

ANÁLISE E ESTUDO DE ESTABILIDADE DO PADRÃO DE ESCOAMENTO GOLFADAS SEVERAS NUM SISTEMA *PIPELINE-RISER* ACOPLADO AO VASPS

Lúcio Gomes Nascimento, lucio.engmec@gmail.com¹

Felipe Chagas Storti, fc.storti@hotmail.com¹

Eugênio Libório Feitosa Fortaleza, efortaleza@unb.br¹

¹Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília - DF, CEP: 70910-900,

Resumo: O padrão de escoamento das golfadas severas existentes em sistemas *pipeline-riser* acoplados a separadores submarinos do tipo VASPS, implementados na prospecção de petróleo offshore, é caracterizada por ser do tipo instável. Uma vez que este padrão apresenta flutuações na produção, o nível de líquido no interior do VASPS muda de acordo com a frequência de produção. Além disso, ele pode causar danos permanentes à bomba do tipo BCS (bomba centrífuga submersa) inserida no fluido, ou prejudicar a eficiência da separação, produção e ainda assim prejudicar o escoamento de gás derivado do escoamento multifásico do poço. São definidos critérios de estabilidade em função das transições nos padrões de escoamento característicos para a estabilidade ou não do sistema de separação e produção. São fixados valores constantes para as razões de ar e água a fim de serem analisados e estudados os padrões de escoamento de acordo com cada critério atendido (eliminação ou redução das golfadas severas) e, portanto, obter os pontos de operação ideais entre as vazões e as pressões características para a manutenção de escoamento permanente de acordo com o controle da válvula de estrangulamento e/ou controle na pressão do separador. Para cada valor fixado os resultados se comportam de maneira diferente em relação ao anterior, devido à mudança do escoamento ser significativa.

Palavras-chave: VASPS, escoamento multifásico, golfadas severas, válvula de estrangulamento, pressão.

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios de garantir um escoamento permanente na produção de petróleo em águas profundas é a ocorrência do padrão de escoamento instável denominado “golfadas severas”. Esse padrão pode vir a ocorrer na base do *riser* ou em condições de “fim de vida” em um campo de produção, ou ainda devido a oscilações de densidade instáveis que podem existir em *risers* longos quando o gás entra em um processo de expansão causado pela queda de pressão durante a sua ascensão no *riser*. É de fundamental importância conhecer no projeto e na operação de grandes sistemas de produção, as condições em que esse tipo de fluxo instável ocorre e como ele pode e deve ser evitado (Camponogara *et al.*, 2017).

O padrão de escoamento “golfadas severas” é um fenômeno cíclico transiente que pode ocorrer em sistemas *pipeline-riser* através da existência de escoamento multifásico. Para vazões relativamente baixas, o líquido se acumula na base do *riser*, criando assim um bloqueio para o gás, até que seja atingida uma pressão suficiente grande para que o líquido acumulado seja expulso do *riser*. Após a produção de líquido e gás logo em seguida, o líquido restante no *riser* retorna até a base criando uma nova acumulação e um novo bloqueio para o gás, reiniciando, portanto, um novo ciclo. A Figura 1 abaixo ilustra o fenômeno da golfada severa.

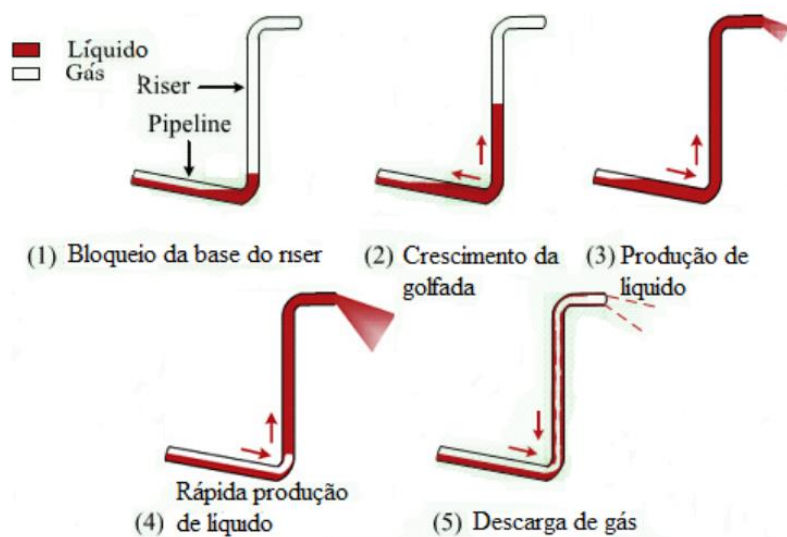


Figura 1. Fenômeno da golfada severa. Reproduzido de Malekzadeh *et al.* (2012).

O escoamento indesejável provoca flutuações no escoamento e, ainda, um aumento no gradiente de pressão. Portanto, ele cria problemas potenciais nas instalações a jusante e a montante do *riser*, no qual foram projetados para operar em condições de estado permanente (separadores, bombas e compressores). No caso dos separadores submarinos, as vazões durante o pico de oscilação na produção de líquidos e gases podem causar um aumento excessivo no nível do líquido e na pressão dentro do VASPS (*Vertical Annular Separator and Pumping System*), o que, por sua vez, pode levar a uma interrupção completa da unidade de produção. Além disso, um aumento excessivo da contrapressão na cabeça do poço pode levar ao fim da produção e ao abandono do poço. A Figura 2 mostra uma ilustração completa da unidade de produção.

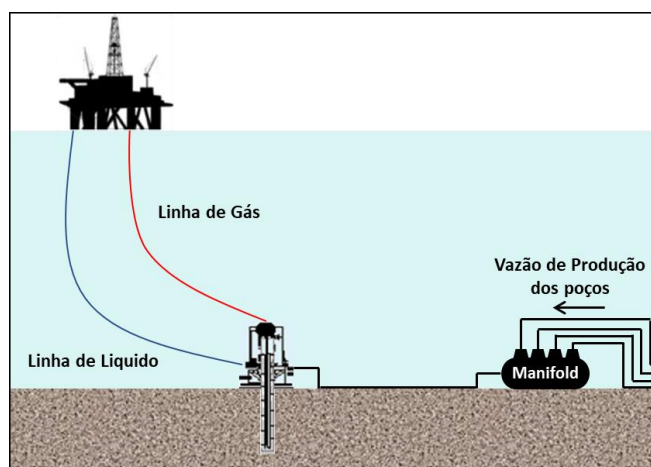


Figura 2. Layout ilustrativo completo da unidade de produção (a figura não está em escala).

O trabalho apresentado neste artigo foi baseado no estudo de Malekzadeh *et al.* (2012) que realizou experimentos para o escoamento bifásico de ar e água em um sistema relativamente longo; composto por um tubo de 123m de comprimento representado por um recipiente do tipo *buffer*, conectado a um longo tubo horizontal composto por gás, cujo comprimento é de 100m, seguido por um *riser* de 15,5m (H) de altura.

Diferentemente do Malekzadeh *et al.* (2012), onde um estudo numérico e experimental comparativo foi realizado para qualificar e quantificar os diferentes subpadrões de golfadas severas através de um mapa do padrão de escoamento; o objetivo deste trabalho é, portanto, adicionar e exibir relações ideais entre as vazões e a pressão do separador e/ou a contrapressão para a garantia de escoamento permanente de acordo com o controle da válvula de estrangulamento.

2. MODELO TEÓRICO

O modelo de descrição do problema faz referência aos modelos dos padrões de escoamento em tubos horizontais e verticais encontrados no trabalho de Shoham (2006), onde as equações são aplicadas para cada caso diante do trabalho de outros autores. Para cada um dos dois tipos de escoamento, estável e instável, está relacionada uma característica intrínseca.

Neste trabalho são apresentados dois critérios principais para a estabilidade da separação e produção posteriores ao sistema *pipeline-riser* (ver Fig. 2).

2.1. Primeiro Critério

O primeiro critério de estabilidade é relacionado aos tipos de padrão de escoamento existentes de acordo com as variações nos valores das vazões de gás e líquido. Este critério foi definido por Taitel e Dukler (1976) para a transição do padrão estratificado para o intermitente. Portanto, o primeiro critério é definido como sendo:

$$V_{SG} > \alpha(1 - H_L) \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G) \cos \beta A_G}{\rho_G S_i} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

O termo V_{SG} é a velocidade superficial do gás, α é a fração de vazio na região estratificada do pipeline, H_L é o *holdup* líquido, g é a gravidade, ρ_L é a massa específica do líquido, ρ_G é a massa específica do gás, β é o ângulo de inclinação do pipeline, A_G representa a área de escoamento para o gás acima do filme não perturbado e S_i é o perímetro da interface entre as fases.

Para o escoamento de líquido e gás com velocidades superficiais relativamente altas, pequenas bolhas hidrodinâmicas são geradas dentro do *pipeline* onde, ainda, é transportado pelo *riser*. Durante este padrão, o gradiente de pressão tem uma pequena oscilação no qual ocorre em frequências relativamente altas. Portanto, o padrão de escoamento existente no sistema *pipeline-riser* para o caso torna-se estável, e é caracterizado como do tipo “golfadas”.

Para vazões de gás em condições *standard* predominantes no sistema *pipeline-riser* que satisfaçam a Eq. (1), pode-se chegar aos valores para as pressões no separador que garantem a estabilidade do escoamento multifásico no sistema de separação e produção. Esses valores representam a pressão mínima necessária no qual a estabilidade para o sistema é alcançada. Caso o primeiro critério não seja atendido, o escoamento existente é caracterizado pelo do tipo instável, predominando, portanto, como sendo do tipo “golfadas severas” (ver Fig. 1). Um segundo critério então é estabelecido através do controle de uma válvula de estrangulamento (*choke valve*) instalada antes da entrada do VASPS.

2.2. Segundo Critério

O padrão de escoamento “golfadas severas” é tipicamente associado a baixas vazões de líquido e gás. É requerido que o padrão inicial de escoamento no *pipeline* seja o do tipo “estratificado”. Além disso, é necessário primeiro que o líquido chegue ao topo do *riser* do que o gás chegue a sua base durante a formação da “golfada severa”.

Uma das maneiras de controlar esse fluxo indesejável é através da instalação de uma válvula de estrangulamento antes da entrada do separador VASPS (Jahanshashi *et al.*, 2017). Controlando a vazão e/ou a pressão dentro do separador, a válvula funcionará para inibir o padrão de escoamento indesejável, tornando o escoamento como do tipo golfada, ou seja, estável. Com a implementação da válvula de estrangulamento na entrada do VASPS, a pressão do separador agora está fixada e uma nova pressão torna-se importante para controlar o tipo de padrão de escoamento; esta pressão é denominada como contrapressão. A equação que determina o segundo critério de estabilidade ou não do escoamento através da pressão característica é:

$$P_{ss} + CV_m^2 > \frac{\alpha L \rho_L g}{\alpha'} \left(H_o - \frac{2CV_m^2}{\rho_L g H} \right) - H_o H \rho_L g \quad (2)$$

Onde P_{ss} representa a pressão no separador (VASPS), o termo CV_m^2 representa a pressão na válvula de estrangulamento, sendo a soma $P_{ss} + CV_m^2$ definido como contrapressão ou pressão de retorno P_B , C uma função da densidade das fases de mistura, H_o é o *holdup* líquido médio no *riser*, L é o comprimento do pipeline, H é a altura do *riser*, ρ_L é densidade da água, g é a aceleração da gravidade, α é a fração de vazio no *pipeline*, α' é a fração de vazio da frente de gás que penetra no líquido contido no *riser*, cujo valor é fixado como 0,89 de acordo com Taitel (1986). A Tabela 1 apresenta os valores correspondentes às propriedades físicas dos fluidos utilizados.

Tabela 1. Propriedades dos fluidos.

Fluidos	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade dinâmica (kg/m.s)
Gás	1.2	7x10 ⁻⁴
Água	1000	1.9x10 ⁻⁵

Quando o lado direito da desigualdade apresentada na Eq. (2) possui um valor maior do que o lado esquerdo, o padrão indesejável de golfadas severas (*severe slugging*) não pode ser controlado. No entanto, quando o critério da Eq. (2) é satisfeito, ou seja, o primeiro termo $P_{ss} + CV_m^2$ definido como contrapressão ou pressão de retorno, é maior que a

pressão hidrostática da coluna de líquido definido pelo segundo termo da Eq. (2), será possível, portanto, realizar o controle através da válvula de estrangulamento (*choke valve*) ou do controle da pressão fixada no separador, P_{ss} .

3. RESULTADOS

Para os três primeiros resultados da análise, o eixo da abcissa é caracterizado pela variável P_B que representa a contrapressão no topo do sistema *pipeline-riser* quando o segundo critério de estabilidade é atendido.

O eixo da ordenada é caracterizado pela variação da vazão volumétrica de líquido (Q_L) em todos os casos. Ao todo, três razões entre as vazões volumétricas do ar (condições *standard*) e da água (RGO) no sistema *pipeline-riser* são fixadas ainda como constantes para a simulação de um caso onde as vazões de água e ar nas condições *standard* irão variar nas mesmas proporções. Os valores constantes para as razões entre as vazões volumétricas do ar (condições *standard*) e da água (RGO) no sistema *pipeline-riser* são: RGO = 1, RGO = 10, RGO = 100.

É possível notar a partir da Fig. 3 a existência de um ponto de inflexão próximo ao valor de $P_B = 2,28 \times 10^5$ Pa para a contrapressão e $Q_L = 8,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para a vazão volumétrica de líquido, apresentando, portanto, o momento em que a válvula de estrangulamento (*choke valve*) é solicitada para o controle do padrão de escoamento indesejável. Antes deste ponto o padrão de escoamento “golfadas severas” (*severe slugging*) não pode ser controlado levando a necessidade de um novo mecanismo de controle, como o sistema de *gas-lift*, por exemplo, ou de uma mudança de parametrização nos mecanismos existentes. A variação da contrapressão à medida que a vazão de líquido aumenta não é significativa para este caso devido à amostragem das variáveis de entrada ser pequena.

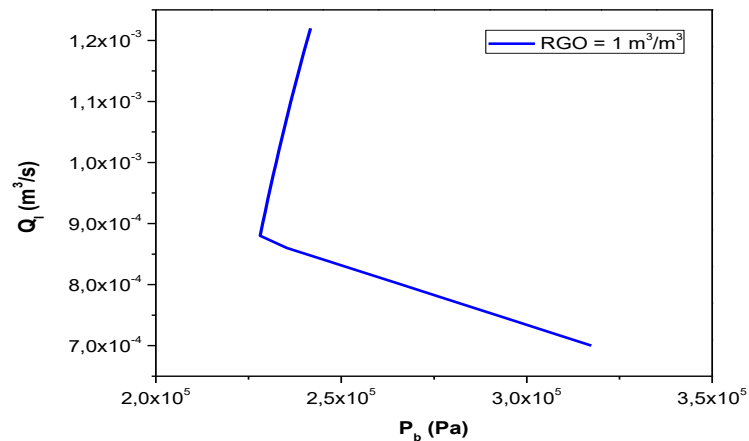


Figura 3. Relação teórica entre a contrapressão e a vazão de líquido para uma razão RGO = 1.

Através da Fig. 4 é possível observar mais uma vez o valor da contrapressão de $P_B = 2,28 \times 10^5$ Pa no ponto de inflexão no qual o segundo critério é atendido. A vazão correspondente para o início do controle das golfadas severas (*severe slugging*) apresenta o valor de $Q_L = 1,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. A variação da contrapressão à medida que a vazão de líquido aumenta é significativa para este caso, assim que o segundo critério de estabilidade é atendido no sistema de escoamento multifásico.

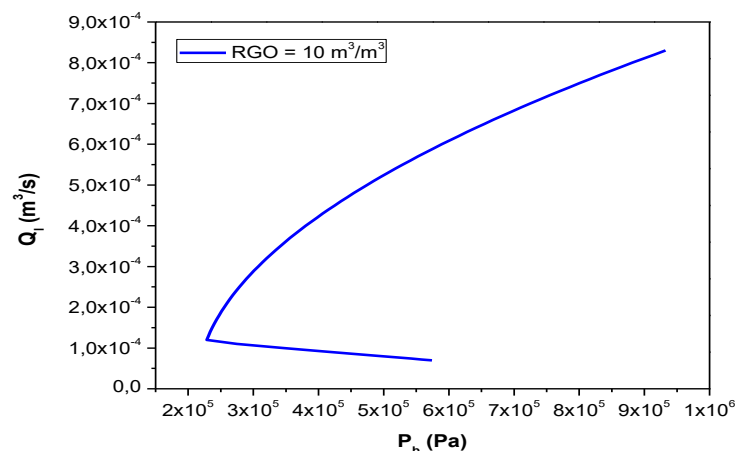


Figura 4. Relação teórica entre a contrapressão e a vazão de líquido para uma razão RGO = 10.

Nos resultados para esses dois primeiros casos, RGO = 1 e RGO = 10, a pressão hidrostática diminui praticamente de forma linear até atingir o ponto crítico no qual o segundo critério de estabilidade é atendido e os mecanismos de

redução ou eliminação das golfadas severas (*severe slugging*) são solicitados. A pressão hidrostática e a vazão volumétrica de líquido são, portanto, inversamente proporcionais até atingir o ponto crítico, no qual uma equação linear pode ser obtida para descrever tal relação.

Outro fator que deve ser analisado nas Fig. 3 e Fig. 4 é a eficiência de produção existente entre o escoamento permanente controlado através da válvula de estrangulamento e o escoamento instável caracterizado pelas golfadas severas (ver Eq. 2). O ponto de inflexão em ambos os gráficos define os resultados para a pressão hidrostática (caso instável - *severe slugging*) antes deste ponto, e após este ponto, são obtidos os resultados para a contrapressão (caso estável - escoamento permanente).

Analisando um caso limite na Fig. 3 em que a pressão correspondente à pressão no caso instável – pressão hidrostática da coluna de líquido no *riser* (P_H) – e a contrapressão (P_B), depois que a válvula de estrangulamento é acionada como mecanismo de controle, no qual possuem o mesmo valor de $P_B = P_H = 2,35 \times 10^5 \text{ Pa}$; pode-se observar a grandeza do ganho de produção em relação à vazão de líquido correspondente a cada pressão. Para o caso da existência da golfada severa, o valor associado a P_H foi de $Q_L = 8,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, já para o caso de escoamento permanente controlado, o valor associado a P_B foi de $Q_L = 1,25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Ou seja, um ganho de 47% de produção entre o escoamento desejável controlado e o indesejável através da válvula de estrangulamento (*choke valve*), para uma mesma pressão limite correspondente.

Analisando agora um caso limite na Fig. 4 em que as pressões P_B e P_H possuem o mesmo valor de $P_B = P_H = 5,75 \times 10^5 \text{ Pa}$; pode-se observar novamente a grandeza do ganho de produção em relação à vazão de líquido. Para o caso da existência da golfada severa, o valor associado a P_H foi de $Q_L = 7,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, já para o caso de escoamento permanente controlado, o valor associado a P_B foi de $Q_L = 5,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Ou seja, um ganho muito maior na produção (aproximadamente oito vezes) entre o escoamento desejável controlado e o indesejável através da válvula de estrangulamento (*choke valve*), para uma mesma pressão limite correspondente.

Através destes dados fica evidente o quanto a produção pode ser aumentada através do controle da válvula de estrangulamento, a partir do momento em que ela pode ser acionada, comparada para uma mesma pressão limite correspondente entre os casos. Isso pode ser explicado através da mudança das características do escoamento, ou seja, em relação ao aumento das vazões volumétricas de ar e água. Percebe-se que a partir do momento que a razão entre as vazões volumétricas do ar (condições *standard*) e da água (RGO) aumenta (ver Fig. 4), ocorre um ganho de produção muito mais significativo entre os dois casos para uma mesma pressão limite correspondente, já que a vazão volumétrica de ar passa a ser 10 vezes superior a de água, portanto, o escoamento permanente tende a ocorrer mais rápido assim que o segundo critério para o acionamento da válvula de estrangulamento é atendido.

Para o resultado obtido na Fig. 5 pode ser observado que o segundo critério de estabilidade é atendido desde o início da simulação, apresentando este ponto inicial como sendo o ponto crítico. Os valores para a contrapressão e para a vazão volumétrica de líquido correspondente a esse ponto são: $P_B = 3,66 \times 10^5 \text{ Pa}$ e $Q_L = 4,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

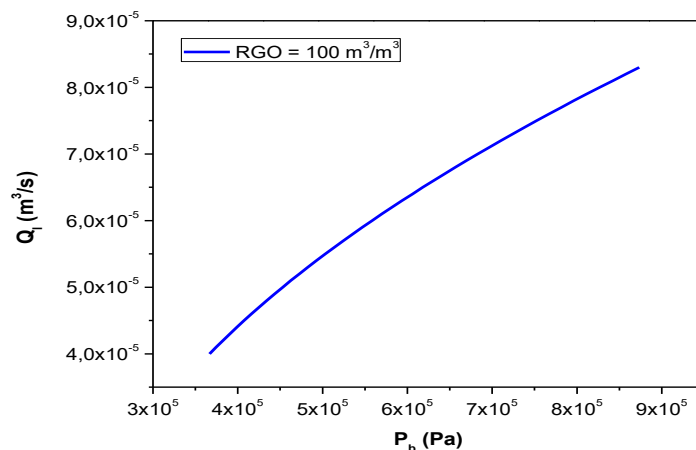


Figura 5. Relação teórica entre a contrapressão e a vazão de líquido para uma razão RGO = 100.

Esta mudança no valor da contrapressão associada ao ponto inicial no qual o segundo critério é atendido ($P_B = 3,66 \times 10^5 \text{ Pa}$) pode ser explicada pelo alto valor da razão das vazões volumétricas de ar nas condições *standard* e de água (RGO), no qual é necessário um valor muito baixo para a vazão volumétrica de líquido e um valor muito alto para a vazão volumétrica de gás nas condições *standard*, representado pela ordem de $\text{RGO} = 100$. Se a variação da vazão volumétrica de líquido inicia-se num valor muito mais baixo que $Q_L = 4,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, aproximadamente $Q_L = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, a contrapressão associada ao ponto crítico no qual o segundo critério é atendido apresentaria o mesmo valor para os outros casos; $P_B = 2,28 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Para o caso da Fig. 5 não é possível fazer a análise qualitativa e quantitativa entre o ganho de produção para o escoamento controlado em relação ao escoamento instável, para uma mesma pressão limite correspondente, uma vez que o segundo critério de estabilidade é atendido desde o início da simulação.

4. CONCLUSÃO

A relação obtida através do segundo critério de estabilidade atendido identificou o ponto crítico ($P_B = 2,28 \times 10^5 \text{ Pa}$), no qual o mecanismo de solução através do controle de uma válvula de estrangulamento (*choke valve*) poderia ser utilizado como método de redução e eliminação das golfadas severas (*severe slugging*), para os casos estudados segundo as variações fixadas do escoamento multifásico (RGO). Antes deste ponto crítico foi evidenciado que o padrão indesejável não poderia ser controlado, já que o segundo critério de estabilidade não tinha sido atendido, ou seja, a pressão hidrostática da coluna de líquido (P_H) era superior do que a contrapressão (P_B) no topo do sistema *pipeline-riser*. Somente uma manipulação nas constantes da pressão na válvula de estrangulamento e/ou no valor da pressão no separador pré-determinada (P_{ss}) através do primeiro critério de estabilidade atendido, por exemplo, poderia trazer a solução do problema. Portanto, obtidas as relações para as vazões e pressões características do modelo apresentado, pode-se chegar ao controle ideal através de mecanismos utilizados como forma de prevenção, redução ou eliminação das golfadas severas no sistema de escoamento multifásico, de separação e produção vigente. Relações estas que podem demonstrar a eficiência qualitativa e quantitativa no ganho de produção de um escoamento permanente controlado em relação a um escoamento instável, para uma mesma pressão limite correspondente.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela CAPES e UnB.

6. REFERÊNCIAS

- Camponogara, E., Teixeira, A.F., Hulse, E.O., Silva, T.L., Sunjerga, S. and Miyatake, L.K., 2017, "Intregated methodology for production optimization from multiple offshore reservoirs in the santos basin", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 14 (2), pp. 669-680.
- Jahanshahi, E., Backi, C.J. and Skogestad, S., 2017, "Anti-slug control based on a virtual flow measurement", Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 53, Part B, pp. 299-307.
- Malekzadeh, R., Mudde, R.F. and Henkes, R.A.W.M., 2012, "Experimental and numerical investigation of severe slugging in horizontal pipeline-riser systems", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 46, pp. 9-21.
- Shoham, O., 2006, "Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes", Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, U.S.A.
- Taitel, Y., 1986, "Stability of severe slugging", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 12, pp. 203-217.
- Taitel, Y. and Dukler, A.E., 1976, "A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow", AIChE Journal, Vol. 22, No. 1, pp. 47-55.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

ANALYSIS AND STABILITY STUDY OF SEVERE SLUGGING FLOW PATTERN IN A PIPELINE-RISER SYSTEM COUPLED TO VASPS

Lúcio Gomes Nascimento, lucio.engmec@gmail.com¹

Felipe Chagas Storti, fc.storti@hotmail.com¹

Eugênio Libório Feitosa Fortaleza, efortaleza@unb.br¹

¹Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília - DF, CEP: 70910-900,

Abstract. The flow pattern of severe slugging in pipeline-riser systems coupled to VASPS submarine separators type, implemented in the offshore oil prospecting, is characterized by being unstable. Since this pattern exhibits fluctuations in production, the liquid level inside the VASPS changes according to the frequency of production. In addition, it may cause permanent damage to the SCP (submerged centrifugal pump) type pump inserted into the fluid, or impair the efficiency of separation, production and still impair the flow of gas derived from the multiphase flow of the well. Stability criteria are defined as a function of transitions in the characteristic flow patterns for the stability or not of the separation and production system. Constant values are set for the air and water ratios in order to analyze and study the flow patterns according to each attended criterion (elimination or reduction of severe slugging) and, therefore, obtain points of ideal operation between the flow rates and the characteristic pressures for maintaining permanent flow according to the control of the choke valve and/or control in the separator pressure. For each fixed value, the results behave differently from the previous one, due to the change of the flow being significant.

Keywords: VASPS, multiphase flow, severe slugging, choke valve, pressure.