

Desenvolvimento de uma Unidade Experimental: Micro-Poço de Petróleo com elevação por Injeção Contínua de Gás

Roberto Oenning¹, Agostinho Plucenio²

^{1,2}{roberto, plucenio} @das.ufsc.br

Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina,
88040-900 Florianópolis - SC

Resumo – A descrição dos fenômenos que se manifestam no escoamento multifásico durante a operação de um poço operando por elevação do tipo injeção contínua de gás é complexa e seu tratamento matemático, sem a visualização da dinâmica dos padrões de escoamento, torna difícil o entendimento do tema. Este trabalho descreve a construção de uma planta piloto construída em escala de laboratório com o objetivo de obter, em uma escala temporal e espacial reduzida, os fenômenos de transporte de fluídos que ocorrem em um poço operando por injeção contínua de gás. Descrevem-se, além dos aspectos construtivos da unidade, as técnicas de aquisição de dados empregadas e o resultado de alguns ensaios realizados sobre a mesma. Espera-se que a planta permita melhorar o entendimento dos fenômenos e possibilite o estudo de técnicas de controle para este sistema de elevação artificial.

Palavras-Chave: Elevação por Injeção Contínua de Gás; Planta piloto; Instrumentação e Controle

Abstract – The description of the multiphase flow phenomena occurring in a well operating via gas-lift is complex and its mathematical treatment, without the visualization of the flow patterns is a hard task. This work describes the construction of a pilot plant built in laboratory scale with the objective of reproducing the multiphase flow behaviors encountered in gas lifted wells. Apart from describing some details about the construction and data acquisition, the result of some tests applied on the plant is also shown. It is expected that the plant will provide a better understanding of the gas lift multiphase-flow phenomena and the possibility of testing new control techniques for this important artificial lift method.

Keywords: Gas-lift, Pilot Plant, Instrumentation and Control

1. Introdução

Um dos métodos de elevação artificial mais utilizado na indústria do petróleo é a elevação por injeção contínua de gás. No Brasil, cerca de 60% da produção de petróleo de poços submarinos utiliza este método de elevação. Em águas profundas a elevação por injeção contínua de gás pode contribuir em sistemas de elevação combinando-se este método com outros, como o bombeamento centrífugo submerso, por exemplo.

A elevação artificial por injeção contínua de gás caracteriza-se pela injeção de gás em algum ponto profundo da coluna de produção de forma a diminuir a densidade média do fluido resultante da mistura reduzindo assim a pressão exercida na frente dos canhoneados. O controle dos poços operando com este método de elevação utiliza uma válvula de injeção de gás e um *choke* de produção na superfície além de válvulas de *gas-lift* distribuídas na coluna de produção normalmente do tipo insertáveis instaladas em tubos especiais chamados mandris de *gas-lift*. Estas válvulas são projetadas para permitir a partida do poço com um aumento progressivo da pressão de injeção. Com exceção da válvula mais profunda, as demais válvulas abrem-se e se fecham em uma sequência de cima para baixo de forma que o espaço do tubo de produção acima delas é gaseificado sequencialmente até que a válvula mais profunda seja a única a permitir a entrada de gás. Esta válvula é chamada de válvula operadora. As válvulas de *gas-lift* são normalmente mecânicas e podem ser pescadas por operações de *slick-line* para manutenção. Estas operações podem ser motivadas pela ocorrência de falhas mecânicas da válvula ou por necessidade de ajuste da mesma devido a variações nas condições de operação. As operações de *slick-line* são realizadas com a descida de ferramentas apropriadas para a pesca das válvulas na extremidade de um arame operado por uma unidade guincho especial (unidade de *slick-line*). Estas operações podem ser muito custosas, pois normalmente requerem uma intervenção no poço. Além disso, estas intervenções apresentam riscos para a instalação do poço devido a possibilidade de quebra do arame utilizado na operação.

O controle de um poço operando por injeção contínua de gás através da manipulação de instrumentos de superfície e sem elementos móveis instalados em seu interior é um desafio. Tanto o procedimento de partida ou descarga do poço deve ser estudado como também a operação do poço depois da partida. Alguns trabalhos sobre este tema tem sido publicados nos últimos anos envolvendo diversas estratégias de controle [1],[2],[3],[4],[5]. Sempre que se discutem estas estratégias existe o questionamento da validade dos resultados apresentados devido a utilização de simuladores multifásicos no lugar do poço propriamente. A possibilidade de se testar técnicas de controle em um protótipo que repete o comportamento de um poço típico operando por injeção contínua de gás deve contribuir para o desenvolvimento de melhores estratégias de controle.

A montagem de um protótipo pequeno que apresente os fenômenos de transporte de fluidos presentes em um poço operando por injeção contínua de gás é um enorme desafio. Este trabalho descreve a construção de uma planta piloto construída em escala de laboratório com o objetivo de obter, em uma escala temporal e espacial reduzida, os fenômenos de transporte de fluidos que ocorrem em um poço operando por injeção contínua de gás. O estado atual do protótipo ainda não contempla todos os fenômenos presentes no poço real. Espera-se que através do contínuo aperfeiçoamento do sistema, este possa migrar para um estágio em que represente plenamente a elevação por injeção contínua de gás. Este protótipo seria um importante instrumento para a pesquisa e ensino na área de elevação artificial.

2. Projeto e Construção de um Micro-Poço Experimental

Um poço de petróleo operando por injeção contínua de gás apresenta diversos fenômenos de transporte de fluidos de difícil modelagem matemática. De modo a reproduzir este comportamento, foi projetado e construído um micro-poço experimental que opera sob injeção contínua de gás (ICG). Inicialmente foram construídos alguns protótipos e o melhoramento gradativo destes resultou na versão atual do micro-poço, esquematizado na figura 1.

2.1. Montagem Física

Para simular a formação, foi utilizada uma caixa plástica preenchida com areia, dentro da qual foi inserido um tubo de PVC com alguns furos cobertos com um filtro, representando o revestimento canhoneado. Esta caixa também possui furos nas suas laterais e fica disposta dentro de uma caixa de aço maior. O espaço entre as duas caixas é preenchido com água, a uma pressão estática de aproximadamente 18 KPa. Esta é a pressão exercida por uma coluna de água presente entre o separador, no topo do poço, e o reservatório.

Do reservatório sai um tubo, o tubo de produção, que se estende até o separador. O separador é uma caixa plástica medindo 22 cm x 18 cm x 32 cm que fica no topo do micro-poço, onde o fluido elevado do reservatório é depositado. No topo do separador há uma abertura por onde o ar escapa para a atmosfera. Em um poço real este gás seria recomprimido, tratado e reinjetado no poço, mas neste caso o ar é descartado. Do fundo do separador sai um tubo que se estende até o reservatório, permitindo, assim, a operação do micro-poço em um regime contínuo. A coluna de água constantemente presente neste tubo é responsável por gerar a pressão do reservatório. A figura 2 mostra um esquema do reservatório e do separador.

O ar é suprido por um compressor capaz de trabalhar a uma pressão de até 140 psi. Na entrada da planta o ar passa por um regulador de pressão ajustado para fornecer uma pressão mais baixa, objetivando rejeitar as variações na pressão do ar proveniente do compressor de modo a manter constante a pressão de entrada do ar utilizado para injeção.

Deste modo, como a variação da temperatura pode ser considerada desprezível, consegue-se garantir que a vazão volumétrica medida por uma placa de orifício seja razoavelmente proporcional à vazão mássica de ar injetado.

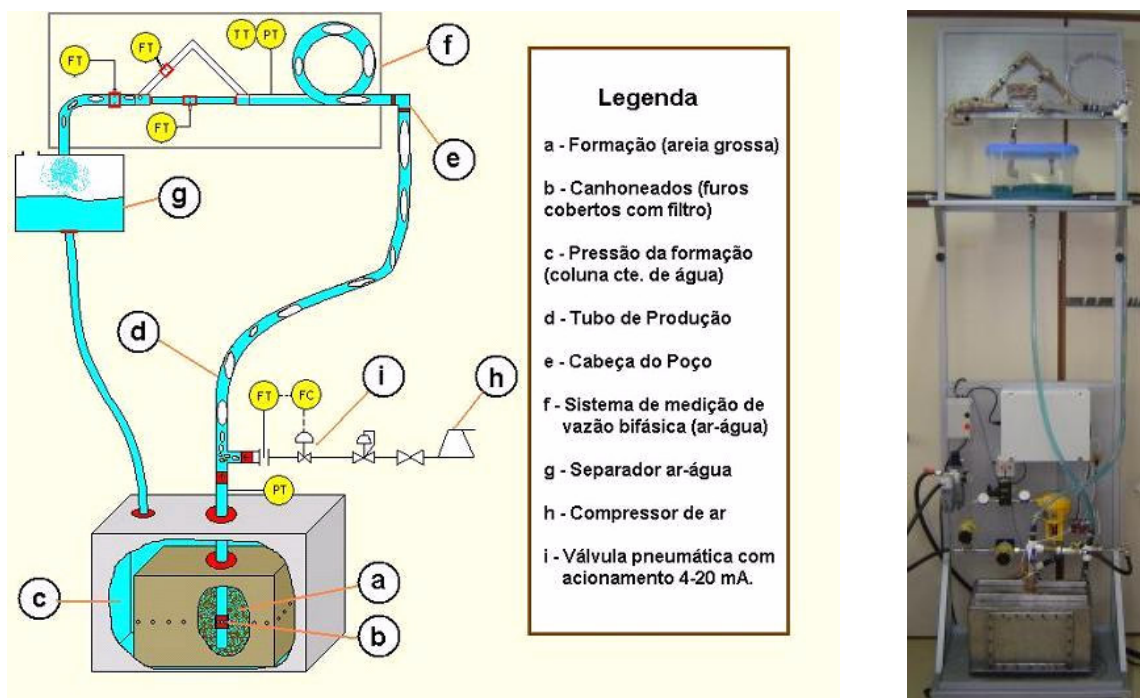


Figura 1: Esquema e Imagem do Micro-Poço

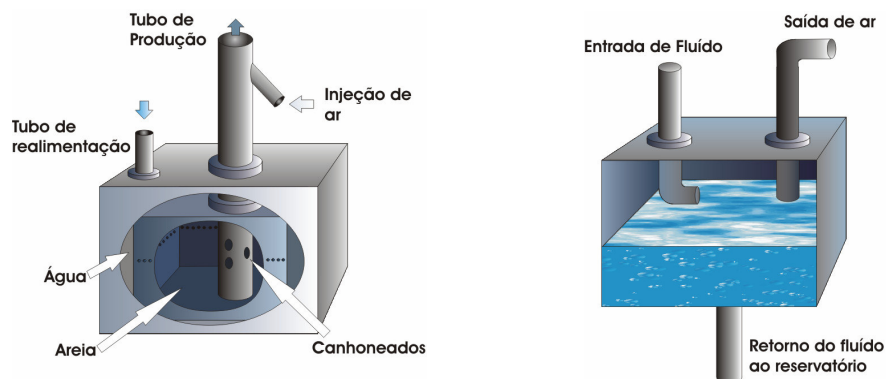


Figura 2: Reservatório e Separador

Na entrada do tubo de injeção há uma válvula de retenção, com a função de evitar que o fluido sendo elevado entre no tubo de injeção.

2.2. Instrumentação

Foi implementado um sistema que permite a leitura da vazão de injeção de ar e da pressão do reservatório e atuação na vazão de ar injetado. Como os medidores de vazão multifásica são muito caros, foi desenvolvido um sistema de medição próprio que pudesse fornecer a vazão de gás e de água (escoamento bifásico). Na construção do sistema de medição de vazão bifásica foram utilizados sensores de pressão com um *range* de medição de 0 a 10KPa. O funcionamento do sistema é bastante simples: O fluido proveniente do tubo de produção, neste caso uma mistura de água e ar, é forçado a passar por um *loop* de modo a ser centrifugado, separando parcialmente a água do ar. Logo após esta etapa o escoamento encontra uma bifurcação, onde se espera que a fração dominada pela água passe pelo caminho inferior enquanto que a fração dominada pelo ar passe pelo caminho superior. Logo depois estes dois caminhos juntam-se novamente e a mistura segue para o separador. Para se inferir a vazão bifásica, diversas medições são efetuadas. Mede-se a temperatura e pressão na entrada do dispositivo, o sinal fornecido por uma placa de orifício em cada um dos ramos da bifurcação, e o sinal fornecido por uma placa de orifício na saída do dispositivo. Com estas medidas, e a utilização de uma calibração inicial propõe-se determinar a vazão do gás (ar) e do líquido (água) que chega ao separador. Este sistema ainda está em fase de desenvolvimento, mas acredita-se que o mesmo possa gerar resultados satisfatórios. A figura 3 ilustra esse sistema de medição. Para medir a pressão do reservatório é utilizado outro sensor de pressão que possui uma faixa de medição de 0 a 100KPa. Este mesmo sensor é utilizado para se inferir a vazão de injeção de ar. Para a medida da vazão de injeção também é utilizado o princípio da placa de orifício. Nesta técnica, uma placa de orifício é instalada no tubo de injeção, onde é medida a diferença de pressão (ΔP) sobre pontos de medição

localizados antes e depois do orifício. A vazão volumétrica de ar é dada pela equação (1), onde C é uma constante determinada na etapa de calibração e P_f é a pressão absoluta na entrada da placa de orifício. Se P_f for constante (o que conseguimos garantir, devido à presença do regulador de pressão, conforme já foi explicado anteriormente), podemos reescrever a equação (1) da forma da equação (2), onde $C' = C\sqrt{P_f}$, necessitando apenas da medida da pressão diferencial gerada pelo orifício para se determinar a vazão de ar.

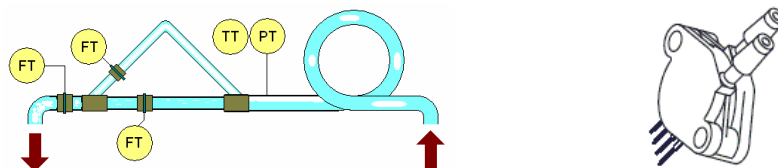


Figura 3: Sistema de Medição Multifásico sendo testado e Ilustração do Encapsulamento dos Sensores de Pressão utilizados

$$Q_V = C\sqrt{\Delta p \cdot P_f} \quad (1)$$

$$Q_V = C'\sqrt{\Delta p} \quad (2)$$

Como o tipo de sensor utilizado mede apenas pressões diferenciais, no caso da medição da pressão absoluta do reservatório o ponto de tomada de baixa pressão do sensor fica aberto à atmosfera.

Todos os sensores utilizados na leitura são sensores da *MOTOROLA* (MPX2010DP e MPX2100DP) que medem a pressão diferencial. Foram escolhidos sensores deste tipo devido ao seu menor custo e às suas características bastante lineares. O sinal de saída dos sensores utilizados é um sinal de 0 a 40mV para o modelo MPX2100DP e de 0 a 25mV para o MPX2010DP.

O Sinal gerado pelos sensores é um sinal muito baixo para poder ser utilizado diretamente pelo sistema de aquisição, portanto foi necessário amplificá-lo. O circuito de amplificação utilizado foi um circuito bastante simples, composto por um filtro RC e por um amplificador de instrumentação, o INA118P. O Esquema do circuito e uma das placas montadas é mostrado na figura 5.



Figura 4: Esquema do Circuito de Amplificação, Placa com o Circuito Implementado e placa Mônica

A placa de aquisição de dados (Mônica) utilizada foi desenvolvida no Laboratório de Controle de Processos (LCP) da UFSC. Esta placa se comunica com o PC através da porta paralela e é utilizada juntamente com um *toolbox* exclusivo para o software MATLAB, propiciando uma integração entre ambos. A placa *Mônica* é capaz de ler e enviar sinais de tensão entre 0 e 5 Volts e pode ser observada na figura 4.

O sistema de atuação utilizado é composto por uma válvula pneumática comandada por um sinal de 3-15 psi, por um conversor 4-20mA / 3-15 psi e por um “driver” gerador de corrente, já que a placa *Mônica* não é capaz de fornecer um sinal corrente de 0-20mA. O driver construído converte o sinal de 0-5V fornecido pela placa Mônica em uma corrente de 4-20 mA. A alimentação para todos os dispositivos eletrônicos presentes no micro-poço foi suprida por uma fonte de PC de 300W. Os circuitos dos amplificadores ficam dispostos o mais próximo possível dos sensores, para minimizar a interferência provocada pelos ruídos, e os demais componentes eletrônicos, bem como a fonte de alimentação, ficam alojados dentro de uma caixa especial, localizada no centro da estrutura do micro-poço.

2.3. Realização de Testes e Experimentos

Após o término da construção do micro-poço experimental, partiu-se para a etapa de calibração dos instrumentos e realização de testes e experimentos. Inicialmente foi calibrado o sensor de vazão de ar no tubo de injeção. Adotou-se um procedimento simples que garantiu uma exatidão aceitável para os primeiros ensaios. Para uma vazão igual a zero a leitura do sensor diferencial de pressão é zero, e para a vazão máxima o ganho de amplificação foi ajustado de modo a fornecer uma saída igual a 4.0 Volts CC. Sabe-se que a raiz quadrada da diferença de pressão obtida na placa de orifício é diretamente proporcional à vazão de ar passando pela mesma, portanto, a raiz do sinal obtido multiplicada por um ganho é igual à vazão de ar. Para calcular o valor deste ganho utilizou-se o valor nominal da vazão máxima de ar fornecido pelo compressor. Para a válvula totalmente aberta a vazão de ar é máxima (153 l/min), e o sinal gerado pela

queda de pressão na placa de orifício é de 4,0 Volts CC. Desta forma, o ganho é calculado dividindo-se o valor da vazão máxima pela raiz quadrada do sinal gerado. Para calibrar o sensor de pressão de fundo, o procedimento é ainda mais simples. Como o sensor da pressão de fundo está medindo a pressão absoluta, o sinal gerado pelo mesmo é diretamente proporcional à pressão medida. Este sensor foi ajustado de modo a fornecer uma saída de 2 Volts na medição da pressão estática do reservatório. Como esta pressão é igual à pressão formada por uma coluna de água de altura aproximadamente igual a 1,80m (18KPa), para transformar o sinal gerado de Volts para KPa basta multiplicá-lo por um ganho de valor igual a 9. É importante salientar que estes procedimentos de calibragem foram executados assumindo a linearidade dos sinais dos sensores de pressão, descrita nos manuais dos fabricantes.

Foi desenvolvido um controlador PI para o controle da vazão de injeção de gás. Para isto levantou-se o modelo dinâmico da válvula e desenvolveu-se um algoritmo para compensar a presença de uma zona morta encontrada. O controlador PI obtido tem o ganho igual (ou ligeiramente menor) ao inverso do ganho da válvula em malha aberta e o tempo de integração igual à constante de tempo da planta em malha aberta. Assim, $K_c=1/60$ e $T_i=0,2$ s. A figura 6 mostra o resultado do controle da vazão de injeção utilizando o controlador projetado.

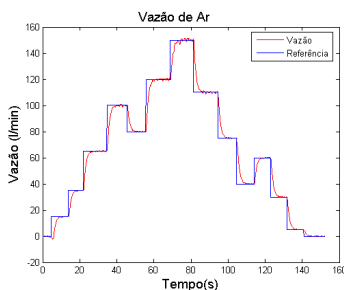


Figura 5: Vazão de ar no tubo de Injeção para o Sistema em Malha Fechada

A figura 6-a mostra o comportamento da pressão de fundo para uma injeção de ar de 55 l/min. A figura 6-b mostra o comportamento da pressão próximo ao fundo de um poço simulado no OLGA2000 quando submetido a uma vazão de injeção com pequenas oscilações ao redor de 2.8 Kg/s. Este resultado foi obtido em estudos de identificação realizados sobre um poço com dimensões reais operando por injeção contínua de gás modelado no simulador OLGA2000 [6].

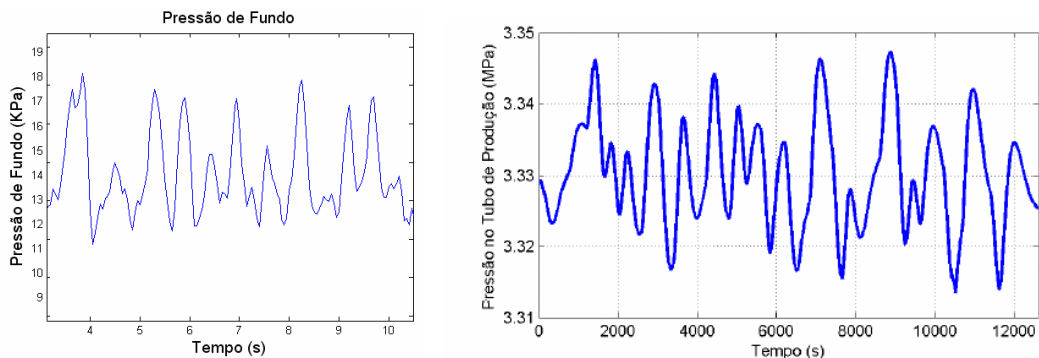


Figura 6: a-Pressão de Fundo para $Q_i=55$ l/min, b-Pressão de Fundo em Poço simulado no OLGA2000

Observando-se os resultados experimentais obtidos para a pressão de fundo do micro-poço é possível observar que, levando em conta as proporções e o fato de que a excitação não é a mesma, o comportamento dinâmico da pressão de fundo apresenta alguma semelhança aos resultados obtidos com o simulador OLGA2000. Isto reforça a idéia de utilizar nos experimentos as mesmas técnicas de modelagem e controle utilizadas na parte de simulação, de modo a produzir resultados igualmente satisfatórios. A figura 7 mostra a ocorrência de alguns fenômenos típicos de um escoamento por injeção contínua de gás. Da direita para a esquerda verifica-se uma mudança de escoamentos tipo bolha para um escoamento tipo golfada, passando por etapas intermediárias de escoamento tipo plugue e misturada.

Atualmente este trabalho encontra-se no estágio da modelagem de seu comportamento dinâmico para então se partir para a implementação do controle da elevação de fluido. Ao mesmo tempo estudam-se algumas alterações dimensionais para permitir uma melhor representação do processo real.

3. Conclusões

A unidade experimental em desenvolvimento encontra-se em um estágio onde repete alguns fenômenos típicos encontrados em um poço operando via elevação por injeção contínua de gás. Espera-se atingir um estágio onde

esta representação seja suficiente para que a mesma torne-se um instrumento importante para o ensino e pesquisa deste importante método de elevação artificial.



Figura 7 - Regimes de escoamento no tubo de produção do Micro-Poço Experimental

4. Agradecimentos

Os autores R. Oening e A. Plucenio, respectivamente bolsista de graduação e PV do programa PRH-34, agradecem à ANP pelo apoio fornecido na forma do programa de recursos humanos PRH-ANP/MCT, à equipe do PRH-34 pelo favorável ambiente de trabalho e à empresa Scandpower pelo fornecimento da licença do simulador OLGA2000.

5. Referências

- [1] EIKREM, G. O., FOSS B., IMSLAND, L., "Stabilization of gas lifted wells based on state estimation," IFAC ADCHEM2003, Hong Kong, 2004.
- [2] EIKREM, G. O., FOSS, B., IMSLAND, L., HU, B., GOLAN, M., "Stabilization of gas lifted wells," Proceedings of the IFAC 15th World Congress, Barcelona, 2002.
- [3] IMSLAND, L., EIKREM, G. O., AND FOSS, B., "State feedback control of a class of positive systems: Application to gas lift control," ECC'03, Cambridge, 2003.
- [4] PLUCENIO, A., PAGANO, D.J., NORMEY-RICO, J., "Automação de um grupo de poços operando por injeção contínua de gás", 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gas, Rio de Janeiro, 2002.
- [5] PLUCENIO, A., PAGANO, D.J., NORMEY-RICO, J., "Controle robusto aplicado a produção de petróleo por elevação artificial tipo gas-lift", Congresso Brasileiro de Automática CBA, Gramado-RS, 2004.
- [6] DALLAGNOL, V.A., "Identificação de Sistemas Não-Lineares com modelos NARMAX aplicada a um poço de petróleo operando por injeção contínua de gás", Dissertação Mestrado DAS-UFSC 2005.