

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Estudo Experimental de Intermittência Severa em um Sistema Pipeline-riser de Água-ar

AUTORES:

Alan Junji Yamaguchi, Gabriel Romualdo de Azevedo, Jorge Luis Baliño

INSTITUIÇÃO:

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba-PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8ºPDPETRO.

ESTUDO EXPERIMENTAL DE INTERMITÊNCIA SEVERA EM UM SISTEMA PIPELINE-RISER DE ÁGUA-AR

Abstract

This work aims to study the severe slugging phenomenon, which may occur at offshore oil production systems. This phenomenon, associated to low flows and topology, is characterized by the formation of long liquid slugs and gas pockets, causing pressure and flow rate oscillations. The primary separation system at the platform may even shut down because of the continuous liquid production during the cycles. Production losses are also to be expected because of the flow rate oscillations of gas and liquids. The periods of the severe slugging cycles also tend to increase as the pipeline-riser system is longer, showing the importance of its study. In this work the first experimental results of the Multiphase Laboratory of University of São Paulo are presented and compared with numerical models in order to obtain stability maps for a pipeline-riser system with air-water flow.

Introdução

A produção de petróleo tem avançado para águas cada vez mais profundas implicando em maiores distâncias entre o reservatório e a plataforma. A configuração das tubulações em que é realizado o transporte de fluidos pode consistir de um sistema *pipeline-riser* em que o *pipeline* é descendente seguido por um *riser* vertical. Se a vazão dos fluidos presentes for baixa é possível que o fenômeno de intermitência severa aconteça. Esse fenômeno é caracterizado por ser cíclico em que ocorre acúmulo de líquido na base do *riser* impedindo a passagem de gás. Além disso, pode causar perdas na produção pelas altas taxas de vazão instantâneas, alta oscilação de pressão, podendo até mesmo causar o desligamento do sistema de separação na plataforma.

Para baixas vazões o escoamento no *pipeline* é estratificado enquanto no *riser* costuma ser em golfadas. Quando o sistema se desestabiliza, isto é, quando o aumento pressão hidrostática causada pela queda do líquido devido à passagem de uma bolha for maior que o aumento da pressão na base do *riser* devido a vazão de gás o ciclo de intermitência severa começa. Nesta primeira etapa conhecida como formação de *slug*, o líquido começa a acumular na base do *riser* impedindo a passagem de gás (Figura 1a). Na etapa de produção de *slug* o nível de líquido chega ao seu ponto máximo, que no caso é o separador, resultando no ponto de máxima pressão na base do *riser* (Figura 1b). Devido a esse fato começa a etapa de penetração de gás em que o gás entra pelo *pipeline* e o líquido acaba sendo puxado de volta por começar a sair pelo topo do *riser* (Figura 1c). Como consequência dessa penetração a pressão vai diminuindo e a vazão de gás aumenta. Após sua chegada no topo do *riser* ocorre a formação de escoamento estratificado no *pipeline* e um escoamento intermitente/anular no *riser*. Esse fato somado à rápida descompressão do gás gera uma violenta expulsão do mesmo da coluna seguido de uma forte descompressão que reinicia o processo de formação de *slug* (Figura 1d).

Wordsworth *et al.* (1998) apresentou os resultados de um trabalho realizado pela empresa CALTEC juntamente com a Petrobras sobre a influência da pressão no escoamento multifásico em um sistema *pipeline-riser* em catenária. Além disso, também foi estudado a iniciação e as características da intermitência severa. Neste estudo foram usados os fluidos água e ar para uma pressão que variou de 1 a 15 *barg*. Os resultados experimentais são usados para testar modelos numéricos e ajudar no desenvolvimento de novas técnicas de modelagem sobre o fenômeno.

Existem vários outros estudos experimentais como Schmidt *et al.* (1979), Taitel (1986), Vierkandt (1988) e Jansen *et al.* (1996) sobre a intermitência severa. Em geral os resultados experimentais são usados como base para estudar e desenvolver modelos que possam prever a região instável e assim dizer se poderá ocorrer intermitência severa. Meios de mitigação do fenômeno como *choking* e injeção de gás na base do *riser* também são estudados.

Baliño *et al.* (2010) desenvolveu um modelo numérico para intermitência severa com água e ar em *risers* com inclinações variáveis e aplicou esse modelo para simular as condições experimentais de Wordworth *et al.* (1998). Nemoto *et al.* (2012) estendeu esse modelo para um sistema trifásico de água-gás-óleo enquanto que em Baliño (2014) o modelo foi modificado para levar em consideração efeitos de inércia e a influência de dispositivos de mitigação de intermitência severa como o *choking* e a injeção de gás. Azevedo *et al.* (2015) desenvolveu um modelo que trabalha com a teoria de estabilidade linear para prever a região instável para um sistema *pipeline-riser* que trabalha com água e ar.

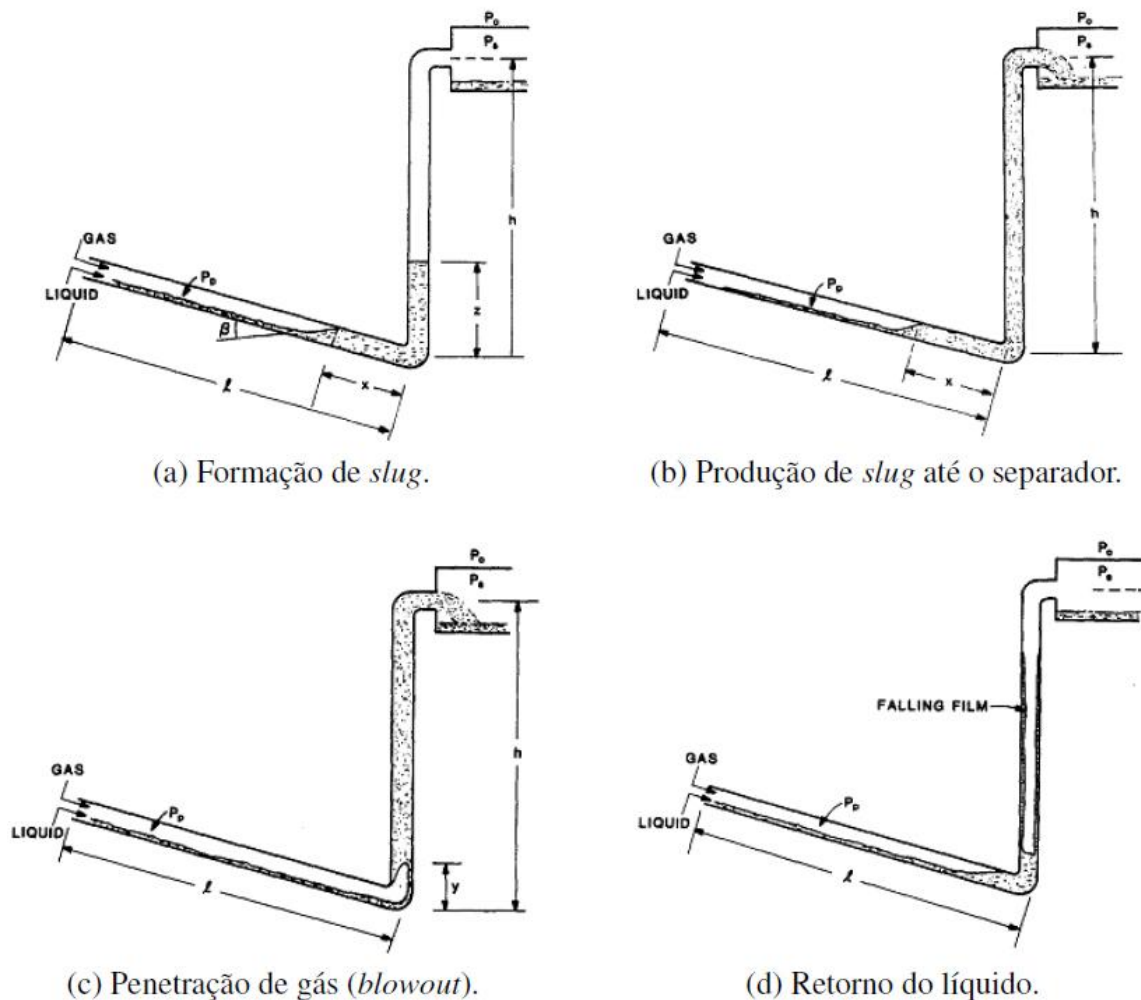


Figura 1. Ciclo de intermitência severa.

O objetivo deste trabalho consiste em usar o sistema *pipeline-riser* do laboratório multifásico da Escola Politécnica de Universidade de São Paulo para recriar condições de intermitência severa e comparar os resultados obtidos através de mapas estabilidade com o modelo desenvolvido por Azevedo *et al.* (2015). Além disso, os históricos de pressão na base do *riser* obtidos experimentalmente serão comparados com o modelos numéricos de Baliño *et al.* (2010, 2014) e uma análise foi realizada para verificar visualmente a intermitência severa.

Metodologia

A bancada experimental do laboratório multifásico é composta por um *pipeline* de 7,2 metros seguido de um *riser* vertical de 7 metros. A tubulação é de 2 polegadas de diâmetro e é feita de acrílico permitindo a visualização do escoamento. A inclinação do *pipeline* varia de -1 a +10 graus

sendo que ângulos positivos indicam *pipeline* descendente e ângulos negativos *pipeline* ascendente. No topo do *riser* há um separador centrífugo de água-ar. O ar é descartado abaixo do piso do laboratório enquanto a água é direcionada para um tanque de acumulação de 1000 litros.

A água é alimentada para o circuito através de uma bomba centrífuga (W22 da Weg) controlada por um inversor de frequência. A vazão de ar é controlada por um compressor (Aircenter SX3 da Kaeser) em uma linha de 3/4 de polegadas. A linha de ar possui uma bifurcação de maneira que o ar pode ser injetado no *pipeline* e também na base do *riser*. A conexão na base do *riser* tem como objetivo estudar o efeito de injeção de gás na intermitência severa como meio de mitigação do fenômeno.

Os principais equipamentos de medição são transdutores de pressão (nanométrico e diferencial), temperatura nos pontos mais importantes do circuito como o separador, nas injeções de gás e na base do *riser*. A vazão volumétrica de água (Q_{l0}) é medida por um medidor eletromagnético (Sitrans MAG 5000 da Siemens) e um medidor de Coriolis (Sitrans MAG 6000 da Siemens) é usado para medir a vazão mássica de gás (m_{g0}). As vazões de fluidos são usadas para o cálculo das velocidades superficiais na condição de referência que são necessárias para a criação dos mapas de estabilidade:

$$j_{g0} = \frac{R_g T_0 \dot{m}_{g0}}{P_0 A} \quad (1)$$

$$j_{l0} = \frac{Q_{l0}}{A} \quad (2)$$

Onde A é a área de passagem e $R_g = 287 \text{ J/kg/K}$ é a constante do gás. A condição de referência é definida pela pressão $P_0 = 1,013 \text{ bara}$ e a temperatura $T_0 = 293 \text{ K}$.

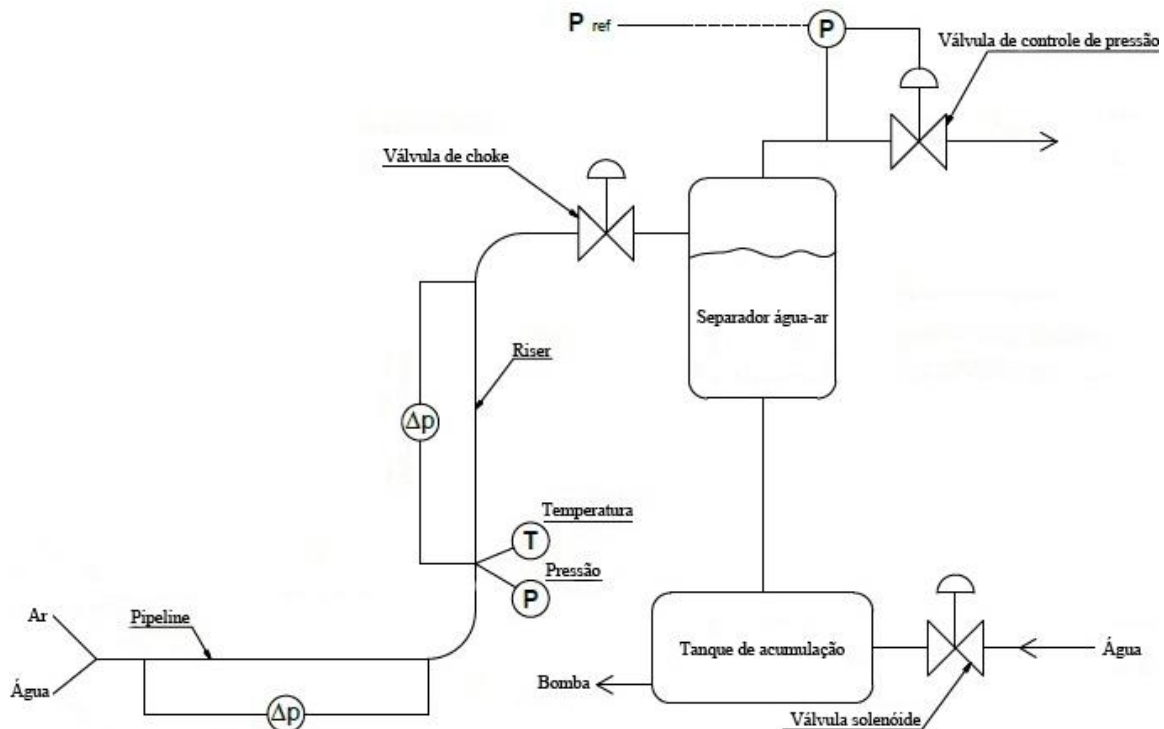


Figura 2. Esquema simplificado da bancada experimental.

Um controlador lógico programável é usado para controlar a maioria dos instrumentos da bancada experimental. O *hardware* usado é o FAM3 da Yokogawa usando entradas e saídas analógicas e digitais além de um controle proporcional integrativo derivativo para a conexão e controle dos

equipamentos. A aquisição de dados é realizada pelos programas *WideField* e *Fast Tools* da Yokogawa.

Considerando que o modelo de estabilidade linear trabalha com uma vazão de gás constante para os cálculos optou-se pelo uso de placas de orifício para o controle de vazão mássica de ar. As placas de orifício foram projetadas de maneira que o gás atinja a condição de bloqueio em sua saída. Assim a vazão de gás tende a ficar constante de maneira que seja possível realizar uma melhor comparação com os modelos numéricos. A teoria desenvolvida para as placas pode ser vista em Yamaguchi (2013).

Dois conjuntos de placas foram montados para a injeção no *pipeline* e na base do *riser*. Verificou-se que os diâmetros de entrada e saída são diferentes após a confecção das placas por laser. Também foi verificado que a condição sônica não era atingida com o diâmetro geométrico de maneira que foi necessário a realização de calibrações das placas de orifício. Durante as calibrações foi observado que o diâmetro correspondente com a teoria era menor que o diâmetro geométrico comprovando assim a teoria de que os efeitos de *vena contracta* ocorrem com as placas, além de que as placas resultam em velocidades superficiais menores que o previsto inicialmente.

A coleta de dados experimentais se concentrou para configurações em que o *pipeline* apresenta ângulos maiores ou iguais a +5 graus devido à limitação do medidor de Coriolis para vazões mássicas correspondentes à velocidades superficiais menores que 0,03 m/s. A média de tempo na coleta de dados foi de 420 s e as seguintes variáveis foram coletadas: pressão e temperatura na base do *riser*, pressão e temperatura à montante da placa de orifício na injeção de gás no *pipeline*, vazões e velocidades superficiais de água e ar e a pressão diferencial no *riser*. A frequência de coleta de dados foi de 1 Hz. Os dados foram obtidos quando se considerava que as variáveis apresentavam uma condição estável.

O trabalho de Baliño (2010) leva em consideração um fluxo unidimensional tanto no *pipeline* como no *riser*. O líquido é considerado como sendo incompressível, enquanto o gás é considerado como gás ideal e ambos se encontram em condições isotérmicas. O fluxo no *pipeline* é definido como sendo do padrão estratificado e a inércia não é considerada no *riser* de maneira que vale o modelo de NPW (*no pressure wave*). Este modelo é capaz de lidar com descontinuidades no escoamento como o acúmulo de líquido no *pipeline*, a variação do nível de líquido no *riser* e ondas de fração de vazão. A intermitência severa é controlada pela gravidade no *riser* e pela compressibilidade no *pipeline*.

Baliño (2014) estendeu esse modelo para adicionar efeitos de inércia enquanto Azevedo *et al.* (2015) criou uma rotina para determinar a curva de estabilidade usando a teoria de estabilidade linear sem considerar efeitos de inércia. Ambos os modelos também estudam meios de mitigação como o *choking* e a injeção de gás na base do *riser*. Os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa serão comparados com o resultados desses três trabalhos.

Resultados e discussão

Os resultados serão apresentados através de mapas de estabilidade. A curva de estabilidade é obtida pelo modelo de teoria de estabilidade linear e usada como referência para os pontos experimentais obtidos até então. Deve-se considerar que a limitação nas medições da vazão de água e gás acabam gerando pontos com uma faixa de incertezas maior que o desejado de maneira que os resultados obtidos aqui são considerados como preliminares. Em média foram obtidos 30 pontos experimentais para cada ângulo sendo que poucos apresentam uma condição instável. A instabilidade é identificada pela flutuação de pressão na base do *riser*. Caso existam pontos em que a flutuação de pressão é maior que 2% da média de pressão é considerado que haja instabilidade no sistema. De maneira geral pode-se considerar instabilidade quando é observado uma variação cíclica de pressão durante o tempo. Na Figura 3 pode ser visto o escoamento no *riser* para diferentes etapas de um ciclo instável.

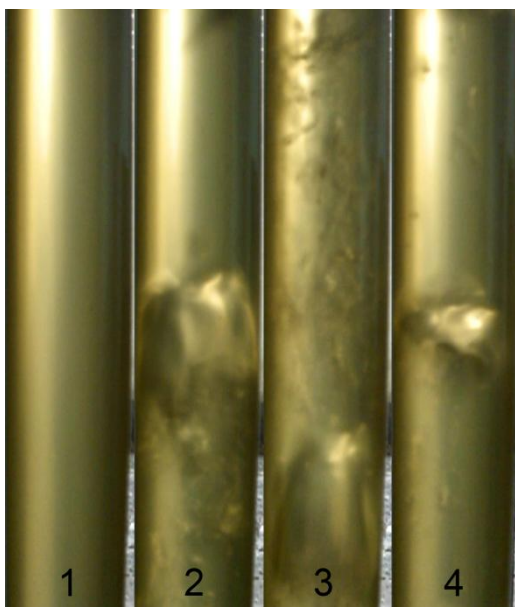


Figura 3: Fotos do *riser* em diferentes instantes de tempo para um caso instável cíclico de 50 s.

A Figura acima mostra diferentes instantes de um ciclo instável em um trecho do *riser*. O estado 1 indica o momento em que está ocorrendo acúmulo de líquido no *riser* impedindo a passagem de gás representando a etapa de produção de *slug*. Nos estados 2 e 3 é possível observar alguns instantes em que há a penetração de gás no *riser*. No estado 4 é possível ver que a vazão de gás já é muito menor indicando a etapa de formação de *slug*.

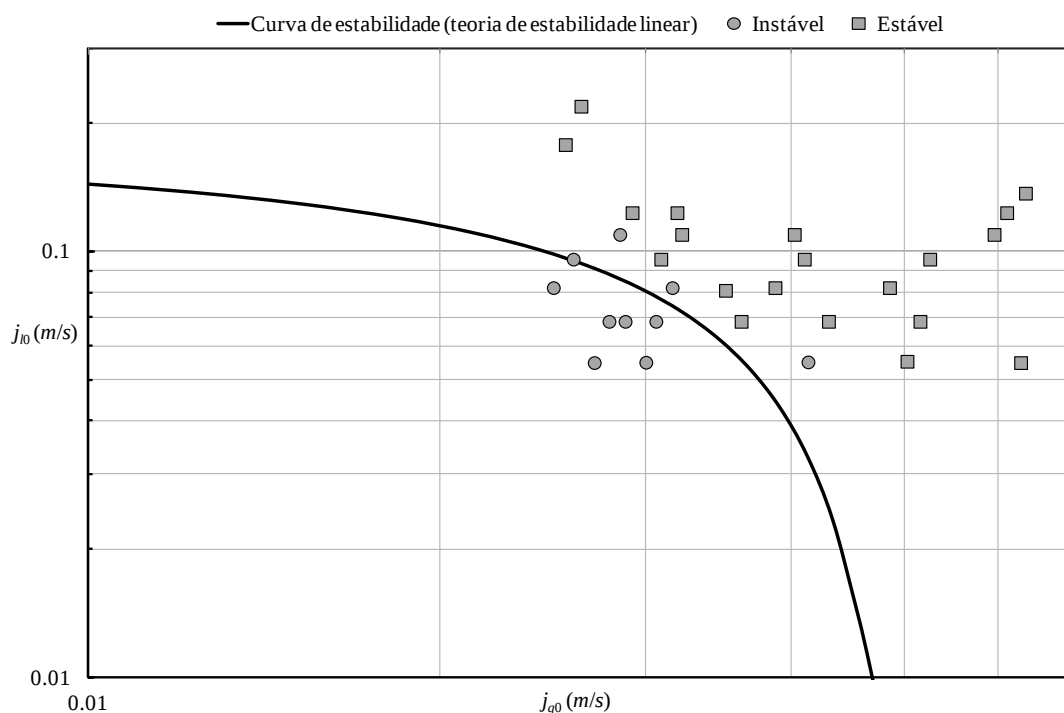


Figura 4. Mapa de estabilidade para o *pipeline* com inclinação de +5 graus.

O mapa de estabilidade observado na Figura 4 mostra uma boa compatibilidade com a curva de estabilidade obtida pelo modelo de teoria de estabilidade linear, embora alguns pontos se encontrem fora da região instável. O mesmo comportamento foi visto nos mapas de estabilidade para os ângulos de +6, +7, +8, +9 e +10 graus.

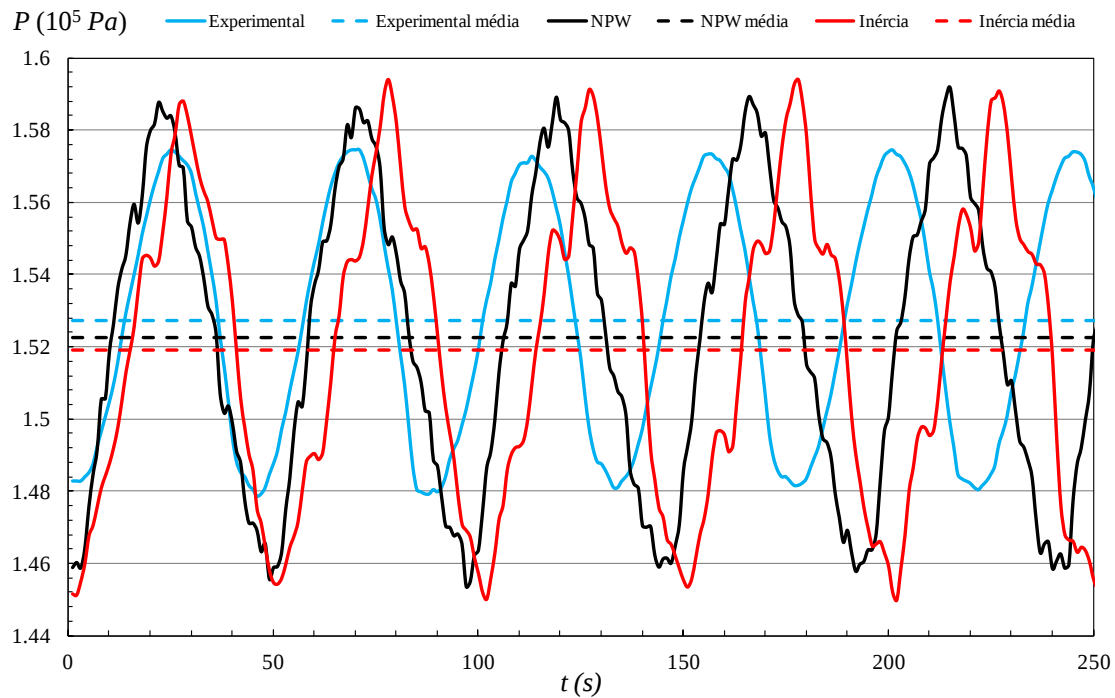


Figura 5. Comparação do histórico de pressão na base do *riser* para um caso com *pipeline* de inclinação de 10 graus.

Os históricos de pressão na base do *riser* obtidos experimentalmente também foram comparados com os históricos de pressão dos modelos numéricos apresentados neste trabalho. A Figura 5 mostra os gráficos de pressão para o caso em que j_g é de 0,034 m/s e j_l é de 0,055 m/s para o *pipeline* com inclinação de 10 graus. O resultado experimental é apresentado pela linha azul, enquanto a cor preta representa o modelo de NPW de Baliño *et al.* (2010) e a cor vermelha indica o modelo de inércia de Baliño (2014). Observa-se que o valor médio de pressão é muito próximo para os três casos ficando em torno de 152 kPa. Esse valor médio foi obtido calculando a média de pressão para cinco ciclos completos. A amplitude das simulações numéricas (0,14 kPa) apresenta valores maiores que o caso experimental (0,115 kPa), mas considerando as incertezas de ordem de 2,5% dos valores medidos ($\sim 0,04$ kPa) pode-se considerar que também há uma boa concordância entre os resultados. Também verifica-se que os períodos dos casos numéricos são 10% maiores que o experimental.

Com esses resultados também é possível explicar uma das razões pela qual a intermitência severa ou situações intermitentes acabam causando perda na produção. Deve-se considerar que a vazão na produção de petróleo é causada pela diferença de pressão entre o reservatório e a cabeça no poço. No caso estacionário a pressão obtida na base do *riser* foi de 153 kPa para as mesmas vazões usadas no caso intermitente usando o modelo de inércia. Então esse valor é comparado ao valor aproximado de 152 kPa do caso de intermitência severa. Observa-se que para uma menor diferença de pressão no caso estacionário há uma produção igual ao caso em que é necessário uma maior diferença de pressão para um caso intermitente. Essa diferença é pequena para o caso estudado devido ao fato da altura do *riser* do laboratório ser de apenas 7 metros, mas em situação reais essa diferença apresentaria valores muito mais relevantes para a produção.

Conclusões

O trabalho realizado conseguiu integrar diferentes linhas de pesquisa em escoamentos multifásicos, relacionadas com aspectos experimentais, de simulação no campo temporal e de aplicação de estabilidade linear. Os primeiros mapas de estabilidade obtidos apresentam bons resultados. A comparação dos históricos de pressão apresentou uma boa aderência com os dois

modelos numéricos usados como referência. A obtenção de medidas experimentais com uma menor incerteza que validem os resultados obtidos até então estão previstas com a chegada de novos medidores de vazão. A criação de mapas de estabilidade mais completos para outras configurações geométricas serão consideradas, assim como a realização de medições com variação na pressão do separador e o uso de uma injeção de gás na base do riser como meios de mitigação da intermitência severa também serão considerados como etapas futuras do estudo.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o suporte da Petróleo Brasileiro S. A. (Petrobras). Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A participação dos professores Alberto Hernandez Neto e Flávio Augusto Sanzono Fiorelli foi de vital importância durante o projeto e construção do laboratório multifásico. O apoio técnico do Sr. Douglas Silva também foi importante para as mudanças realizadas na estrutura do laboratório.

Referências bibliográficas

Azevedo, G.R., Burr, K.P., Baliño, J.L. 2015, Linear stability analysis for severe slugging in air-water systems considering different mitigation mechanisms, aceito em *International Journal of Multiphase Flow*, 5.

Baliño, J.L., Burr, K.P., Nemoto, R.H., 2010, Modeling and simulation of severe slugging in air-water pipeline-riser systems, *International Journal of Multiphase Flow*, 36:643-660.

Baliño, J.L., 2014, Modeling and simulation of severe slugging in air-water systems including inertial effects, *Journal of Computational Science*, 5(3): 482-495.

Jansen, F.E., Shohan, O., Taitel, Y., 1996, The elimination of severe slugging - experiments and modeling, *International Journal of Multiphase Flow*, 22(6): 1055-1072.

Nemoto, R.H., Baliño, J.L., 2012, Modeling and simulation of severe slugging with mass transfer effects, *International Journal of Multiphase Flow*, 40:144-157.

Schmidt, Z., Brill, J., Beggs, H., 1979, Experimental study of severe slugging in a two phase flow pipeline-riser system, *SPE, Paper 8306*, 20(5):407-414.

Taitel, Y., 1986, Stability of severe slugging, *International Journal of Multiphase Flow*, 12(2):203-217.

Vierkandt, S., 1988, Severe slugging in pipeline-riser system, experiments and modeling, *Tese de Mestrado*, Universidade de Tulsa, Tulsa, USA.

Wordsworth, C., Das, I., Loh, W.L., McNulty, G., Lima, P.C., Barbuto, F., 1988, Multiphase Flow Behavior in a Catenary Shaped Riser, *CALTEC Report No.: CR 6820*, Bedford, UK.

Yamaguchi, A.J., 2013, Montagem do laboratório multipropósito de escoamentos multifásicos e projetos de experimentos de intermitência severa, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.