

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS. APLICAÇÃO À INTERMITÊNCIA SEVERA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Natália Argene Lovate Pereira
nataliaargene@yahoo.com.br

A grande maioria dos escoamentos são multifásicos, ou seja, as diferentes fases são distinguíveis fisicamente umas das outras. As diferenças de velocidades entre as fases e a sua geometria têm uma influência tão grande sobre o comportamento do escoamento, que servem de base para a classificação dos possíveis regimes de escoamento.

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

Foram analisados diversos casos de escoamentos, baseados em uma configuração básica, onde variavam as vazões de gás e no interior do riser. O tempo de simulação foi determinado de maneira que o sistema atinja o ciclo limite.

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

Palavras chave: Intermitência Severa, Estabilidade, Riser, Escoamento Multifásico, Petróleo.

1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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. O padrão de escoamento mais freqüente é o intermitente, em golfada ou *slug*, no qual o gás é transportado como bolhas entre golfadas de líquido. Este padrão pode mudar em determinadas condições geométricas e de escoamento e originar um fenômeno indesejável conhecido como intermitência severa ou golfada severa (*severe slugging*).

Uma situação típica ocorre com baixas vazões das fases. O escoamento pode sofrer uma instabilidade e então líquido se acumula no fundo do *riser*, bloqueando a passagem de gás e iniciando um ciclo de golfada de longo período, da ordem de horas. Os pré-requisitos para que isto aconteça são pressões e vazões baixas, tipicamente quando o poço já tem um tempo importante de exploração.

A intermitência severa está associada a grandes oscilações de pressão e problemas de dimensionamento nas unidades de separação na plataforma, provocando sua saída de serviço e consideráveis perdas econômicas.

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

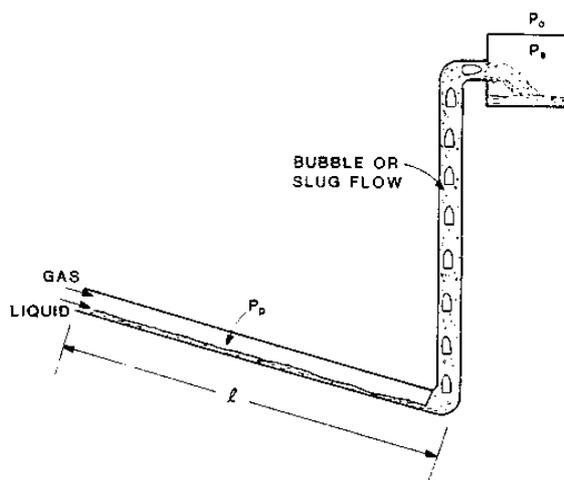


Figura 1: Estado permanente de escoamento.

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

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

O ciclo de intermitência severa é dividido em quatro estágios característicos (Taitel, 1986).

- **Tempo de formação do slug (*slug build-up time*, T1):** é o tempo transcorrido entre o instante em que a base do *riser* é bloqueada com líquido e o instante em que não existe gás no *riser* e o nível do líquido atinge o topo (ver Figura 2).

- **Tempo de produção do slug (slug production time, T2):** é o tempo transcorrido entre o instante final do T1 e o instante em que o gás penetra novamente no riser. Durante este período, existe penetração da frente de líquido no pipeline (ver Figura 3).
- **Tempo de penetração do gás (bubble penetration time, T3):** é o tempo transcorrido entre o instante final do T2 e o instante em que o gás atinge o topo do riser (ver Figura 4).
- **Tempo de despressurização do pipeline (gas blowdown time, T4):** é o tempo transcorrido entre o instante final do T3 e o instante inicial do T1. Neste período, existe passagem livre de gás no riser e uma rápida despressurização do pipeline (ver Figura 5).

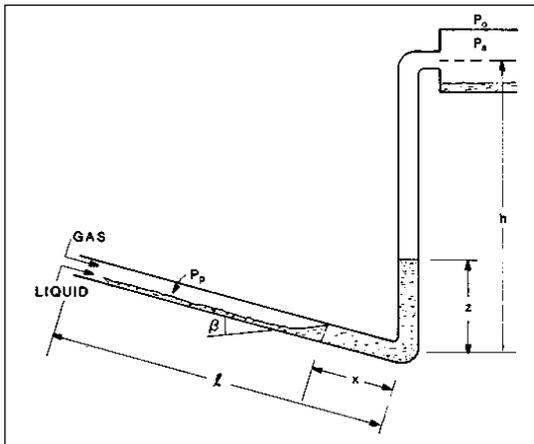


Figura 2: Tempo de formação do slug

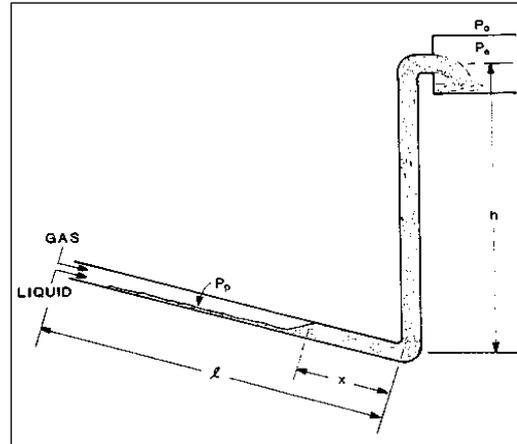


Figura 3: Tempo de produção do slug

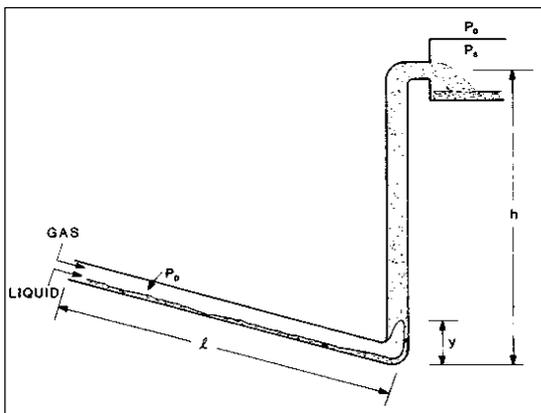


Figura 4: Tempo de penetração do gás

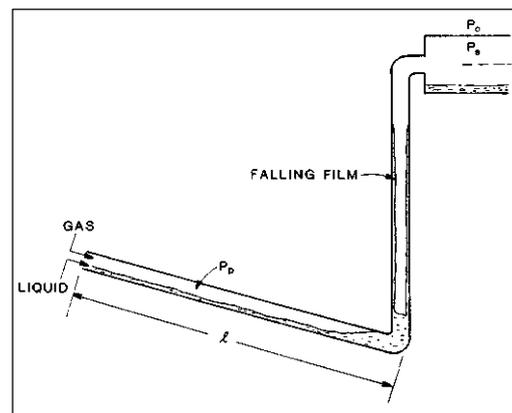


Figura 5: Tempo de despressurização do pipeline

1.1. Variáveis em Escoamentos Multifásicos Unidimensionais

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

- Comprimento de penetração de líquido no pipeline (x): comprimento de pipeline cheio de líquido quando todo o riser está tomado pela fase líquida.
- Fração de vazio (void fraction α): fração da área de passagem ocupada pela fase gasosa.
- Velocidade superficial ou fluxo volumétrico: vazão volumétrica por unidade de área.

1.2. O Modelo e o Programa Computacional

Neste projeto, é analisado o comportamento do escoamento no interior de um riser de geometria catenária, e o fluido é considerado bifásico, ou seja, existe uma fase gasosa e uma líquida. As simulações são realizadas utilizando-se um programa de dinâmica de fluidos computacional, escrito na linguagem Fortran.

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

- Tanque pulmão de gás e conduto descendente, com um padrão de escoamento estratificado. Este conduto pode se encontrar em dois estados: penetração contínua de gás ou não penetração de gás;
- *Riser*, considerado como um sistema bifásico de parâmetros distribuídos, onde se desprezam a inércia e o atrito;
- Região de gás no topo do *riser*, na condição na qual o *riser* não está cheio (o nível de líquido não atinge o topo).

O programa utilizado na simulação dos casos está escrito em linguagem Fortran. O esquema de cálculo está baseado na iteração da velocidade superficial no último nó do *riser*, de maneira de atingir convergência nas pressões e frações de vazio.

O estado permanente é considerado condição inicial para os transientes. Determinados o passo temporal, a posição e a velocidade da superfície de líquido, são recalculadas as novas posições dos nós após o deslocamento com a velocidade do gás e é garantida a continuidade entre *pipeline* e *riser*. Então, confere-se se as variáveis no passo K+1 são iguais às do passo K e o processo se repete, até que se atinja a convergência global.

O programa aqui utilizado foi desenvolvido como parte de um projeto mais amplo em parceria com a empresa Petrobras. No atual projeto, foram feitos rodagens do programa e análise dos resultados.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1. Parâmetros que Caracterizam o Caso a Ser Analisado, Dados de Entrada e de Saída

Os parâmetros a seguir caracterizam o caso a ser analisado e são utilizados no programa de simulação.

- | | |
|---|--|
| • Densidade do líquido (kg/m^3): 1.00000E+03; | • Constante da válvula de estrangulamento (-): 0.00E+0; |
| • Aceleração da gravidade (m/s^2): 9.80000E+00; | • Altura do <i>riser</i> em catenária (m): 9.88600E+00; |
| • Constante do gás ($m^2/s^2/K$): 2.87000E+02; | • Abcissa do <i>riser</i> em catenária (m): 6.43500E+00; |
| • Temperatura do gás (K): 2.98000E+02; | • Constante da catenária (m): 3.01818E+00; |
| • Comprimento do <i>pipeline</i> (m): 5.74000E+01; | • Comprimento do <i>riser</i> (m): 1.25463E+01; |
| • Comprimento equivalente buffer do <i>pipeline</i> (m): 0.0; | • Tolerância de convergência (-): 1.00000E-06; |
| • Diâmetro interior do <i>pipeline</i> e <i>riser</i> (m): 5.25018E-02; | • Fator de sub-relaxamento (-): 2.00000E-01; |
| • Rugosidade do <i>pipeline</i> e <i>riser</i> (m): 4.60000E-05; | • Tempo do passo de referência (s): 1.00000E+02; |

Os dados de entrada são: vazão volumétrica de líquido (m^3/s), vazão mássica de gás (kg/s), pressão de absoluta de separação (Pa), tempo de simulação (s) e número de nós. Inicialmente são simulados alguns casos principais, considerando a pressão absoluta de separação de $2E5 Pa$ (2 bar), com as vazões mássicas de gás de: $1E-4$, $5E-4$, $1E-3$, $5E-3$, $1E-2 kg/s$. As vazões volumétricas de líquido principais são: $0,064947E-3$; $0,108245E-3$; $0,1623675E-3$; $0,21649E-3$; $0,64947E-3$; $1,29894E-3$; $1,94841E-3$; $3,24735E-3$ e $5,41225E-3 m^3/s$.

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

As saídas são dois arquivos. Um deles, MAIN_RESULTS.OUT, apresenta uma tabela com a evolução temporal de um conjunto de variáveis principais, como pressão no topo do *riser*, comprimento de penetração do líquido no *pipeline* e fração de vazio na base. O segundo arquivo, SLUGGING.OUT, lista os dados básicos e um conjunto de parâmetros geométricos e correspondentes ao estado permanente.

2.2. Análise dos Resultados

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

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

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

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

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

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

As Figuras 6 a 12 ilustram cada um dos tipos de estabilidade.

Severe Slugging 1, SS1

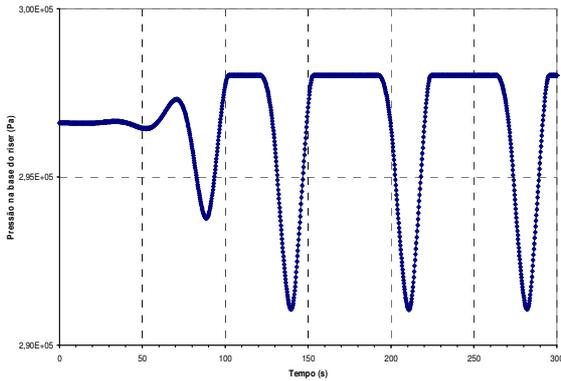


Figura 6: Pressão na base do riser – SS1

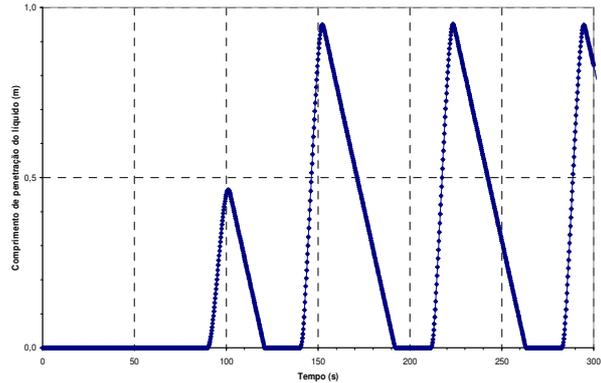


Figura 7: Comprimento de penetração de líquido – SS1

Severe Slugging 2, SS2

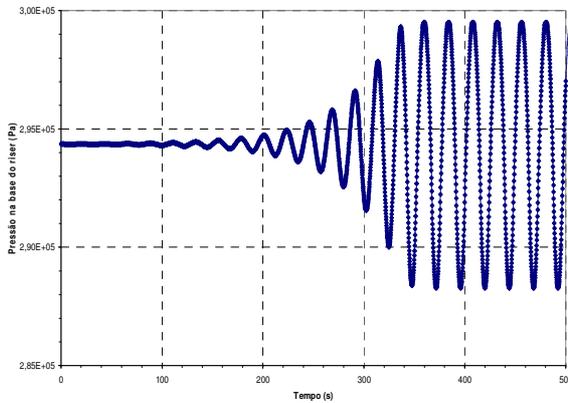


Figura 8: Pressão na base do riser – SS2

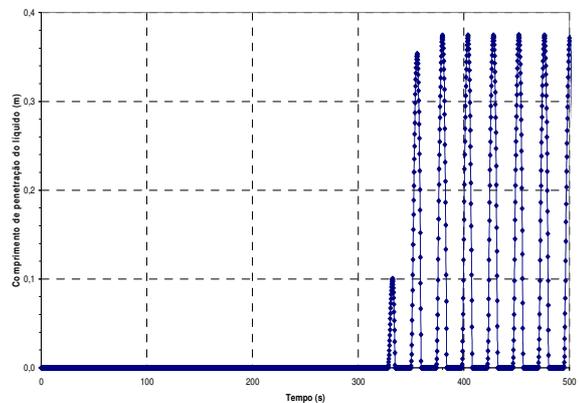


Figura 9: Comprimento de penetração de líquido – SS2

Severe Slugging 3, SS3

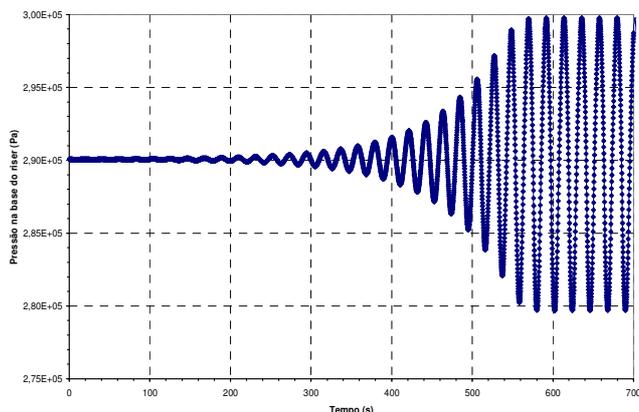


Figura 10: Pressão na base do riser – SS3

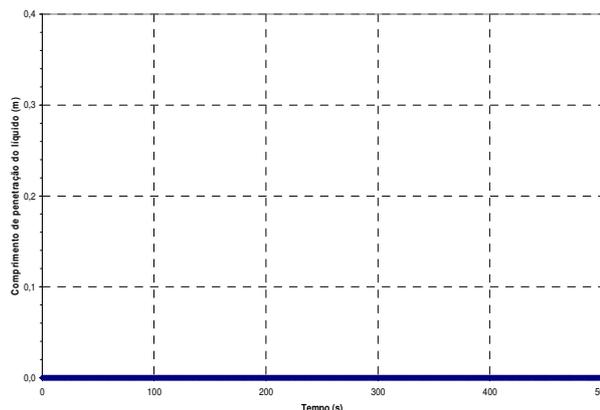


Figura 11: Comprimento de penetração de líquido – SS3

Estável

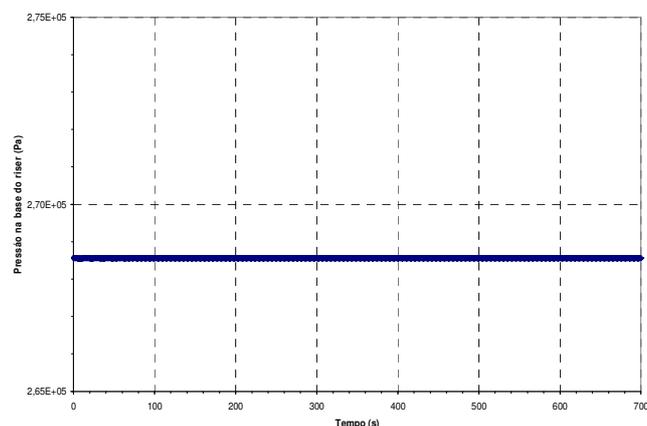


Figura 12: Pressão na base do riser – Estável

Comparação dos dados teóricos com os experimentais - 2bar

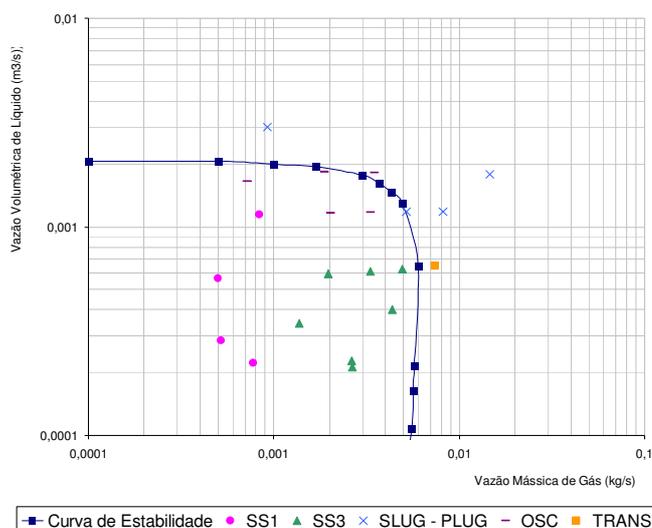


Figura 13: Curva de estabilidade (2 bar)

2.3. Curvas de Estabilidade

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

Para a construção da curva foram encontrados 13 pontos nela contidos e, então, fez-se interpolação entre eles. Para se chegar a cada um desses pontos foi adotado o método da bissecção, partindo-se dos casos principais simulados, até que se alcançasse uma precisão de 5% na sua localização.

Inicialmente, a vazão de líquido foi fixada em alguns valores principais (W1 a W9) e variou-se a vazão mássica de gás até que o ponto de limite de estabilidade fosse encontrado. Assim, o erro na determinação destes pontos está vinculado à vazão mássica de gás unicamente. A seguir, para um melhor refinamento da curva em regiões mais complicadas, foram calculados alguns pontos fixando-se a vazão mássica de gás e variando-se a vazão de líquido. Foram necessárias 106 simulações, a fim de se alcançar a precisão desejada na definição dos 13 pontos que compõem a curva.

Para observar a validade desta curva de estabilidade, os resultados obtidos são comparados com os dados experimentais fornecidos pela Petrobras (Wordsworth *et al.*, 1998). A classificação dos dados experimentais apresenta algumas diferenças em relação à classificação adotada neste projeto. *Slug - Plug* corresponde ao caso estável, os casos *Osc* e *Trans* correspondem a casos indefinidos, próximos à curva de estabilidade tanto na região estável como na instável.

Na Figura 13 os dados experimentais são apresentados juntamente com a curva de estabilidade. Os resultados são apresentados em vazão volumétrica de líquido por vazão mássica de gás, $\dot{m}_{g0} \times Q_{l0}$, ambos na escala logarítmica.

A região acima e à direita da curva contém os casos estáveis. A região abaixo e à esquerda da curva conta com

os casos de instabilidade SS1, SS2 e SS3.

Do gráfico de estabilidade (Figura 13): $Q_{l0} = j_{l0} A$, onde A é a área da seção do riser. O erro resulta $\frac{\Delta \dot{m}_{g0}}{\dot{m}_{g0}} < 0,05$, ou seja, 5%.

Variando-se o valor da pressão de separação, é possível construir novos mapas de estabilidade. O método para obtenção da curva e comparação com os resultados experimentais é idêntico ao apresentado anteriormente. Para o caso de pressão de separação $P_s = 3E5Pa$ (Figura 14) foram rodados 45 casos para se chegar aos 11 pontos principais da curva de estabilidade, que foram, então, interpolados. Já para o caso de pressão de separação $P_s = 4E5Pa$ (Figura 15) foram rodados 41 casos para se chegar aos 9 pontos principais da curva de estabilidade.

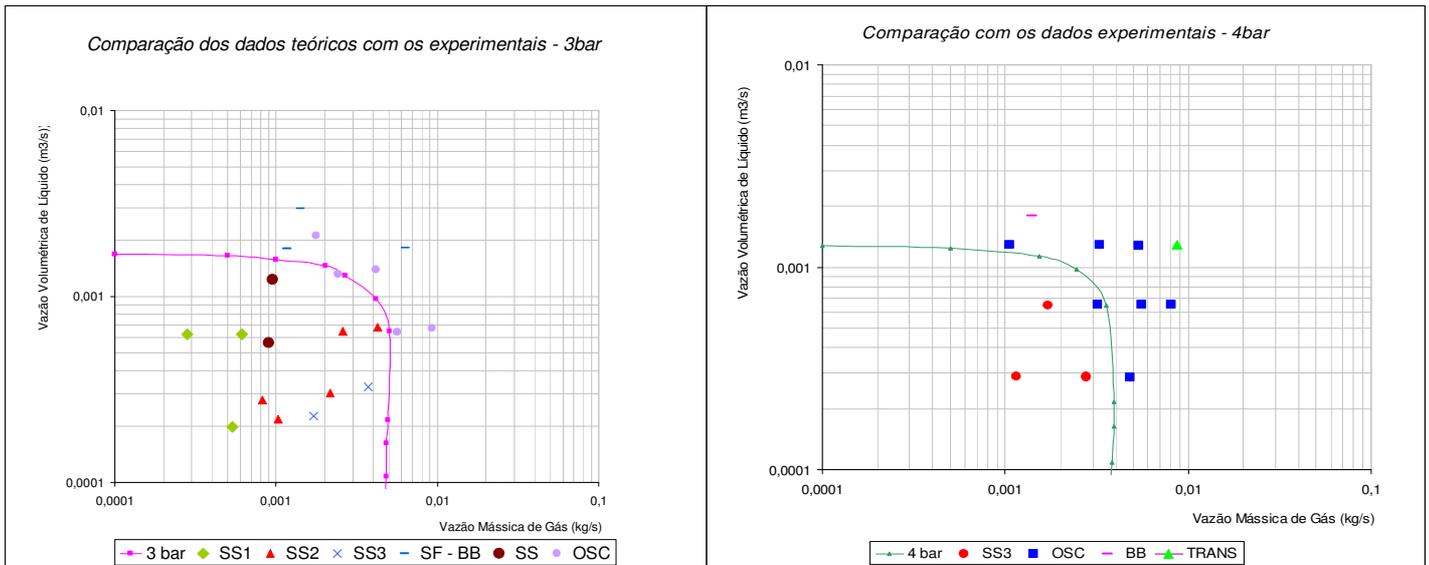


Figura 14: Curva de estabilidade (3bar)

Figura 15: Curva de estabilidade (4bar)

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

As curvas de estabilidade podem ser apresentadas em um único diagrama, mostrado na Figura 16. Assim, é possível analisar a influência da pressão de separação na estabilidade do escoamento analisado.

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

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

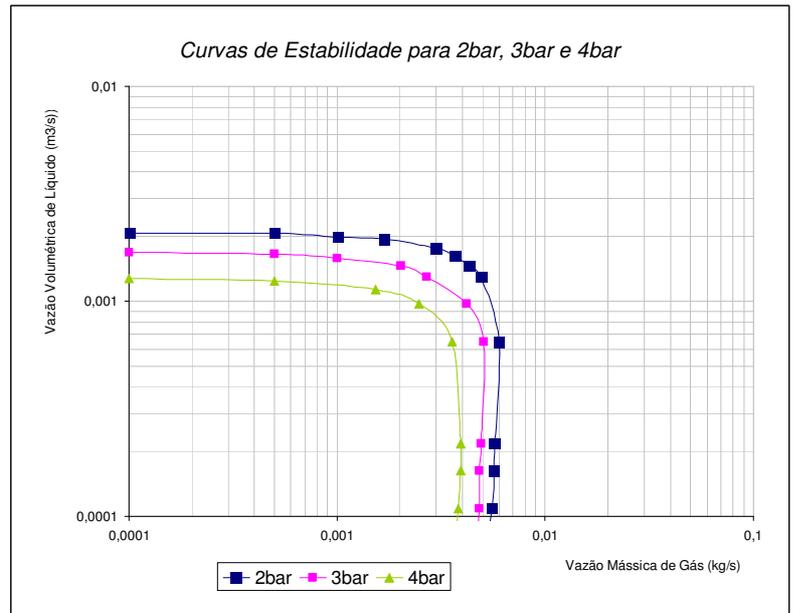


Figura 16: Comparação entre as curvas de estabilidade.

Na Figura 17 são representadas as curvas de estabilidade dispostas em três dimensões. As variáveis nos eixos são: vazão mássica de gás (em kg/s), vazão volumétrica de líquido (Q_{l0} em m^3/s) e pressão de separação (P_s em Pa). O gráfico foi construído utilizando-se o programa MATLAB (Matsumoto, 2001).

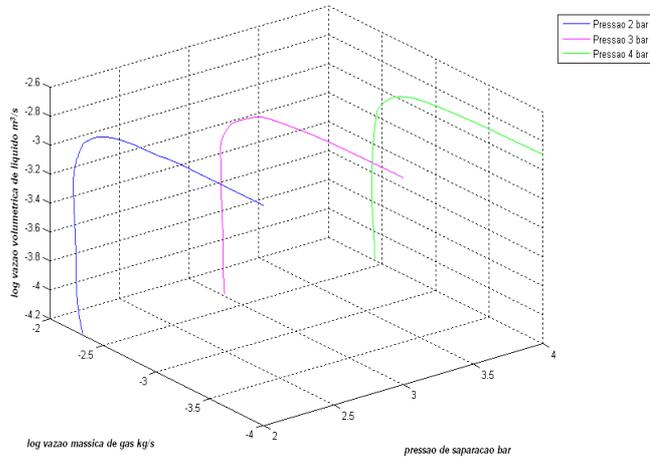


Figura 17: Curvas de estabilidade (3D)

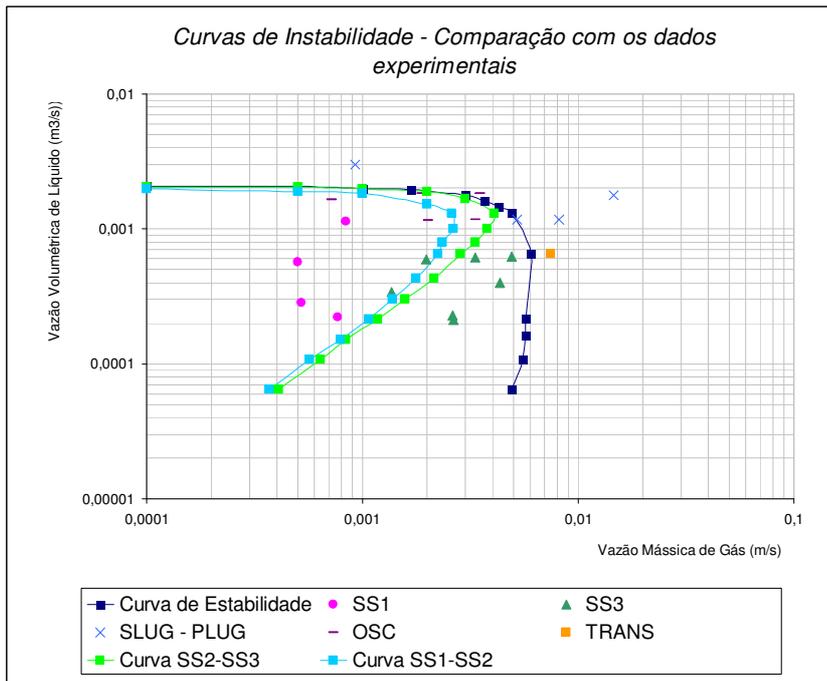


Figura 18: Curvas de diferentes tipos de instabilidade (2 bar).

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

2.6. Parâmetros adicionais

Pode-se também calcular alguns parâmetros básicos que caracterizam o ciclo de intermitência severa. Calcula-se, ainda, o comprimento de intermitência severa e a pressão média na base do riser. Tais parâmetros são calculados baseado no

2.5. Curvas de diferentes tipos de Instabilidade

Para completar o estudo sobre a estabilidade do escoamento multifásico em risers de geometria catenária, foram traçadas as curvas que separam as diferentes regiões de instabilidade, SS1, SS2 e SS3, considerando pressão de separação de 2 bar. Para a construção destas curvas foram encontrados 15 pontos contidos na curva de separação entre as regiões SS2 e SS3 (curva SS2-SS3) e 14 pontos contidos na curva de separação entre as regiões SS1 e SS2 (curva SS1-SS2). Fez-se, então, interpolação entre os pontos pertencentes a uma mesma curva. Para se chegar a cada um desses pontos foi adotado o método da bissecção, até que se alcançasse uma precisão de 5% na sua localização.

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

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

Os resultados são apresentados em vazão volumétrica de líquido por vazão mássica de gás, $\dot{m}_{g0} \times Q_{l0}$, ambos na escala logarítmica. Na Figura 18 os dados experimentais são apresentados juntamente com a curva de estabilidade.

arquivo MAIN_RESULTS.OUT, que resulta da simulação. Basta observar os ciclos de repetição da fração de vazio na base α_{rb} e topo do riser α_{ru} .

T1 (s), tempo de formação da bolha de gás: de $\alpha_{rb} = 0$ e $S_u = S_t$ até $\alpha_{ru} = 0$;

T2 (s), tempo de produção da bolha de gás: de $\alpha_{rb} = 0$ até $\alpha_{rb} \neq 0$;

T3 (s), tempo de penetração do gás: de $\alpha_{rb} \neq 0$ até $\alpha_{ru} \neq 0$;

T4 (s), tempo de depressurização do pipeline: de $\alpha_{ru} \neq 0$ até $\alpha_{rb} = 0$;

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

Comprimento de intermitência severa: $S_L = \bar{j}_{lu} T$, desde $\alpha_{ru} = 0$ até $\alpha_{ru} \neq 0$ no mesmo ciclo;

Pressão média na base: $\bar{p}_b = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_b \cdot dt$

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

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

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

Para $\dot{m}_{g0} = 4,5E-3 \text{ kg/s}$ e $Q_{l0} = 1,29894 \text{ m}^3/\text{s}$,

Nenhum tempo intermediário pode ser definido (ou eles resultam todos iguais a zero), já que existe penetração contínua de gás na base do riser. Assim, há necessidade de adaptar os cálculos novamente. Então, T1 foi considerado o ponto onde se atingiu a menor pressão na base e T2 o ponto onde se atingiu uma menor pressão novamente. A pressão média ainda pode ser calculada e vale $2,66E+05 \text{ Pa}$, mas o comprimento de slug é igual a zero.

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

As durações dos tempos do ciclo para os três casos instáveis citados acima são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Tempos do ciclo

TEMPO	DURAÇÃO (s)		
	SS1	SS2	SS3
T1	12	8,2	1,16E+03
T2	39,4	0,5	1,18E+03
T3	10,9		-
T4	8,9	13,3	-
T (total)	71,2	22	19,4

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

O programa computacional utilizado neste projeto simula escoamentos multifásicos em risers para gás e líquido sem transferência de massa. Para que seja validado, este programa deve satisfazer o critério de convergência, ou seja, a solução deve tender a um valor limite quando é aumentada a discretização espacial (número de nós). Além disso, o modelo deve ser suficientemente detalhado para que represente com a melhor aproximação a realidade que simula. Esta representação da realidade pode ser avaliada por meio de uma comparação com dados experimentais.

O caso aqui analisado leva em conta alguns parâmetros fixos e outros variáveis. Os parâmetros fixos caracterizam a instalação, o escoamento e as condições do experimento simulado, e estão apresentados a seguir.

- Viscosidade do gás (kg/m/s): $1.8E-5$;
- Viscosidade do líquido (kg/m/s): $1.E-3$;
- Massa específica do líquido (kg/m^3): $1.E3$;
- Rugosidade do conduto do pipeline e do riser (m): $2.0E-5$;
- Ângulo de inclinação do pipeline (grad): $1.0E0$;
- Índice de geometria do riser IGEOMRISER: 1;

- Aceleração da gravidade (m/s^2): 9.8E0;
- Constante do gás ($m/s^2 / K$): 2.87E2;
- Temperatura absoluta do gás (K): 2.98E2;
- Compr. do *pipeline* descendente (m): 9.14E0;
- Compr. equiv. de conduto buffer (m): 9.5E0;
- Diâmetro interno do *pipeline* (m): 2.54E-2;
- Altura do topo do *riser* (m): 3.0E0;
- Ângulo constante do *riser* (grad): 9E1;
- Pressão absoluta de separação (Pa): 1.0D5;
- Fator de convergência: 1.D-6;
- Fator de sub-relaxamento: 0.1D0.

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

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

2.7.1. Convergência

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

- Caso 1: $j_{g0} = 0.069$ m/s, $j_{l0} = 0.146$ m/s. Para todas as nodalizações analisadas (101, 51, 11 e 6 nós) os resultados obtidos foram $T_{ciclo} = 44,0$ s e $x_{max} = 1,7$ m. Assim, o programa mostrou-se convergente.
- Caso 2: $j_{g0} = 0.171$ m/s, $j_{l0} = 0.146$ m/s. Para este caso foram simulados os casos com 101 e 51 nós. Para ambos os casos foram encontrados os valores de $T_{ciclo} = 20,0$ s e $x_{max} = 0.2$ m, o que indica convergência do programa computacional.
- Caso 3: $j_{g0} = 0.079$ m/s, $j_{l0} = 0.065$ m/s. Neste caso, foram simulados os casos com 151, 101, 51, 11 e 6 nós. Os valores de x_{max} obtidos para estas nodalizações foram de 0,46 ; 0,46 ; 0,47 ; 0,51 e 0,56 m, respectivamente. Os períodos de intermitência severa T_{ciclo} obtidos foram 50,2 ; 50,3 ; 50,6 ; 53,0 e 54,7 s, respectivamente. Nota-se que, aumentando a nodalização, os resultados convergem.

2.7.2. Comparação com Dados Experimentais e Outros Modelos

O programa computacional é considerado satisfatório quando os resultados obtidos das simulações numéricas representam com boa aproximação os mesmos obtidos em experimentos. Neste projeto, os dados das simulações são comparados com os dados experimentais de Jansen (1990) na Tabela 2, para os períodos e os comprimentos de penetração. A maioria das simulações apresenta erros pequenos para os períodos entre os valores simulados e experimentais. Como existem tanto erros positivos quanto negativos, fica evidente que esta imprecisão é aleatória, ou seja, não é causada por um erro sistemático.

Tabela 2: Comparação entre os períodos e comprimentos de penetração obtidos através dos diversos modelos.

Caso analisado			T_{ciclo} / x_{max}			
Número	j_{g0} (m/s)	j_{l0} (m/s)	Experimental (s) / (m)	Simulação (s) / (m)	Taitel (s) / (m)	Sarica & Shoham (s) / (m)
1	0,069	0,146	42,0 / -	44,0 / 1,7	55,9 / 2,12	54,7 / 2,033
2	0,171	0,146	19,5 / -	20,0 / 0,2	22,6 / 0,52	22,8 / 0,514
3	0,079	0,065	38,5 / -	50,2 / 0,8	52,7 / 0,52	52,5 / 0,515
4	0,116	0,066	32,5 / -	33,0 / 0	0 / 0	38 / 0
5	0,275	0,155	15,2 / -	13,0 / 0	0 / 0	15 / 0

A Tabela 2 apresenta ainda os resultados dos modelos de Taitel (1986) e Sarica & Shoham (1991), referências no campo em questão. Sarica & Shoham (1991) apresentam diferentes valores para o tempo de ciclo e comprimento de penetração máximo quando utiliza nodalizações diferentes, o que evidencia falta de convergência do seu método. Ainda assim, os resultados foram comparados, utilizando-se os valores obtidos com a nodalização mais refinada disponível ($\Delta t = 0,1 s$).

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

Na Tabela 2, nota-se que os resultados deste projeto referentes ao comprimento de penetração são próximos dos resultados de Taitel (1986) e Sarica & Shoham (1991). No entanto, não estão disponíveis os dados experimentais.

3. CONCLUSÕES

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

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

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

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baliño, Jorge Luis (coordenador), Análise de Intermitência Severa em Risers de Geometria Catenária. *Relatório Final FUSP/Petrobras*, 2006.
- Baliño, J. L., Burr, K. P., Pereira, N. A. L., Modeling and simulation of severe slugging in pipeline-riser systems, *XIX International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2007)*, 8 p., Brasília, 2007.
- Baliño, J. L., Burr, K. P., Pereira, N. A. L., Modelado y simulación de intermitencia severa en sistemas línea-riser (em español), aceito em *Anales de la Asociación Física Argentina*, 7 p., 2008.
- Jansen, F. E., *Elimination of severe slugging in a pipeline-riser system*. M.S. Thesis, The University of Tulsa, Tulsa, 1990.
- Matsumoto, Élia Y., *MATLAB 6: Fundamentos de Programação*. São Paulo, Brasil. Érica, 2001.
- Sarica, C. & Shoham, O., A Simplified Transient Model for Pipeline-Riser Systems, Tulsa, EUA, *Chemical Engineering Science*, Vol. 46, No. 9, pp.2167-2179, 1991.
- Taitel, Y., Stability of severe slugging, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 12, pp. 203-217, 1986.
- Wallis, Graham B., *One-dimensional Two-phase Flow*. Nova York, EUA, McGraw-Hill 1969.
- Whalley, P.B., *Two-Phase Flow and Heat Transfer*. Oxford, EUA, Oxford University Press 1996. cap. 1-5, p. 1-32.
- Wordsworth, C., Das, I., Loh, W. L., McNulty, G., Lima, P. C. & Barbuto, F., Multiphase Flow Behaviour in a Catenary Shaped Riser, *CALtec Report*, vol. 1, Inglaterra, 1998.

MODELING AND SIMULATION OF MULTIPHASE FLOWS. APPLICATION TO SEVERE SLUGGING IN PETROLEUM PRODUCTION SYSTEMS

Natália Argene Lovate Pereira

nataliaargene@yahoo.com.br

The major part of the flows are multiphase ones, each phase can be physically distinguishable. The different velocities between de phases and its geometry have a great influence on the flow behavior, than it is used to classify the stability condition.

The objective of this working plan is the study of multiphase flow models used in petroleum production systems and its application to simulations of the severe slugging phenomenon using a computer program based on computational fluid dynamics.

After a study of the program, different cases were analyzed, based on a basic configuration in which different parameters such as the liquid and gas flow rate, separation pressure, simulation time and number of nodes were varied. The simulation time was chosen in order to let the system reach the limit cycle.

It was possible to classify each simulation case according to the stability type (stable, severe slugging 1 or SS1, SS2 or SS3) and then to built the stability map for the flowing configuration. Besides, for each case some characteristic parameters of the severe slugging cycle were calculated. These parameters are helpful in the analysis of the behavior of pressure at the riser bottom and in the influence of the gas flow rate in the slugging cycle.

Key-words: Severe Slugging, Stability, Pipeline-riser System, Multiphase Flow, Petroleum.