

# SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS. APLICAÇÃO A INTERMITÊNCIA SEVERA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Ricardo da Carvalhinha Thomaz

ricardo.c.thomaz@gmail.com

**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 programa de Dinâmica de Fluidos Computacional. 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 a 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.

**Palavras chave:** Escoamento Multifásico, Intermitência Severa, Produção de Petróleo, Mapa de Estabilidade, Riser.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma parcela significativa dos escoamentos que ocorrem na natureza e na tecnologia é de caráter multifásico. 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.

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. 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. Ainda para a primeira parte do trabalho, foi feito 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, o modelo homogêneo, no qual se considera que ambas as fases, líquida e gasosa, têm mesma velocidade; 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:

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

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

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:

$$u_l = \frac{W_l}{\rho_l A_l} \quad (3)$$

$$u_g = \frac{W_g}{\rho_g A_g} \quad (4)$$

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:

$$j = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

### 2.1.4 Fluxos volumétricos ou velocidades superficiais das fases

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

$$j_l = \frac{Q_l}{A} \quad (6)$$

$$j_g = \frac{Q_g}{A} \quad (7)$$

### 2.1.5 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  $j$ .

$$j_{gl} = \alpha(u_g - j) = \alpha u_{gl} \quad (8)$$

$$j_{lg} = (1 - \alpha)(u_l - j) = (1 - \alpha)u_{lj} \quad (9)$$

$$j_{gl} = -j_{lg} = \alpha(1 - \alpha)u_{gl} \quad (10)$$

### 2.1.6 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:

$$j_g = \alpha u_g \quad (11)$$

$$j_l = (1 - \alpha)u_l \quad (12)$$

## 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. No *pipeline*, o padrão de escoamento pode ser estratificado, enquanto que no *riser* o gás é transportado como bolhas entre golfadas de líquido, conforme a Figura 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*. 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. 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). 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 3).

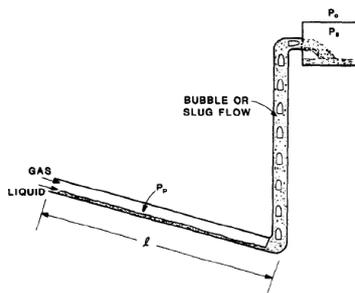


Figura 1 – Estado permanente (TAITEL, 1986).

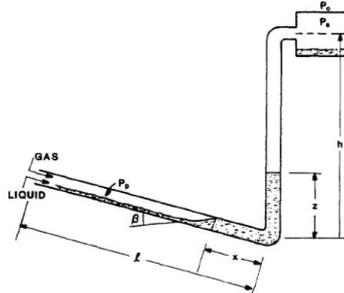


Figura 2 – Formação do *slug* (TAITEL, 1986).

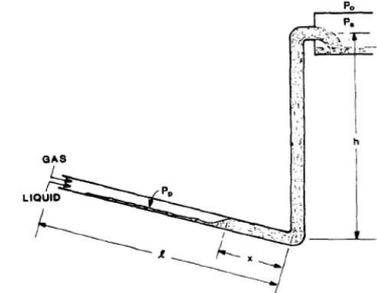


Figura 3 – Produção do *slug* (TAITEL, 1986).

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 4). 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 5).

Dentre as principais consequências 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.

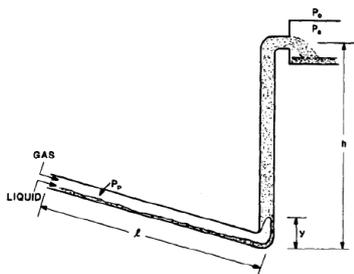


Figura 4 – Penetração de gás (TAITEL, 1986).

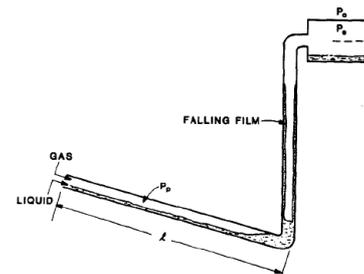


Figura 5 – Expulsão de gás (TAITEL, 1986).

Ainda sobre o fenômeno em questão, encontra-se comumente na literatura classificações que caracterizam comportamentos típicos e identificáveis do escoamento instável como *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 ( $\alpha_b = 0$ ).

### 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*. Assim, diferentemente da situação de SS1, podem não existir períodos em que o valor da pressão na base do *riser* é constante, fato antes claramente identificável. Isto ocorre em virtude do *riser* poder não ficar completamente cheio de líquido.

### 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, não há penetração da frente de líquido no *pipeline* ( $x = 0$ ) e a fração de vazão na base do *riser* sempre maior que zero ( $\alpha_b > 0$ ). Paralelamente, outras variáveis, como a pressão na base do *riser*, são variáveis no tempo, caracterizando regime intermitente.

## 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 6.

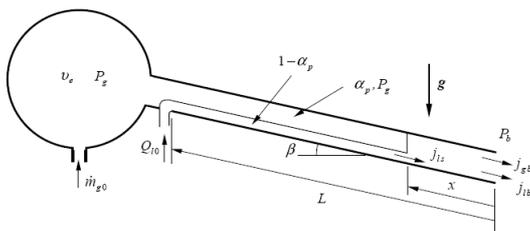


Figura 6 – Volume de controle para o *pipeline* (BALIÑO, 2008).

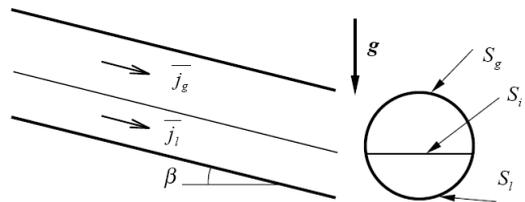


Figura 7 – Escoamento estratificado para a teoria de equilíbrio local (BALIÑO, 2008).

A priori, nota-se uma 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. (13):

$$L_e = \frac{v_e}{A} \quad (13)$$

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

Uma 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 índice  $b$  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* ( $x > 0$ )

Partindo-se da equação de continuidade para as fases líquida e gasosa (considerando-se que a velocidade de gás na saída é  $u_{gb} = 0$ ), assumindo-se a hipótese de gás perfeito, considerando-se variações hidrostáticas, a pressão na base do conduto  $P_b$  resulta em:

$$P_b = P_g + \rho_l g x \text{sen}\beta \quad (14)$$

Em termos das velocidades superficiais, definidas pelas eqs. (6) e (7), 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:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{Q_{l0} - j_{lb}}{\alpha_p} \quad (15)$$

$$\frac{dP_g}{dt} = \frac{-P_g \left( j_{lb} - \frac{Q_{l0}}{A} \right) + \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{g0}}{(L-x)\alpha_p + L_e} \quad (16)$$

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

Adotando-se procedimentos semelhantes aos da seção anterior, em termos das velocidades superficiais, definidas pelas eqs. (15) e (16), 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* ( $\alpha_p = \text{cte.}$ ), tem-se:

$$j_{lb} = \frac{Q_{l0}}{A} \quad (17)$$

$$\frac{dP_g}{dt} = \frac{-P_g j_{gb} + \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{g0}}{L\alpha_p + L_e} \quad (18)$$

### 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).

Na Figura 7, 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:

$$\tau_{wg} \frac{S_g}{\alpha_p} - \tau_{wl} \frac{S_l}{1-\alpha_p} + \tau_i S_i \left( \frac{1}{1-\alpha_p} + \frac{1}{\alpha_p} \right) + (\rho_l - \rho_g) A g \text{sen}\beta = 0 \quad (19)$$

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 esta relação algébrica.

### 3.2 Riser

Para o *riser*, tem-se o volume de controle definido na Figura 8.

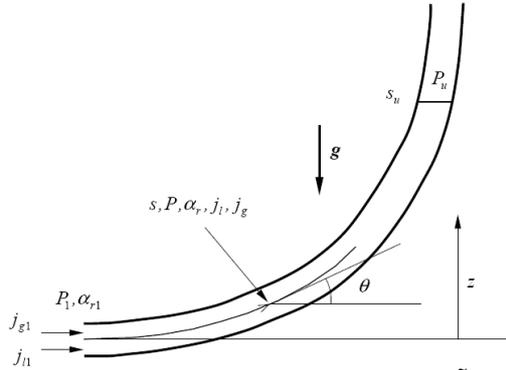


Figura 8 – Volume de controle do *riser* (BALIÑO, 2008).

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 (com hipótese de gás perfeito) são dadas por:

$$-\frac{\partial \alpha_r}{\partial t} + \frac{\partial j_l}{\partial s} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(P \alpha_r) + \frac{\partial}{\partial t}(P j_g) = 0 \quad (21)$$

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:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\rho_m g \text{ sen } \theta - \frac{4\tau_w}{D} \quad (22)$$

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:

$$u_g = \frac{j_g}{\alpha_r} = C_d j + U_d \quad (23)$$

$$j_l = j - j_g = u_l(1 - \alpha_r) = (1 - \alpha_r C_d)j + \alpha_r U_d \quad (24)$$

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

### 3.3 Garantia da 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

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.

## 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  $-5^\circ$  e  $5^\circ$ ; 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.

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:

$$\mu_g = 1,8 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}; \quad \mu_l = 1,0 \times 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}; \quad \rho_l = 1,0 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}; \quad g = 9,8 \frac{m}{s^2}; \quad R = 287 \frac{m^2}{s^2 \cdot K}; \quad T_g = 298K; \quad L = 9,14m;$$

$$D = 2,54 \times 10^{-2} m; \quad \beta = 5^\circ; \quad Z = 3m; \quad P = P_{atm} = 1 \times 10^5 Pa; \quad N = 51.$$

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). Um resumo dos desvios encontrados pode ser encontrado na Tabela 1.

Tabela 1: Desvio das simulações em relação aos dados experimentais.

$L_e$ (m)	$x_{max}$			$T_{ciclo}$		
	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  $L_e = 1,69 m$ , 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  $L_e = 5,1 m$ , 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  $T_{ciclo}$ , que ficaram entre 0 % e 21 %, com média 8 %.

Ao contrário do primeiro caso, as simulações com  $L_e = 10 m$  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  $T_{ciclo}$ , a oscilação ocorreu entre 3 % e 68 %, com uma média de 24 %.

### 5.2 Mapas de estabilidade

Tomando-se ainda como base os valores de comprimento de *buffer* utilizados nas simulações expressas na Tabela 1,  $L_e = 1,69 m$ ,  $L_e = 5,1 m$  e  $L_e = 10 m$ , foram confeccionados mapas de estabilidade em função das vazões volumétrica de líquido e mássica de gás, mantendo-se os demais dados de entrada. As regiões internas às curvas correspondem às zonas 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.

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

Para o comprimento de *buffer*  $L_e = 1,69 m$ , foram realizadas no total 65 simulações, de modo a se obter 9 pontos para a curva de estabilidade; 28 simulações para a obtenção de 9 pontos para a fronteira SS2-SS3; e outras 32 simulações para a obtenção de 6 pontos da curva SS1-SS2. O mapa completo pode ser visualizado na Figura 9.

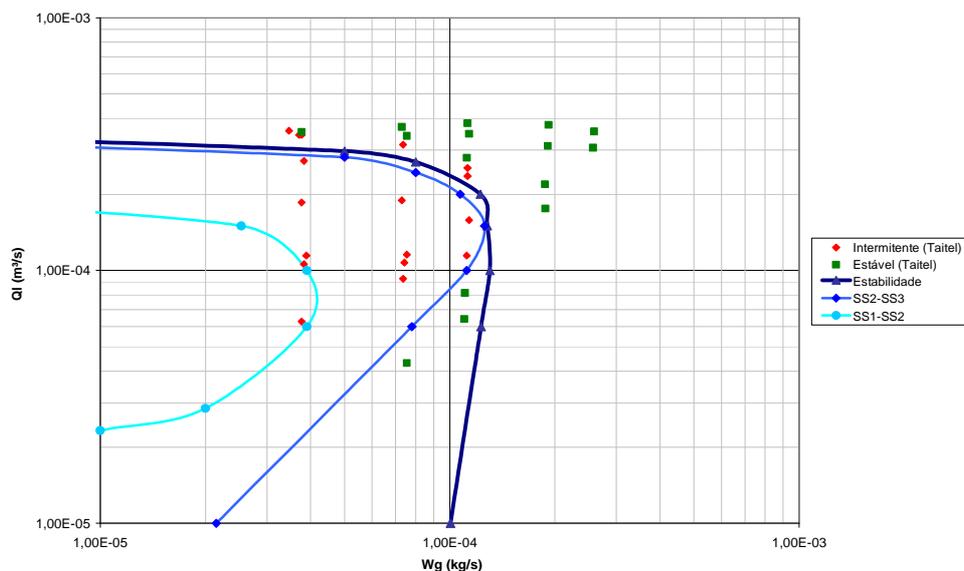


Figura 9 – Mapa de estabilidade para comprimento de *buffer*  $L_e = 1,69 m$ .

Verifica-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  $L_e = 1,69 m$ .

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

Para o comprimento de *buffer*  $L_e = 5,1 m$ , foram realizadas no total 51 simulações, de modo a se obter 8 pontos para a curva de estabilidade; 16 simulações para a obtenção de 8 pontos para a fronteira SS2-SS3; e mais 31 simulações para a obtenção de 6 pontos da curva SS1-SS2. Desta forma, o mapa de estabilidade pode ser visualizada na Figura 10.

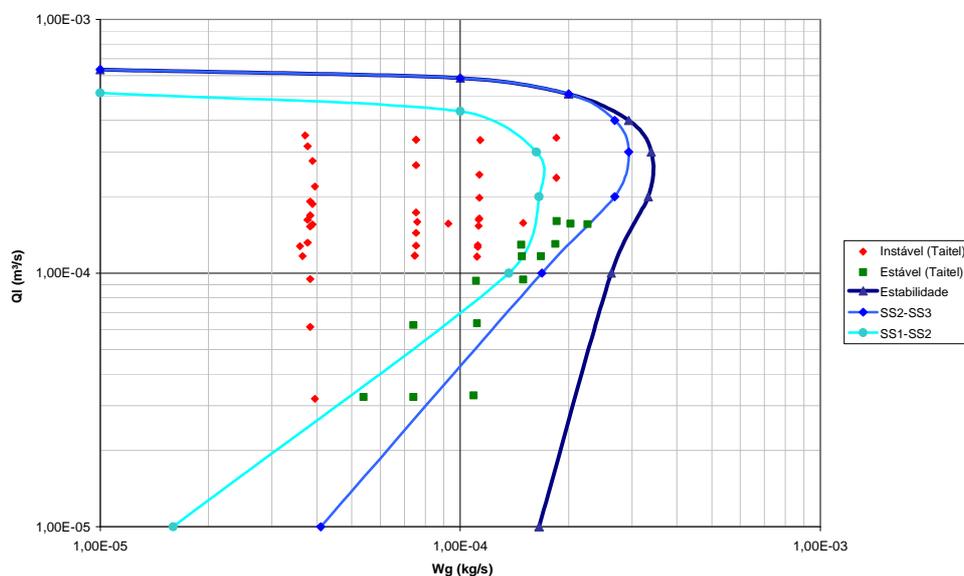


Figura 10 – Mapa de estabilidade para comprimento de *buffer*  $L_e = 5,1 m$ .

Nota-se um grande número de pontos experimentais estáveis que resultaram em regiões de operação instável, internas à curva. Assim, a operação de pontos próximos à região de transição não pode ser definida com precisão.

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

Para o comprimento de *buffer*  $L_e = 10 m$ , foram realizadas no total 35 simulações, de modo a se obter 7 pontos para a curva de de estabilidade; 14 simulações para a obtenção de 7 pontos para a fronteira SS2-SS3; e outras 33 simulações para a obtenção de 8 pontos da curva SS1-SS2. O mapa completo pode ser visualizado na Figura 11.

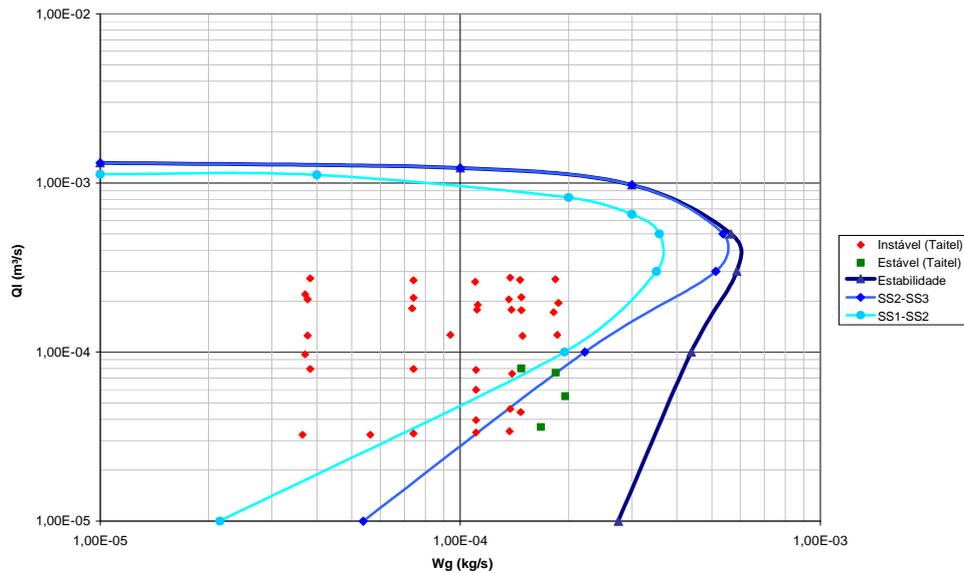


Figura 11 – Mapa de estabilidade para comprimento de *buffer*  $L_c = 10\text{ m}$ .

Há 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.

#### 5.2.4 Comparação entre as curvas dos mapas variando-se o comprimento de *buffer*

Colocando-se as curvas obtidas em mesmo gráfico e escala, pode-se visualizar como elas variam entre si conforme se aumenta ou diminui o comprimento de *buffer*, resultado que pode ser contemplado, em termos das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa ( $j_{l0}$  e  $j_{g0}$ , respectivamente) nas condições padrão API, nas Figuras 12, 13 e 14.

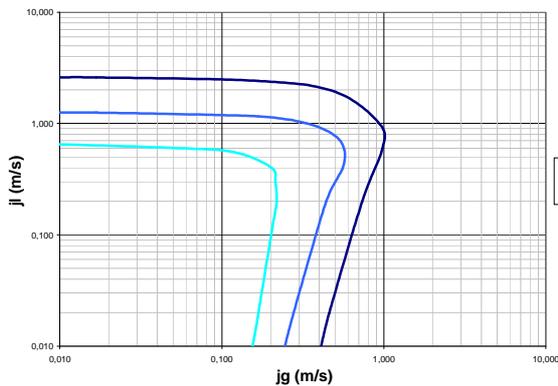


Figura 12 – Comparação entre as curvas de estabilidade, variando-se o comprimento de *buffer*.

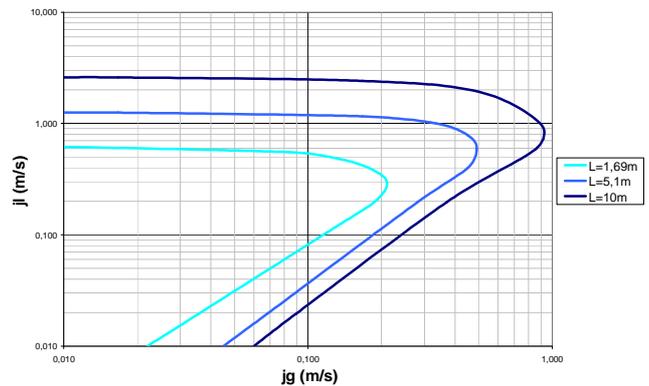


Figura 13 – Comparação entre as curvas SS2-SS3, variando-se o comprimento de *buffer*.

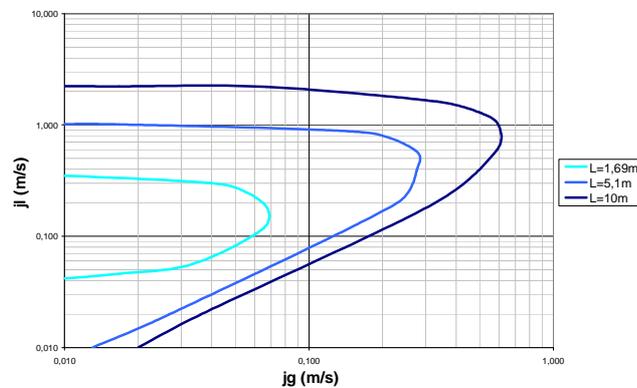


Figura 14 – Comparação entre as curvas SS1-SS2, variando-se o comprimento de *buffer*.

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.

## 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: programa utilizado, no geral, mostrou resultados melhores em relação àqueles apresentados por Taitel *et al.* (1990), quando comparados aos dados experimentais. 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. 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;

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

- 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.
- TAITEL, Y. & DUKLER, A. E., **A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow**, *AIChE Journal*, vol. 22, No. 1, pp. 47-55, 1976.
- TAITEL, Y., **Stability of severe slugging**, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 12, pp. 203-217, 1986.
- 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.
- WALLIS, Graham B., **One dimensional two-phase flow**, New York: McGraw-Hill, 1969, 408 p.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### **SIMULATION OF MULTI-PHASE FLOWS. APPLICATION INTO SEVERE SLUGGING IN OIL PRODUCTION SYSTEMS.**

**Ricardo da Carvalhinha Thomaz**

ricardo.c.thomaz@gmail.com

**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.*

**Keywords.** *Multi-phase flow, Severe Slugging, Oil Production, Stability Map, Riser*