. Assim, tem-se:

$$\boxed{\frac{\partial P}{\partial t} = -\rho_m g \operatorname{sen} \theta - \frac{4\tau_w}{D}} \quad (34)$$

sendo  $\rho_m$  a massa específica da mistura gás-líquido, e  $\tau_w$  a tensão de cisalhamento com a parede. A tensão de cisalhamento é calculada através da utilização de um modelo homogêneo bifásico.

Como lei de fechamento, as diferentes velocidades das fases são determinadas utilizando-se de uma relação do modelo de fluxo de deriva (*drift flux*), válida localmente:

$$\boxed{u_g = \frac{j_g}{\alpha_r} = C_d j + U_d} \quad (35)$$

$$\boxed{j_l = j - j_g = u_l(1 - \alpha_r) = (1 - \alpha_r C_d)j + \alpha_r U_d} \quad (36)$$

sendo o parâmetro de distribuição  $C_d$  e a velocidade de deriva  $U_d$  funções das variáveis locais do escoamento.

### 3.2.1 Parâmetros de *drift*

Os parâmetros  $C_d$  e  $U_d$  ficam determinados de acordo com o número de Froude,  $F_{rj}$ , definido como:

$$F_{rj} = \frac{|j|}{\sqrt{gD}} \quad (37)$$

sendo  $j$  a velocidade superficial total. Existem duas condições básicas, apresentadas a seguir.

Para  $F_{rj} < 3,5$ :

$$C_d = 1,05 + 0,15 \operatorname{sen} \theta \quad (38)$$

$$U_d = \sqrt{gD}(0,35 \operatorname{sen} \theta + 0,54 \cos \theta) \quad (39)$$

Para  $F_{rj} \geq 3,5$ :

$$C_d = 1,2 \quad (40)$$

$$U_d = 0,35\sqrt{gD}\sin\theta \quad (41)$$

### 3.3 Garantia de continuidade entre *pipeline* e *riser*

As variáveis de estado para o *pipeline* são a pressão do gás e a posição da frente de líquido acumulado, enquanto que para o *riser*, são a pressão local, a fração de vazio e a velocidade superficial total. O *pipeline* impõe uma pressão e uma fração de vazio na base do *riser*, enquanto o *riser* impõe a velocidade superficial total ao *pipeline*. Estas variáveis são, desta forma, condições de contorno para os subsistemas correspondentes. Outras condições de contorno adicionais são as vazões volumétricas de líquido e mássica de gás no *pipeline*, além da pressão de separação no topo do *riser*.

## 4. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

O programa computacional utilizado foi desenvolvido em um projeto anterior, em parceria com a Petrobrás, sendo que no escopo desta primeira parte deste projeto está apenas a utilização do mesmo como usuário, variando-se condições de entrada e analisando resultados obtidos. O programa foi confeccionado em linguagem FORTRAN.

### 4.1 Discretização

Para a resolução das equações de conservação, utiliza-se o método implícito, com esquema preditor-corretor para o tratamento das não-linearidades. A priori, a condição de partida do programa é a solução de estado estacionário do problema. O procedimento está fundamentado na iteração da velocidade superficial no último nó do *riser*, até que se atinja a convergência nas pressões e frações de vazio. O procedimento seguido pelo programa pode ser resumido nas seguintes etapas (BALIÑO, 2008):

Primeiramente, faz-se a discretização espacial do sistema, definindo-se o número de nós. Assim, o estado permanente é calculado, sendo utilizado como condição inicial.

Em seguida, determina-se o passo temporal, baseado nas velocidades do gás nos nós do *riser*, a posição e a velocidade da superfície de líquido.

Em seqüência, recalculam-se as novas posições dos nós depois do deslocamento com a velocidade de gás.

Faz-se 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.

Por fim, atualizam-se os valores calculados, e é feita a devida comparação se

todas as variáveis no passo K+1 são iguais às do passo K (dentro da precisão especificada), até que a convergência global seja devidamente atingida.

## 4.2 Entrada de dados

A entrada dos dados é feita através da leitura pelo programa dos valores contidos no arquivo SLUGGIN.DAT. Os parâmetros de entrada são os seguintes:

AMUG: viscosidade do gás ( $\mu_g$ );

AMUL: viscosidade do líquido ( $\mu_l$ );

ROL: massa específica do líquido ( $\rho_l$ );

GRAV: aceleração gravitacional ( $g$ );

RG: constante do gás ( $R_g$ );

TG: temperatura absoluta do gás ( $T_g$ );

AL: comprimento do *pipeline* ( $L$ );

ALEQ: comprimento equivalente de conduto *buffer* ( $L_e$ );

DIAM: diâmetro interno do *pipeline* ( $D$ );

EPS: rugosidade do *pipeline* e do *riser*;

BETA: ângulo de inclinação do *pipeline*, em graus ( $\beta$ );

IGEOMRISER: índice de geometria do *riser*. IGEOMRISER=1 para *riser* com inclinação constante, IGEOMRISER=2 para *riser* em catenária.

ZRISERD: altura do topo do *riser* ( $Z$ );

TETARISERGRAD ou XRISERD: ângulo constante, em graus sexagesimais do *riser*, para IGEOMRISER=1 ( $\theta$ ) ou abscissa do topo do *riser*, para

IGEOMRISER=2 ( X );

QL0: vazão volumétrica de líquido ( $Q_{l0}$ );

AMG0D: vazão mássica de gás ( $\dot{m}_{g0}$ );

PSD: pressão absoluta de separação ( $P_s$ );

DTKD: passo temporal máximo;

TIMEMAXD: tempo máximo de simulação;

EPSCONV: fator de convergência;

UNREL: fator de sub-relaxamento;

N: número de nós;

DAJU: incremento de velocidade superficial adimensional no esquema de convergência;

IWRITE: índice de escritura. Se IWRITE=0, são impressos um arquivo com os dados básicos (SLUGGING.OUT) e um arquivo com a evolução temporal de um conjunto de variáveis principais (MAIN\_RESULTS.OUT). Se IWRITE=1, são impressos os arquivos anteriores e os arquivos com a evolução temporal de todas as variáveis em cada um dos nós.

### **4.3 Saída de dados**

A saída de dados está amparada basicamente por dois arquivos: o SLUGGING.OUT, que mostra os dados de entrada utilizados na simulação, além de um conjunto de parâmetros geométricos e correspondentes ao estado permanente; e o arquivo MAIN\_RESULTS.OUT, que mostra a evolução temporal dos seguintes parâmetros:

TIME: tempo ( $t$ );

PG: pressão absoluta do gás no *pipeline* ( $P_g$ );

AP: fração de vazio no *pipeline* ( $\alpha_p$ );

X: comprimento de penetração de líquido no *pipeline* ( $x$ );

PB: pressão na base do *riser* ( $P_b$ );

DXDT: derivada do comprimento de penetração no *pipeline* ( $\frac{dx}{dt}$ );

AJB: velocidade superficial total na base do *riser* ( $j_b$ );

AJGB: velocidade superficial do gás na base do *riser* ( $j_{gb}$ );

AJLB: velocidade superficial do líquido na base do *riser* ( $j_{lb}$ );

ARB: fração de vazio na base do *riser* ( $\alpha_{rb}$ );

SU: posição da fronteira de líquido no *riser* ( $s_u$ );

ZU: altura da fronteira de líquido no *riser* ( $z_u$ );

ARU: fração de vazio na fronteira de líquido no *riser* ( $\alpha_{ru}$ );

AJU: velocidade superficial total na fronteira de líquido no *riser* ( $j_u$ );

AJGU: velocidade superficial do gás na fronteira de líquido no *riser* ( $j_{ju}$ );

AJLU: velocidade superficial do líquido na fronteira de líquido no *riser* ( $j_{lu}$ );

ULU: velocidade do líquido na fronteira de líquido no *riser* ( $u_{lu}$ );

AJT: velocidade superficial total no topo do *riser* ( $j_t$ );

AJGT: velocidade superficial do gás no topo do *riser* ( $j_{gt}$ );

AJLT: velocidade superficial do líquido no topo do *riser* ( $j_{lt}$ );

ART: fração de vazio no topo do *riser* ( $\alpha_{rt}$ );

PT: pressão no topo do *riser* ( $P_t$ );

PS: pressão no separador ( $P_s$ ).

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Simulações Computacionais

A título de comparação, foram utilizados dados experimentais contidos em Taitel *et al.* (1990), onde, utilizando-se água e ar como fluidos, foi utilizado um sistema cujas principais características são:

- Conduto (*pipeline*) com 9.1 m de comprimento, conectado a um *riser* de 3 m de altura, ambos com um diâmetro de 2,54 cm;
- O *pipeline* é conectado ao *riser* através de uma espécie de mangueira flexível, sendo assim possível que seja inclinado de uma angulação entre -5° e 5°;
- O *riser* é ligado a um tubo de 4,6 m de altura e 20,3 cm de diâmetro, que funciona como uma espécie de separador;
- Comprimentos de *buffer* adicionais ao *pipeline*,  $L_e$ , são obtidos através de dois tanques de volume variável, podendo ser usados sozinhos ou juntos, em paralelo. O volume de gás nos tanques pode ser facilmente controlado através do ajuste da quantidade de gás nos tanques.

Um esboço do aparato experimental utilizado pode ser contemplado na Figura 5-1.

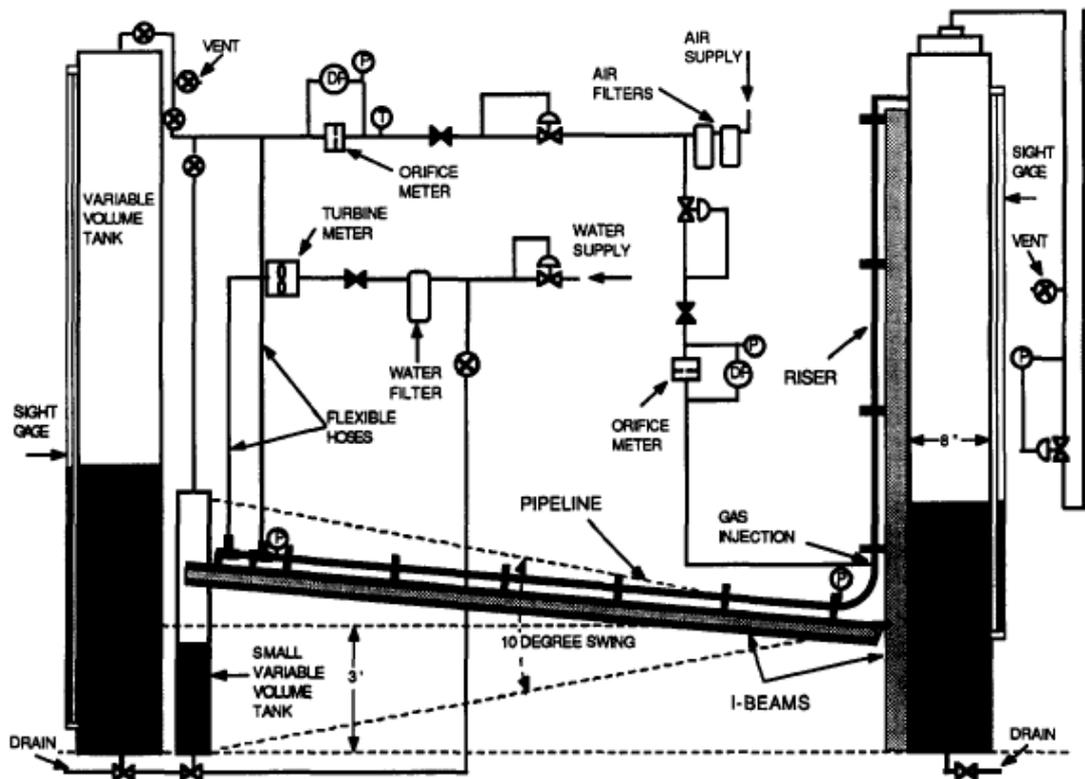


Figura 5-1: Aparato experimental (TAITEL et al., 1990)

Foram feitas simulações para três casos de comprimento de *buffer* ( $L_e$ ), variando-se os valores das velocidades superficiais das fases e mantendo-se constantes os demais parâmetros. Os parâmetros comuns aos três casos são:

- Viscosidade do gás:  $\mu_g = 1,8 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$ ;
- Viscosidade do líquido (água):  $\mu_l = 1,0 \times 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}$ ;
- Massa específica do líquido (água):  $\rho_l = 1,0 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$ ;
- Aceleração da gravidade:  $g = 9,8 \frac{m}{s^2}$ ;

- Constante do gás:  $R = 287 \frac{m^2}{s^2 \cdot K}$  ;
- Temperatura absoluta do gás:  $T_g = 298K$  ;
- Comprimento do *pipeline* descendente:  $L = 9,14m$  ;
- Diâmetro interno do *pipeline*:  $D = 2,54 \times 10^{-2} m$  ;
- Inclinação do *pipeline*:  $\beta = 5^\circ$  ;
- Altura do separador:  $Z = 3m$  ;
- Pressão absoluta de separação:  $P = P_{atm} = 1 \times 10^5 Pa$  ;
- Número de nós:  $N = 51$  .

Assim, foram avaliados o máximo comprimento de penetração,  $x_{max}$  e o período de cada ciclo do fenômeno de intermitência severa,  $T_{ciclo}$ . Assim, os resultados puderam ser comparados com o experimental e com aqueles obtidos por Taitel *et al.* (1990).

### 5.1.1 Simulações para comprimento de *buffer* 1,69 m

Para o primeiro caso, utilizou-se um comprimento de *buffer*  $L_e = 1,69 m$ , obtendo-se resultados expressos na Tabela 5-1, sendo que as células em que consta o valor “NA” representam parâmetros não avaliadas na ocasião do experimento.

Tabela 5-1: Comparação entre resultados experimentais e numéricos para  $L_e = 1,69 m$ .

$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)	Experimental		Numérico (simulações)				Numérico (Taitel)			
		$x_{max}$ (m)	$T_{ciclo}$ (s)	$x_{max}$ (m)	Erro	$T_{ciclo}$ (s)	Erro	$x_{max}$ (m)	Erro	$T_{ciclo}$ (s)	Erro
0,063	0,124	NA	24	0,33	-	24	1%	0,28	-	22	-8%
0,064	0,209	0,61	20	0,31	-49%	18	-8%	0,23	-62%	17	-17%

0,123	0,183	NA	15	0,18	-	15	-2%	0,15	-	14	-9%
0,124	0,212	NA	14	0,22	-	14	-2%	0,16	-	13	-9%
0,062	0,679	NA	6	0	-	7	-10%	0	-	6	3%
0,063	0,367	0,53	13	0,15	-72%	12	-8%	0,1	-81%	11	-17%
0,063	0,679	NA	9	0	-	7	-28%	0	-	6	-36%
0,064	0,535	NA	10	0,56	-	8	-17%	0,03	-	7	-26%
0,065	0,226	0,63	19	0,29	-54%	17	-9%	0,21	-67%	16	-17%
0,122	0,374	NA	11	0,13	-	10	-11%	0,07	-	9	-19%
0,123	0,621	NA	8	0	-	7	-15%	0	-	0	-
0,126	0,228	NA	13	0,22	-	13	-0%	0,15	-	12	-7%
0,187	0,226	NA	11	0	-	11	-2%	0,01	-	10	-8%
0,188	0,466	NA	8	0	-	7	-9%	0	-	7	-19%
0,188	0,502	NA	7	0	-	7	0%	0	-	0	-
0,19	0,312	NA	10	0,07	-	9	-8%	0,02	-	8	-16%
0,058	0,705	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,063	0,698	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,122	0,73	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,126	0,673	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,126	0,085	0	0	0	-	18	-	0	-	0	-
0,184	0,127	0	0	0	-	13	-	0	-	0	-
0,185	0,161	0	0	0	-	12	-	0	-	0	-
0,187	0,551	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,188	0,755	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,19	0,685	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,313	0,433	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,314	0,347	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,319	0,614	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,321	0,744	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,43	0,604	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-
0,433	0,701	0	0	0	-	0	-	0	-	0	-

### 5.1.2 Simulações para comprimento de *buffer* 5,1 m

Para o segundo caso, utilizou-se um comprimento de *buffer*  $L_e = 5,1m$ , obtendo-se resultados expressos na Tabela 5-2.

Tabela 5-2: Comparação entre resultados experimentais e numéricos para  $L_e = 5,1m$ .

$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)	Experimental		Numérico (simulações)				Numérico (Taitel)			
		$x_{\max}$ (m)	$T_{ciclo}$ (s)	$x_{\max}$ (m)	Erro	$T_{ciclo}$ (s)	Erro	$x_{\max}$ (m)	Erro	$T_{ciclo}$ (s)	Erro
0,06	0,252	1,42	33	1,18	-17%	35	6%	1,25	-12%	36	9%
0,061	0,23	1,35	32	1,20	-11%	37	15%	1,26	-6%	38	18%
0,063	0,26	1,3	34	1,17	-10%	34	-1%	1,24	-4%	39	14%
0,064	0,121	0,94	39	0,90	-4%	44	13%	0,96	2%	45	16%
0,064	0,187	1,24	34	1,13	-9%	39	14%	1,22	-2%	40	18%
0,125	0,231	0,77	19	0,80	4%	21	11%	0,87	13%	21	12%
0,126	0,284	0,58	20	0,63	9%	22	12%	0,68	17%	23	14%
0,126	0,253	0,84	19	0,85	1%	20	7%	0,93	11%	21	8%
0,187	0,254	0	14	0,52	-	15	6%	0,56	-	15	5%
0,187	0,25	0	14	0,51	-	15	8%	0,55	-	15	6%
0,066	0,063	0	40	0,30	-	48	20%	0,26	-	48	19%
0,063	0,32	1,24	27	1,10	-11%	29	6%	1,12	-10%	28	5%
0,064	0,301	1,27	28	1,12	-12%	30	8%	1,16	-8%	30	6%
0,065	0,307	1,24	27	1,08	-13%	29	7%	1,15	-7%	29	8%
0,127	0,314	0,91	16	0,93	2%	18	15%	1,01	11%	18	14%
0,155	0,309	0,76	14	0,79	4%	16	13%	0,88	15%	16	14%
0,186	0,229	0	14	0,44	-	16	11%	0,46	-	15	9%
0,188	0,303	0,65	14	0,65	0%	14	0%	0,7	8%	14	-1%
0,25	0,311	0	11	0,41	-	11	4%	0,43	-	11	-2%
0,062	0,688	0,81	11	0,40	-51%	12	5%	0,39	-53%	10	-2%
0,063	0,624	0,84	12	0,48	-43%	13	11%	0,47	-44%	12	1%
0,064	0,378	1,22	24	0,96	-21%	25	2%	0,98	-20%	24	0%
0,064	0,333	1,23	26	1,06	-14%	27	5%	1,1	-11%	27	4%
0,065	0,546	0,89	13	0,61	-68%	16	21%	0,59	-34%	15	9%
0,065	0,369	1,22	24	0,99	-19%	25	3%	1	-18%	24	0%
0,066	0,433	0,85	21	0,84	-1%	21	0%	0,83	-2%	20	-5%
0,126	0,342	0,93	15	0,95	2%	18	19%	1,03	11%	18	20%
0,126	0,525	0,99	11	0,76	-23%	13	16%	0,79	-20%	12	5%
0,126	0,662	0,86	10	0,58	-33%	10	0%	0,59	-32%	9	-9%
0,188	0,321	0,66	13	0,69	5%	14	5%	0,74	12%	13	7%
0,189	0,482	0,97	11	0,73	-25%	11	-1%	0,84	-13%	10	-3%
0,189	0,391	0,86	12	0,77	-10%	13	4%	0,85	-2%	12	5%

0,189	0,324	0,69	13	0,69	0%	14	4%	0,75	9%	13	5%
0,19	0,66	0,84	9	0,57	-32%	9	-4%	0,62	-26%	8	-15%
0,309	0,469	0,57	9	0,44	23%	8	-8%	0,53	-9%	8	-17%
0,309	0,673	0,53	8	0,40	25%	7	-16%	0,48	-9%	6	-28%
0,09	0,064	0	0	0,01	-	37	-	0	-	0	-
0,124	0,064	0	0	0	-	30	-	0	-	0	-
0,124	0,123	0	0	0,26	-	25	-	0,27	-	25	-
0,182	0,065	0	0	0	-	20	-	0	-	0	-
0,185	0,184	0	0	0,22	-	16	-	0,24	-	16	-
0,186	0,125	0	0	0	-	18	-	0	-	0	-
0,247	0,255	0	0	0,24	-	12	-	0,24	-	12	-
0,248	0,23	0	0	0,14	-	12	-	0,12	-	12	-
0,25	0,186	0	0	0,01	-	13	-	0	-	0	-
0,28	0,23	0	0	0,05	-	11	-	0	-	0	-
0,307	0,257	0	0	0,05	-	10	-	0	-	0	-
0,31	0,316	0	0	0,23	-	10	-	0,18	-	9	-
0,338	0,309	0	0	0,12	-	9	-	0,05	-	8	-
0,377	0,308	0	0	0	-	9	-	0	-	0	-

### 5.1.3 Simulações para comprimento de *buffer* 10 m

Por fim, para o terceiro caso, utilizou-se um comprimento de *buffer*  $L_e = 10m$ , obtendo-se resultados expressos na Tabela 5-3.

Tabela 5-3: Comparação entre resultados experimentais e numéricos para  $L_e = 10m$ .

$j_g$	$j_l$	Experimental		Numérico (simulações)				Numérico (Taitel)			
		$x_{max}$	$T_{ciclo}$	$x_{max}$	Erro	$T_{ciclo}$	Erro	$x_{max}$	Erro	$T_{ciclo}$	Erro
(m/s)	(m/s)	(m)	(s)	(m)		(s)		(m)		(s)	
0,061	0,064	0,85	56	0,89	5%	71	28%	0,94	10%	73	31%
0,062	0,191	1,79	47	2,14	20%	64	35%	2,37	32%	68	45%
0,063	0,247	1,98	47	2,29	16%	59	26%	2,64	33%	66	39%
0,063	0,405	1,66	36	2,50	51%	51	41%	3,22	94%	62	72%
0,064	0,157	1,8	50	1,90	6%	63	26%	2,09	16%	67	34%
0,094	0,064	0	39	0,28	-	47	21%	0,29	-	48	22%
0,123	0,357	1,42	23	1,98	39%	29	28%	2,4	69%	32	39%
0,124	0,157	0,97	27	1,11	14%	34	25%	1,22	26%	35	29%
0,157	0,249	1,17	21	1,40	20%	25	20%	1,58	35%	27	26%
0,185	0,118	0	21	0,15	-	24	14%	0,15	-	24	13%
0,185	0,155	0	20	0,53	-	23	17%	0,57	-	23	17%

0,186	0,351	1,07	16	1,57	47%	20	27%	1,88	76%	22	35%
0,232	0,351	0,97	14	1,30	34%	17	19%	1,52	58%	17	23%
0,233	0,147	0	16	0,12	-	19	19%	0,12	-	19	17%
0,247	0,349	0,94	14	1,21	29%	16	13%	1,41	50%	16	15%
0,249	0,246	0,61	15	0,74	21%	17	12%	0,83	36%	17	12%
0,304	0,339	0,77	12	0,89	16%	14	13%	1,03	32%	13	11%
0,311	0,249	0	13	0,43	-	14	8%	0,45	-	13	4%
0,124	0,065	0	32	0,01	-	37	17%	0	-	-	-
0,185	0,078	0	24	0,00	-	27	12%	0	-	-	-
0,185	0,066	0	24	0,00	-	29	20%	0	-	-	-
0,229	0,067	0	20	0,00	-	24	18%	0	-	-	-
0,23	0,091	0	19	0,00	-	22	16%	0	-	-	-
0,246	0,087	0	18	0,00	-	21	14%	0	-	-	-
0,062	0,433	1,65	36	2,44	48%	50	39%	3,32	101%	62	73%
0,064	0,538	1,65	29	2,45	48%	40	38%	3,58	117%	58	99%
0,124	0,414	1,47	20	2,11	44%	28	38%	2,64	79%	31	57%
0,124	0,523	1,22	14	2,22	82%	25	77%	3,03	148%	30	116%
0,184	0,513	1,22	12	1,88	54%	18	52%	2,52	107%	21	71%
0,187	0,375	1,09	15	1,64	50%	20	33%	1,98	81%	21	42%
0,228	0,405	1,14	13	1,49	31%	16	25%	1,8	58%	17	33%
0,23	0,543	1,24	12	1,74	40%	15	23%	2,33	87%	16	36%
0,245	0,527	1,22	11	1,68	38%	14	27%	2,18	79%	15	40%
0,247	0,416	1,16	12	1,42	22%	15	27%	1,72	49%	16	32%
0,307	0,532	1,09	11	1,44	32%	12	6%	1,85	69%	12	12%
0,313	0,385	0,89	12	1,01	13%	13	5%	1,2	35%	13	6%
0,247	0,158	0	0	0,13	-	18	-	0,14	-	17	-
0,28	0,071	0	0	0,00	-	19	-	0	-	0	-
0,308	0,149	0	0	0,00	-	15	-	0	-	0	-
0,327	0,108	0	0	0,00	-	15	-	0	-	0	-

#### 5.1.4 Resumo das simulações

Um resumo dos desvios encontrados pode ser encontrado na Tabela 5-4.

Tabela 5-4: Desvio das simulações em relação aos dados experimentais.

$L_e$ (m)	$x_{\max}$			$T_{\text{ciclo}}$		
	Erro Mínimo	Erro Máximo	Erro Médio	Erro Mínimo	Erro Máximo	Erro Médio
1,69	49%	72%	58%	0%	28%	8%
5,1	0%	68%	16%	0%	21%	8%
10	5%	82%	33%	5%	77%	24%

Para o primeiro caso, com  $L_e = 1,69m$ , não existem muitos dados experimentais de  $x_{\max}$  para que uma comparação mais profunda possa ser feita, entretanto, para os valores disponíveis, nota-se desvios relativamente grandes, dentro do intervalo de 49 % a 72 %, com uma média em torno de 58 %. Já para o período de cada ciclo, resultados satisfatórios foram encontrados, muito semelhantes àqueles obtidos da amostragem experimental, com um erro médio de 8 %, variando entre 0 % e 28 %.

Para o caso de  $L_e = 5,1m$ , foram obtidos os melhores resultados se comparado aos outros casos, tanto em termos de  $x_{\max}$ , com um desvio variando entre 0 % e 68 % e média de 16 %, quanto  $T_{\text{ciclo}}$ , que ficaram entre 0 % e 21 %, com média 8 %.

Ao contrário do primeiro caso, as simulações com  $L_e = 10m$  resultaram em erros não tão altos de  $x_{\max}$ , quando comparados aos outros casos, porém com desvios superiores para o período dos ciclos. Para  $x_{\max}$ , o erro variou entre 5 % e 82 %, com uma média de 33 %; já para  $T_{\text{ciclo}}$ , a oscilação ocorreu entre 3 % e 68 %, com uma média de 24 %.

## 5.2 Mapas de estabilidade

### 5.2.1 Procedimento de obtenção das curvas de estabilidade

Tomando-se ainda como base os valores de comprimento de *buffer* utilizados nas simulações expressas na Tabela 5-1, Tabela 5-2 e Tabela 5-3, respectivamente  $L_e = 1,69m$ ,  $L_e = 5,1m$  e  $L_e = 10m$ , foram confeccionados mapas de estabilidade em função das vazões volumétrica de líquido e mássica de gás, mantendo-se os demais dados de entrada. Desta forma, torna-se possível verificar a região de instabilidade do sistema para cada situação, além de se fazer uma avaliação da variação dessa região conforme se varia o comprimento de *buffer*. Ainda dentro de cada região de instabilidade, foram identificadas regiões que caracterizam o tipo de instabilidade ocorrente, entre SS1, SS2 e SS3.

Os valores utilizados para a definição das fronteiras de estabilidade foram obtidos através do seguinte procedimento:

I. Os dados experimentais contidos em Taitel *et al.* (1990) foram plotados, cada ponto de acordo com sua devida classificação entre estável ou instável, afim de que se norteasse o início das simulações;

II. Dependendo da região em que se desejava encontrar o ponto da fronteira de estabilidade, foram fixados valores de vazão mássica ou vazão volumétrica;

III. Fixado-se um parâmetro de vazão, o outro era variado entre a zona de intermitência e a região de escoamento estável, realizando-se procedimentos de bissecção até que a precisão de 5% fosse atingida, ou seja, até que se obtivesse  $\frac{\Delta Q_l}{Q_l} \leq 0,05$  ou  $\frac{\Delta W_g}{W_g} \leq 0,05$ , dependendo-se de qual valor estivera sendo variável;

IV. Quando a desigualdade era verdadeira, o ponto escolhido se dava pela média aritmética entre os valores de vazão, além do outro parâmetro fixado anteriormente;

V. O procedimento foi repetido de modo a se conseguir tantos pontos quanto necessário para a confecção da curva de fronteira entre as zonas de estabilidade e intermitência.

### **5.2.2 Procedimento de obtenção das curvas SS2-SS3**

Para confecção da fronteira entre as regiões de SS2 e SS3, foi adotado um procedimento semelhante ao contido nos passos III a V do item 5.2.1. Para identificação do tipo de intermitência severa, entre SS2 ou SS3 foi adotado o seguinte critério:

I. A princípio, analisava-se o gráfico de pressão na base do *riser* em função do tempo, de modo a se conferir se o ciclo-limite havia sido atingido, caracterizando estado de regime permanente;

II. Verificava-se o gráfico do comprimento de penetração de líquido no *pipeline*

em função do tempo. Caso fosse constante e nulo, estaria caracterizado a intermitência severa do tipo SS3; caso contrário, teria-se SS2.

### 5.2.3 Procedimento de obtenção das curvas SS1-SS2

Para obtenção da fronteira entre as regiões de SS1 e SS2, foi adotado, novamente, um procedimento semelhante ao descrito nos passos III a V do item 5.2.1. Para identificação do tipo de intermitência severa, entre SS1 ou SS2 foi adotado um critério baseado no comprimento total de *slug* ( $L_{slug}$ ) obtido no período de tempo em que a fração de vazio na fronteira de líquido no *riser* ( $\alpha_{ru}$ ) é nula. Para a determinação do comprimento total do *slug*, utilizou-se a definição da eq. (42).

$$L_{slug} = \int_{\Delta t} j_{lu} dt \quad (42)$$

Como se tem em questão um processo discreto, a integral, e conseqüentemente o comprimento do *slug*, pode ser aproximada por:

$$L_{slug} \approx \sum_{\Delta t} 0,5 \cdot (j_{lu,k} + j_{lu,k+1}) \cdot (t_{k+1} - t_k) \quad (43)$$

O intervalo  $\Delta t$  da equação (43) é definido pelo período de tempo em que se tem  $\alpha_{ru} = 0$ , a partir do momento em que o ciclo-limite é atingido. Assim, sendo  $L_{riser}$  o comprimento total do *riser*, que neste caso é de 3 metros, caso se tenha  $L_{slug} > L_{riser}$ , fica caracterizado SS1; em caso contrário, tem-se SS2.

### 5.2.4 Mapa de estabilidade para comprimento de *buffer* 1,69 m

Para o comprimento de *buffer*  $L_e = 1,69m$ , tem-se, de Taitel *et al.* (1990), os pontos experimentais e suas devidas classificações expressos na Tabela 5-5.

Tabela 5-5 – Dados experimentais para  $L_e = 1,69m$  (TAITEL *et al.*, 1990).

$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	<b>Resultado</b>
0,063	0,124	3,77E-05	6,28E-05	Instável
0,064	0,209	3,83E-05	1,06E-04	Instável
0,123	0,183	7,36E-05	9,27E-05	Instável
0,124	0,212	7,42E-05	1,07E-04	Instável
0,062	0,679	3,71E-05	3,44E-04	Instável
0,063	0,367	3,77E-05	1,86E-04	Instável
0,063	0,679	3,77E-05	3,44E-04	Instável
0,064	0,535	3,83E-05	2,71E-04	Instável
0,065	0,226	3,89E-05	1,15E-04	Instável
0,122	0,374	7,30E-05	1,90E-04	Instável
0,123	0,621	7,36E-05	3,15E-04	Instável
0,126	0,228	7,54E-05	1,16E-04	Instável
0,187	0,226	1,12E-04	1,15E-04	Instável
0,188	0,466	1,12E-04	2,36E-04	Instável
0,188	0,502	1,12E-04	2,54E-04	Instável
0,19	0,312	1,14E-04	1,58E-04	Instável
0,058	0,705	3,47E-05	3,57E-04	Instável
0,063	0,698	3,77E-05	3,54E-04	Estável
0,122	0,73	7,30E-05	3,70E-04	Estável
0,126	0,673	7,54E-05	3,41E-04	Estável
0,126	0,085	7,54E-05	4,31E-05	Estável
0,184	0,127	1,10E-04	6,44E-05	Estável
0,185	0,161	1,11E-04	8,16E-05	Estável
0,187	0,551	1,12E-04	2,79E-04	Estável
0,188	0,755	1,12E-04	3,83E-04	Estável
0,19	0,685	1,14E-04	3,47E-04	Estável
0,313	0,433	1,87E-04	2,19E-04	Estável
0,314	0,347	1,88E-04	1,76E-04	Estável
0,319	0,614	1,91E-04	3,11E-04	Estável
0,321	0,744	1,92E-04	3,77E-04	Estável
0,43	0,604	2,57E-04	3,06E-04	Estável
0,433	0,701	2,59E-04	3,55E-04	Estável

Adotando-se o procedimento já descrito anteriormente, foram realizadas no total 65 simulações, de modo a se obter 9 pontos para a curva de estabilidade, expressos na Tabela 5-6.

Tabela 5-6 – Pontos para a construção da curva de estabilidade ( $L_e = 1,69m$ ).

	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)
<b>1</b>	5,98E-08	3,32E-04	0,000	0,655
<b>2</b>	2,00E-06	3,38E-04	0,003	0,668
<b>3</b>	5,00E-05	2,97E-04	0,084	0,586
<b>4</b>	8,00E-05	2,69E-04	0,134	0,531
<b>5</b>	1,23E-04	2,00E-04	0,205	0,395
<b>6</b>	1,28E-04	1,50E-04	0,214	0,296
<b>7</b>	1,30E-04	1,00E-04	0,218	0,197
<b>8</b>	1,23E-04	6,00E-05	0,206	0,118
<b>9</b>	1,01E-04	1,00E-05	0,168	0,020

Semelhantemente, foram realizadas no total 28 simulações, de modo a se obter 9 pontos para a curva de transição entre SS2 e SS3, expressos na Tabela 5-7.

Tabela 5-7 – Pontos para a construção da curva SS2-SS3 ( $L_e = 1,69m$ ).

	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)
<b>1</b>	5,98E-08	3,32E-04	0,000	0,655
<b>2</b>	2,00E-06	3,24E-04	0,003	0,638
<b>3</b>	5,00E-05	2,81E-04	0,084	0,554
<b>4</b>	8,00E-05	2,44E-04	0,134	0,482
<b>5</b>	1,07E-04	2,00E-04	0,179	0,395
<b>6</b>	1,26E-04	1,50E-04	0,211	0,296
<b>7</b>	1,12E-04	1,00E-04	0,187	0,197
<b>8</b>	7,80E-05	6,00E-05	0,130	0,118
<b>9</b>	2,15E-05	1,00E-05	0,036	0,020

Foram ainda realizadas no total 32 simulações, de modo a se obter 6 pontos para a curva de transição entre SS1 e SS2, expressos na Tabela 5-8.

Tabela 5-8 – Pontos para a construção da curva SS1-SS2 ( $L_e = 1,69m$ ).

	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)
<b>1</b>	2,00E-06	1,95E-04	0,003	0,385
<b>2</b>	2,54E-05	1,50E-04	0,042	0,296
<b>3</b>	3,90E-05	1,00E-04	0,065	0,197

<b>4</b>	3,90E-05	6,00E-05	0,065	0,118
<b>5</b>	2,00E-05	2,85E-05	0,033	0,056
<b>6</b>	1,00E-05	2,33E-05	0,017	0,046

Desta forma, o mapa de estabilidade para  $L_e = 1,69m$  pode ser visualizado na Figura 5-2.

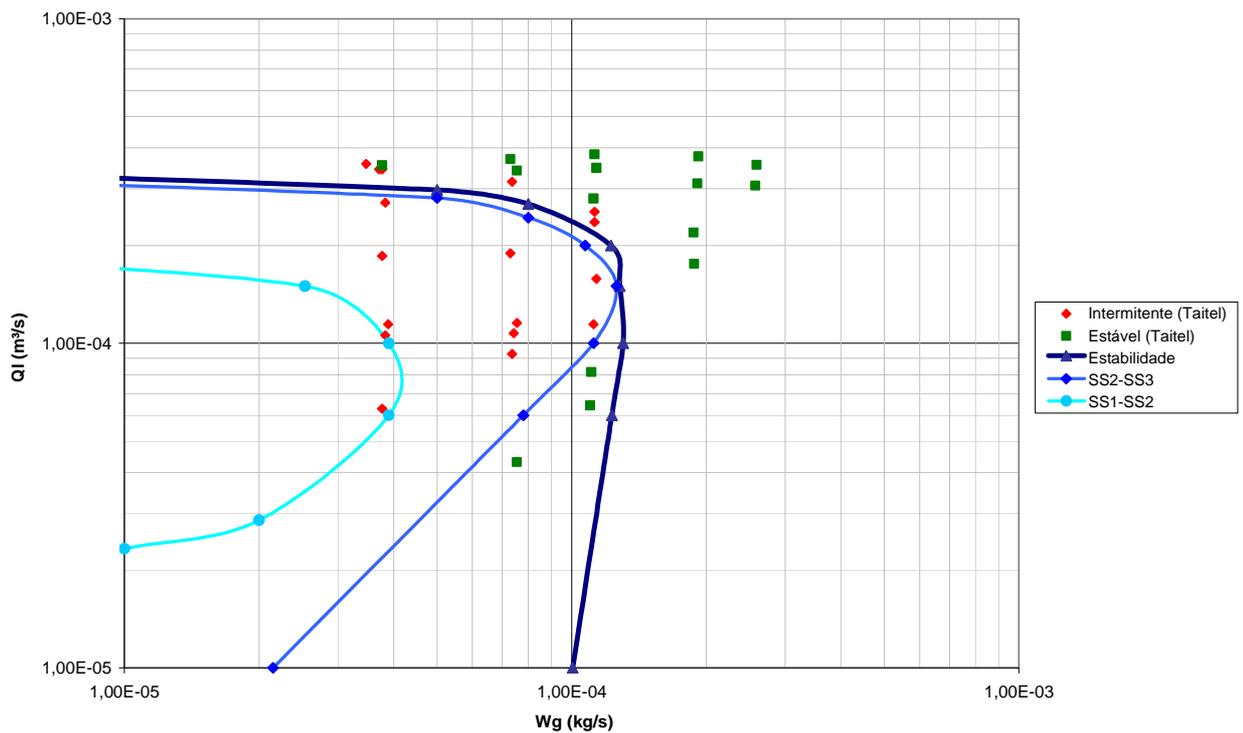


Figura 5-2 – Mapa de estabilidade para comprimento de *buffer*  $L_e = 1,69 m$ .

A região interna à curva azul-clara corresponde à zona em que ocorre o fenômeno de intermitência severa. Os pontos presentes são aqueles obtidos experimentalmente por Taitel *et al.* (1990), sendo os azuis estáveis e os vermelhos, instáveis. Nota-se uma proximidade interessante entre os dados experimentais e a curva obtida numericamente, o que implica em uma previsão razoável da condição de operação do sistema para  $L_e = 1,69 m$ .

### 5.2.5 Mapa de estabilidade para comprimento de *buffer* 5,1 m

Para o comprimento de *buffer*  $L_e = 5,1m$ , tem-se, de Taitel *et al.* (1990), os pontos experimentais e suas devidas classificações expressos na Tabela 5-9.

Tabela 5-9 – Dados experimentais para  $L_e = 5,1m$  (TAITEL *et al.*, 1990).

$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	<b>Resultado</b>
0,060	0,252	3,59E-05	1,28E-04	Instável
0,061	0,230	3,65E-05	1,17E-04	Instável
0,063	0,260	3,77E-05	1,32E-04	Instável
0,064	0,121	3,83E-05	6,13E-05	Instável
0,064	0,187	3,83E-05	9,48E-05	Instável
0,125	0,231	7,48E-05	1,17E-04	Instável
0,126	0,284	7,54E-05	1,44E-04	Instável
0,126	0,253	7,54E-05	1,28E-04	Instável
0,187	0,254	1,12E-04	1,29E-04	Instável
0,187	0,250	1,12E-04	1,27E-04	Instável
0,066	0,063	3,95E-05	3,19E-05	Instável
0,063	0,320	3,77E-05	1,62E-04	Instável
0,064	0,301	3,83E-05	1,53E-04	Instável
0,065	0,307	3,89E-05	1,56E-04	Instável
0,127	0,314	7,60E-05	1,59E-04	Instável
0,155	0,309	9,27E-05	1,57E-04	Instável
0,186	0,229	1,11E-04	1,16E-04	Instável
0,188	0,303	1,12E-04	1,54E-04	Instável
0,250	0,311	1,50E-04	1,58E-04	Instável
0,062	0,688	3,71E-05	3,49E-04	Instável
0,063	0,624	3,77E-05	3,16E-04	Instável
0,064	0,378	3,83E-05	1,92E-04	Instável
0,064	0,333	3,83E-05	1,69E-04	Instável
0,065	0,546	3,89E-05	2,77E-04	Instável
0,065	0,369	3,89E-05	1,87E-04	Instável
0,066	0,433	3,95E-05	2,19E-04	Instável
0,126	0,342	7,54E-05	1,73E-04	Instável
0,126	0,525	7,54E-05	2,66E-04	Instável
0,126	0,662	7,54E-05	3,35E-04	Instável
0,188	0,321	1,12E-04	1,63E-04	Instável
0,189	0,482	1,13E-04	2,44E-04	Instável

0,189	0,391	1,13E-04	1,98E-04	Instável
0,189	0,324	1,13E-04	1,64E-04	Instável
0,190	0,660	1,14E-04	3,34E-04	Instável
0,309	0,469	1,85E-04	2,38E-04	Instável
0,309	0,673	1,85E-04	3,41E-04	Instável
0,090	0,064	5,39E-05	3,24E-05	Estável
0,124	0,064	7,42E-05	3,24E-05	Estável
0,124	0,123	7,42E-05	6,23E-05	Estável
0,182	0,065	1,09E-04	3,29E-05	Estável
0,185	0,184	1,11E-04	9,32E-05	Estável
0,186	0,125	1,11E-04	6,33E-05	Estável
0,247	0,255	1,48E-04	1,29E-04	Estável
0,248	0,230	1,48E-04	1,17E-04	Estável
0,250	0,186	1,50E-04	9,42E-05	Estável
0,280	0,230	1,68E-04	1,17E-04	Estável
0,307	0,257	1,84E-04	1,30E-04	Estável
0,310	0,316	1,85E-04	1,60E-04	Estável
0,338	0,309	2,02E-04	1,57E-04	Estável
0,377	0,308	2,26E-04	1,56E-04	Estável

Adotando-se novamente o procedimento descrito anteriormente, foram realizadas no total 51 simulações, de modo a se obter 8 pontos para a curva de estabilidade, expressos na Tabela 5-10.

Tabela 5-10 – Pontos para a construção da curva de estabilidade ( $L_e = 5,1 m$ ).

	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)
<b>1</b>	1,00E-05	6,34E-04	0,017	1,251
<b>2</b>	1,00E-04	5,88E-04	0,167	1,159
<b>3</b>	2,00E-04	5,08E-04	0,334	1,002
<b>4</b>	2,94E-04	4,00E-04	0,491	0,789
<b>5</b>	3,40E-04	3,00E-04	0,567	0,592
<b>6</b>	3,33E-04	2,00E-04	0,556	0,395
<b>7</b>	2,63E-04	1,00E-04	0,440	0,197
<b>8</b>	1,66E-04	1,00E-05	0,277	0,020

Semelhantemente, foram realizadas no total 16 simulações, de modo a se obter 8 pontos para a curva de transição entre SS2 e SS3, expressos na Tabela 5-11.

Tabela 5-11 – Pontos para a construção da curva SS2-SS3 ( $L_e = 5,1m$ ).

	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)
<b>1</b>	1,00E-05	6,34E-04	0,017	1,251
<b>2</b>	1,00E-04	5,88E-04	0,167	1,159
<b>3</b>	2,00E-04	5,08E-04	0,334	1,002
<b>4</b>	2,94E-04	4,00E-04	0,491	0,789
<b>5</b>	3,40E-04	3,00E-04	0,567	0,592
<b>6</b>	3,33E-04	2,00E-04	0,556	0,395
<b>7</b>	2,63E-04	1,00E-04	0,440	0,197
<b>8</b>	1,66E-04	1,00E-05	0,277	0,020

Foram ainda realizadas no total 31 simulações, de modo a se obter 6 pontos para a curva de transição entre SS1 e SS2, expressos na Tabela 5-12.

Tabela 5-12 – Pontos para a construção da curva SS1-SS2 ( $L_e = 5,1m$ ).

	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)
<b>1</b>	1,00E-05	5,13E-04	0,017	1,011
<b>2</b>	1,00E-04	4,35E-04	0,167	0,857
<b>3</b>	1,63E-04	3,00E-04	0,272	0,592
<b>4</b>	1,66E-04	2,00E-04	0,277	0,395
<b>5</b>	1,37E-04	1,00E-04	0,228	0,197
<b>6</b>	1,59E-05	1,00E-05	0,027	0,020

Desta forma, a curva pode ser visualizada na Figura 5-3.

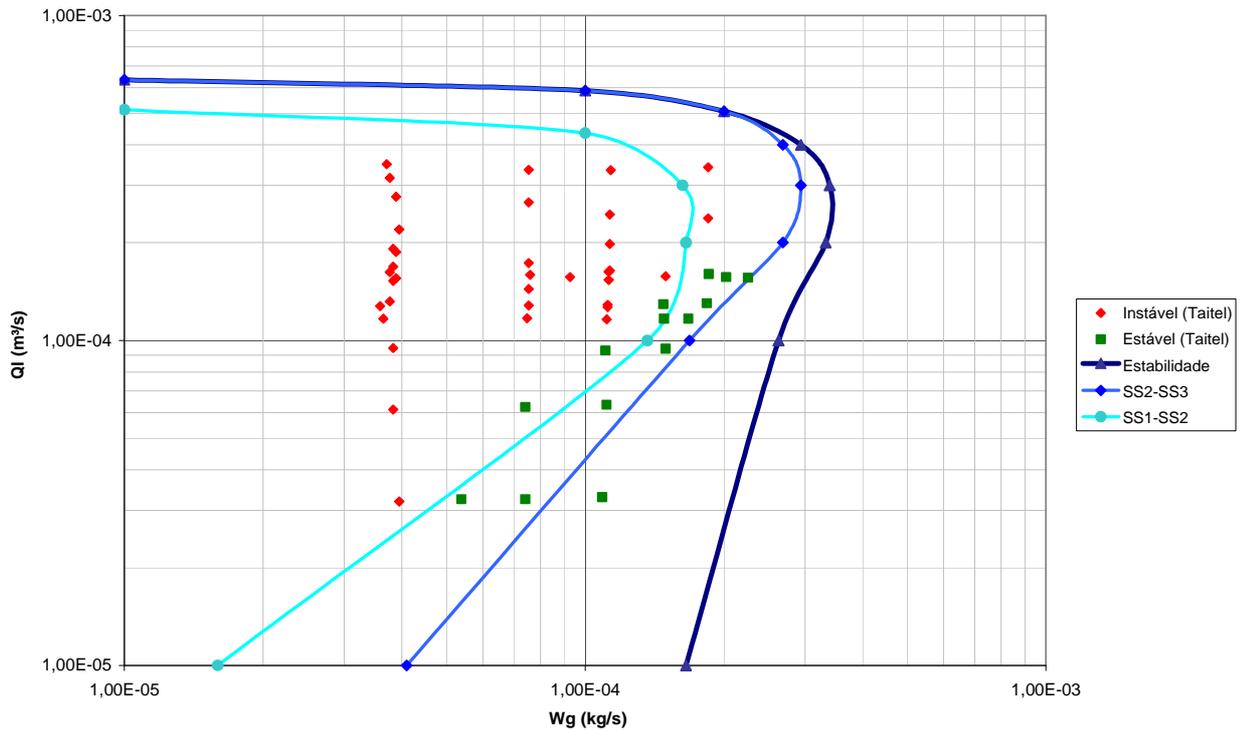


Figura 5-3 – Mapa de estabilidade para comprimento de *buffer*  $L_e = 5,1m$

A região interna à curva azul-clara corresponde à zona em que ocorre o fenômeno de intermitência severa. Os pontos presentes são aqueles obtidos experimentalmente por Taitel *et al.* (1990), sendo os azuis estáveis e os vermelhos, instáveis. Nota-se um grande número de pontos classificados experimentalmente como sendo estáveis que, nas simulações numéricas, resultaram em regiões internas à curva, que caracterizam operação instável. Assim, o regime de operação de pontos próximos à região de transição não podem ser definidos com precisão.

### 5.2.6 Mapa de estabilidade para comprimento de *buffer* 10 m

Para o comprimento de *buffer*  $L_e = 10m$ , tem-se, de Taitel *et al.* (1990), os pontos experimentais e suas devidas classificações expressos na Tabela 5-13.

Tabela 5-13 – Dados experimentais para  $L_e = 10m$  (TAITEL *et al.*, 1990).

$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	<b>Resultado</b>
0,061	0,064	3,65E-05	3,24E-05	Instável
0,062	0,191	3,71E-05	9,68E-05	Instável
0,063	0,247	3,77E-05	1,25E-04	Instável
0,063	0,405	3,77E-05	2,05E-04	Instável
0,064	0,157	3,83E-05	7,96E-05	Instável
0,094	0,064	5,62E-05	3,24E-05	Instável
0,123	0,357	7,36E-05	1,81E-04	Instável
0,124	0,157	7,42E-05	7,96E-05	Instável
0,157	0,249	9,39E-05	1,26E-04	Instável
0,185	0,118	1,11E-04	5,98E-05	Instável
0,185	0,155	1,11E-04	7,85E-05	Instável
0,186	0,351	1,11E-04	1,78E-04	Instável
0,232	0,351	1,39E-04	1,78E-04	Instável
0,233	0,147	1,39E-04	7,45E-05	Instável
0,247	0,349	1,48E-04	1,77E-04	Instável
0,249	0,246	1,49E-04	1,25E-04	Instável
0,304	0,339	1,82E-04	1,72E-04	Instável
0,311	0,249	1,86E-04	1,26E-04	Instável
0,124	0,065	7,42E-05	3,29E-05	Instável
0,185	0,078	1,11E-04	3,95E-05	Instável
0,185	0,066	1,11E-04	3,34E-05	Instável
0,229	0,067	1,37E-04	3,39E-05	Instável
0,230	0,091	1,38E-04	4,61E-05	Instável
0,246	0,087	1,47E-04	4,41E-05	Instável
0,062	0,433	3,71E-05	2,19E-04	Instável
0,064	0,538	3,83E-05	2,73E-04	Instável
0,124	0,414	7,42E-05	2,10E-04	Instável
0,124	0,523	7,42E-05	2,65E-04	Instável
0,184	0,513	1,10E-04	2,60E-04	Instável
0,187	0,375	1,12E-04	1,90E-04	Instável
0,228	0,405	1,36E-04	2,05E-04	Instável
0,230	0,543	1,38E-04	2,75E-04	Instável
0,245	0,527	1,47E-04	2,67E-04	Instável
0,247	0,416	1,48E-04	2,11E-04	Instável
0,307	0,532	1,84E-04	2,70E-04	Instável
0,313	0,385	1,87E-04	1,95E-04	Instável
0,247	0,158	1,48E-04	8,01E-05	Estável
0,280	0,071	1,68E-04	3,60E-05	Estável

0,308	0,149	1,84E-04	7,55E-05	Estável
0,327	0,108	1,96E-04	5,47E-05	Estável

Adotando-se novamente o procedimento devidamente definido em seção anterior, foram realizadas no total 35 simulações, de modo a se obter 7 pontos para a curva de fronteira, expressos na Tabela 5-14.

Tabela 5-14 – Pontos para a construção da curva de estabilidade ( $L_e = 10m$ ).

	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)
<b>1</b>	1,00E-05	1,32E-03	0,017	2,595
<b>2</b>	1,00E-04	1,23E-03	0,167	2,418
<b>3</b>	3,00E-04	9,75E-04	0,501	1,924
<b>4</b>	5,65E-04	5,00E-04	0,944	0,987
<b>5</b>	5,87E-04	3,00E-04	0,980	0,592
<b>6</b>	4,39E-04	1,00E-04	0,733	0,197
<b>7</b>	2,75E-04	1,00E-05	0,460	0,020

Semelhantemente, foram realizadas no total 14 simulações, de modo a se obter 7 pontos para a curva de transição entre SS2 e SS3, expressos na Tabela 5-15.

Tabela 5-15 – Pontos para a construção da curva SS2-SS3 ( $L_e = 10m$ ).

	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)
<b>1</b>	1,00E-05	1,32E-03	0,017	2,595
<b>2</b>	1,00E-04	1,23E-03	0,167	2,418
<b>3</b>	3,00E-04	9,75E-04	0,501	1,924
<b>4</b>	5,38E-04	5,00E-04	0,898	0,987
<b>5</b>	5,13E-04	3,00E-04	0,856	0,592
<b>6</b>	2,22E-04	1,00E-04	0,371	0,197
<b>7</b>	5,38E-05	1,00E-05	0,090	0,020

Foram realizadas ainda 33 simulações, de modo a se obter 8 pontos para a construção da fronteira SS1-SS2, que podem ser devidamente contemplados na Tabela 5-16.

Tabela 5-16 – Pontos para a construção da curva SS1-SS2 ( $L_e = 10m$ ).

	$W_g$ (kg/s)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /s)	$j_g$ (m/s)	$j_l$ (m/s)
<b>1</b>	1,00E-05	1,13E-03	0,017	2,220
<b>2</b>	4,00E-05	1,12E-03	0,067	2,200
<b>3</b>	2,00E-04	8,20E-04	0,334	1,618
<b>4</b>	3,00E-04	6,53E-04	0,501	1,288
<b>5</b>	3,58E-04	5,00E-04	0,597	0,987
<b>6</b>	3,51E-04	3,00E-04	0,587	0,592
<b>7</b>	1,95E-04	1,00E-04	0,326	0,197
<b>8</b>	2,15E-05	1,00E-05	0,036	0,020

Desta forma, a curva pode ser visualizada na Figura 5-4.

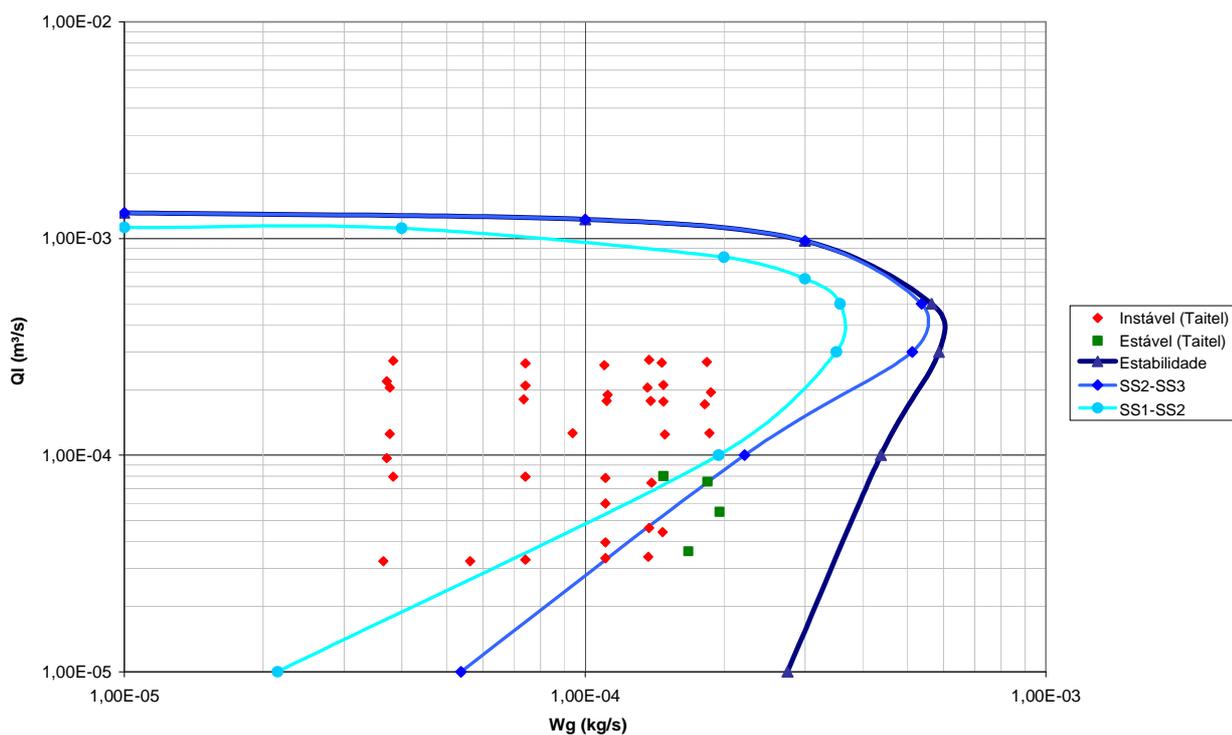


Figura 5-4 - Mapa de estabilidade para comprimento de *buffer*  $L_e = 10m$ .

A região interna à curva corresponde à zona em que ocorre o fenômeno de intermitência severa. Os pontos presentes são aqueles obtidos experimentalmente por Taitel et al. (1990), sendo os azuis estáveis e os vermelhos instáveis. Há uma relativa

escassez de dados experimentais cujo comportamento é estável, mas, para os dados referidos, nota-se alguns valores tidos experimentalmente como estáveis posicionados internamente à curva de estabilidade.

### 5.2.7 Comparação entre as curvas de estabilidade

Colocando-se as três curvas de estabilidade obtidas em um mesmo gráfico, em mesma escala, pode-se visualizar como elas variam entre si conforme se aumenta ou diminui o comprimento de *buffer*, resultado que pode ser contemplado na Figura 5-5. Desta vez, as curvas são apresentadas em termos das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa nas condições padrão API (*American Petroleum Institute*), de modo a se alinhar a exposição dos resultados aqui obtidos com a forma normalmente apresentada em outros trabalhos e documentos sobre o assunto. Foram utilizadas as definições das eqs. (44) e (45).

$$j_{l0} = \frac{Q_l}{A} \quad (4)$$

$$j_{g0} = \frac{W_g}{\rho_{g0} A} = \frac{W_g}{\left( \frac{P_0}{R_G T_0} \right) A} \quad (5)$$

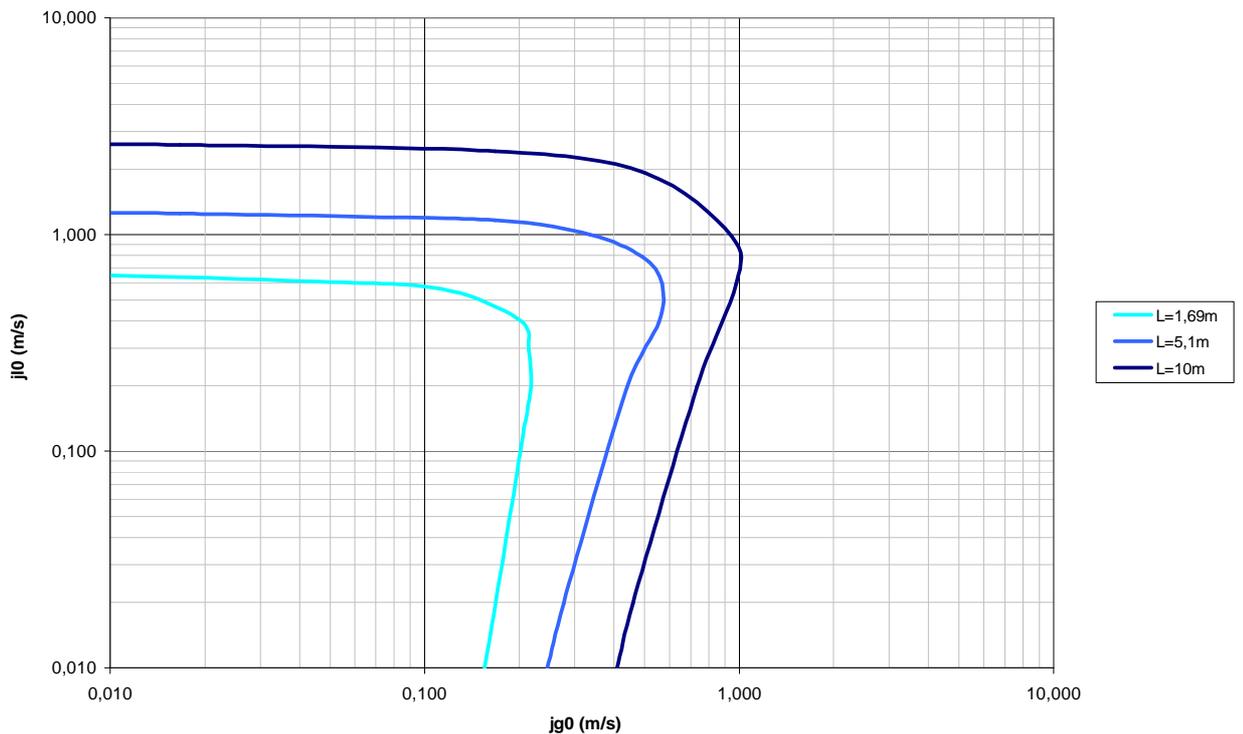


Figura 5-5 – Comparação entre as curvas de estabilidade em termos das velocidades superficiais das fases, variando-se o comprimento de *buffer*.

Como resultado, nota-se claramente a influência da variação do comprimento de *buffer* sobre a estabilidade do sistema: quanto menor o comprimento de *buffer*, mais compacta é a zona de instabilidade (interna às curvas), o que implica em que quanto maior a quantidade de gás presente no reservatório, maior a chance de este sistema operar em condições de intermitência severa.

### 5.2.8 Comparação entre as curvas SS2-SS3

Semelhantemente ao item 5.2.7, colocando-se as três curvas que caracterizam as fronteiras entre os tipos SS2 e SS3 de intermitência severa em um mesmo gráfico, em mesma escala, pode-se visualizar como elas variam entre si conforme se aumenta ou diminui o comprimento de *buffer*, resultado que pode ser contemplado na Figura 5-6.

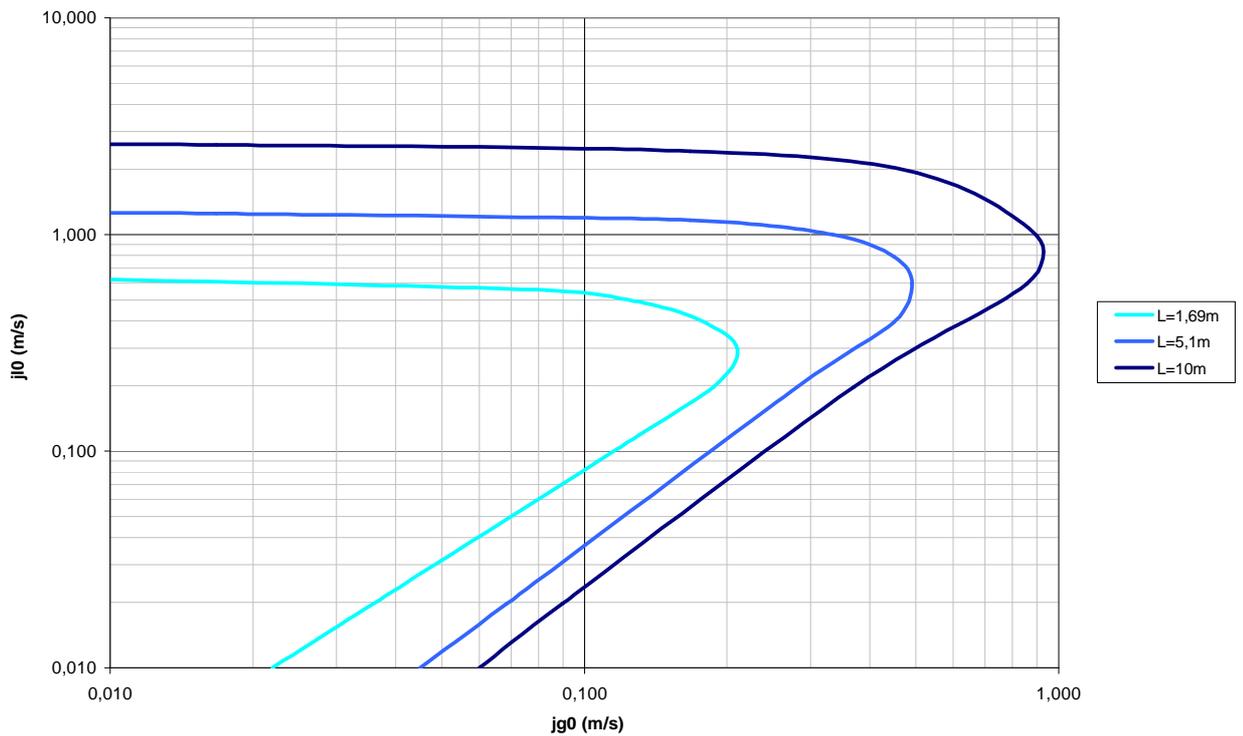


Figura 5-6 – Comparação entre as curvas SS2-SS3 em termos das velocidades superficiais das fases, variando-se o comprimento de *buffer*.

Novamente, nota-se que as curvas de SS2-SS3 variam em uma proporção semelhante às de estabilidade, variando-se o comprimento de *buffer*.

### 5.2.9 Comparação entre as curvas SS1-SS2

Seguindo a mesma idéia dos itens 5.2.7, 5.2.8, a Figura 5-7 contém as fronteiras SS1-SS2 para os diferentes comprimentos de *buffer* simulados, posicionadas em um mesmo gráfico, em uma mesma escala, em termos das velocidades superficiais das fases.

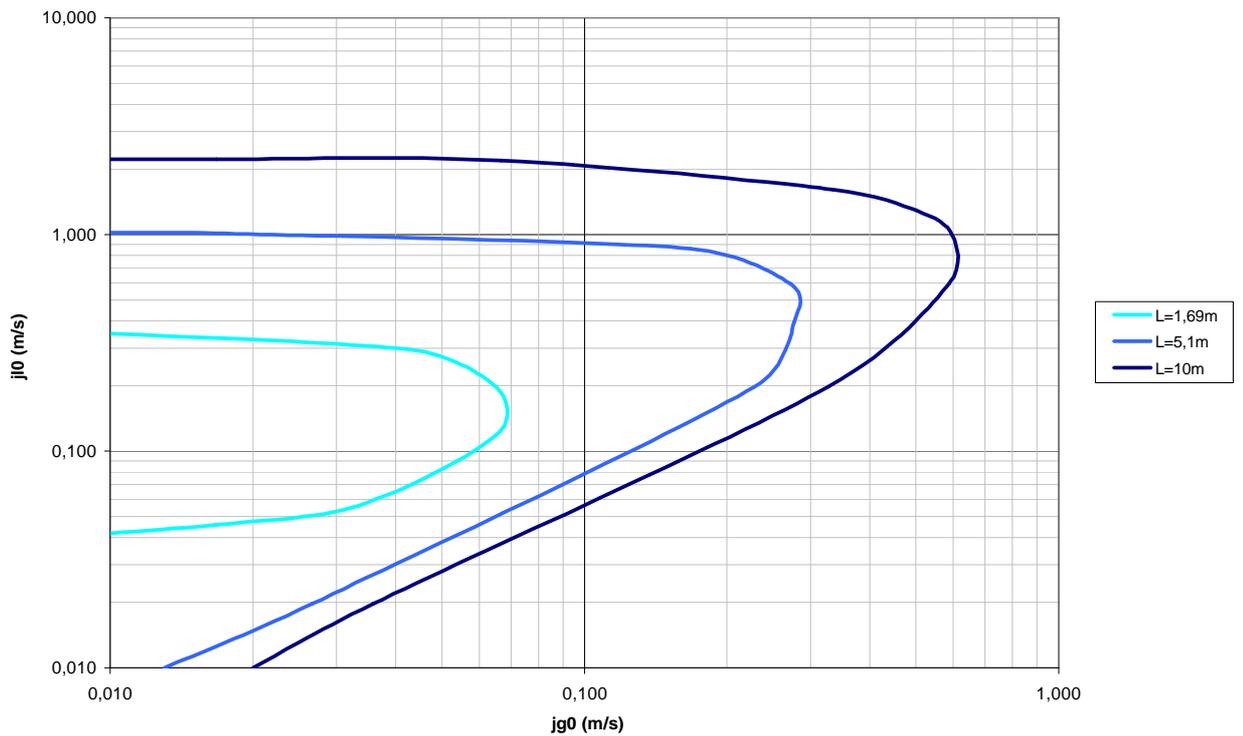


Figura 5-7 – Comparação entre as curvas SS1-SS2 em termos das velocidades superficiais das fases, variando-se o comprimento de *buffer*.

Nota-se claramente um comportamento semelhante ao das outras curvas: aumentando-se o comprimento de *buffer*, a tendência é a de que a região em que o escoamento opera com intermitência severa do tipo SS1 aumenta.

## 6. CONCLUSÕES

Das simulações numéricas, nota-se que o modelo utilizado no programa computacional, de uma forma mais ampla, mostrou-se bastante eficiente no tocante à determinação do comprimento máximo de penetração e do período dos ciclos de intermitência. Entretanto, alguns aspectos devem ser considerados:

i. O programa utilizado, no geral, mostrou resultados melhores em relação àqueles apresentados por Taitel *et al.* (1990), quando comparados aos dados experimentais, fato evidenciado pela Tabela 5-1, Tabela 5-2, Tabela 5-3 e Tabela 5-4. Entretanto, ainda deve ser aprimorado, no sentido de, em determinadas situações, ter apresentado resultados divergentes em relação ao experimental quanto à estabilidade do escoamento: por vezes, enquanto o experimental apresentava penetração de líquido com períodos bem definidos, as simulações indicavam um escoamento estável, sem penetração de líquido. O inverso também ocorreu em determinadas ocasiões;

ii. Os desvios encontrados para os valores do período das oscilações foram, no geral, inferiores em relação àqueles obtidos para o comprimento de penetração, o que sugere melhorias nessa questão;

Os melhores resultados obtidos foram aqueles para um comprimento de *buffer* de 5,1 *m*, valor intermediário entre 1,69 *m* e 10 *m* que também foram utilizados em simulação, o que talvez sugira uma região ótima para utilização do programa. Entretanto, deve-se levar em conta a escassez de dados para o comprimento de penetração no caso do comprimento de *buffer* de 1,69 *m*, o que não permite uma análise mais profunda para esse caso.

Dos mapas de estabilidade, foi possível que se avaliasse a precisão do modelo ao prever se um determinado sistema com certas condições de entrada opera em regime estável ou não, bem como, no caso de instabilidade, determinar-se o tipo que a caracteriza. Os resultados, em termos globais, foram satisfatórios, sendo que, para os três casos avaliados, foi possível a construção de curvas de estabilidade bem

definidas, com resultados muito próximos à realidade. Os únicos casos em que não se consegue determinar com precisão a condição de operação do sistema são aqueles mais próximos da fronteira entre as regiões de estabilidade e intermitência, que estão localizados em uma zona de transição. Comparando-se os mapas obtidos nos três casos de análise, foi possível que se avaliasse ainda como se rearranjam as áreas de estabilidade e intermitência do sistema ao variar-se o comprimento de *buffer*. Nota-se que a quantidade de gás no reservatório tem grande influência no tocante à determinação das condições de operação do sistema, sendo que quanto menor esta quantidade, maior a chance de este sistema ser estável, e vice versa. Pode-se inferir também através dos resultados obtidos que o tipo de intermitência severa ocorrente também é sensível ao comprimento de *buffer*, que, quando variado, faz com que as sub-regiões de intermitência severa dos tipos SS1, SS2 e SS3 se rearranjam proporcionalmente.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BALIÑO, J. L. **Análise de intermitência severa em risers de geometria catenária**, Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, 163 p., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
2. TAITEL, Y. & DUKLER, A. E., **A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gás-Liquid Flow**, *AICHE Journal*, vol. 22, No. 1, pp. 47-55, 1976.
3. TAITEL, Y., **Stability of severe slugging**, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 12, pp. 203-217, 1986.
4. TAITEL, Y.; VIERKANDT, S.; SHOHAM, O.; BRILL, P., **Severe slugging in a riser system: Experiments and modeling**, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 16, pp. 57-68, 1990.
5. WALLIS, Graham B., **One dimensional two-phase flow**, New York: McGraw-Hill, 1969, 408 p.