



## Implantação de sistema de monitoramento e diagnóstico em tempo real durante a perfuração de poços de petróleo

### Implantation of monitoring and real-time diagnosis system during petroleum well drilling

Márcia Peixoto Vega Domiciano<sup>1</sup>

Lindoval Fernandes<sup>2</sup>

Nathalia Araujo<sup>3</sup>

Rafael Patricio<sup>4</sup>

Frederico Costa<sup>5</sup>

Andre Martins<sup>6</sup>

**Resumo:** Uma unidade experimental foi construída de forma a retratar as características mais relevantes do processo de perfuração. A natureza transiente da pressão anular de fundo, devido aos fenômenos inerentes de modificações na densidade e viscosidade, que afetam a pressão hidrostática e as perdas por atrito e o crescimento do comprimento do poço, pode ser implementada experimentalmente empregando-se tanques de alimentação contendo fluidos distintos (água e lama). O procedimento de conexão de tubos pode ser realizado experimentalmente ligando-se e desligando-se a bomba de lama. Além disso, o *kick* e a perda de circulação (perda de lama) também podem ser detectados por meio de um aumento ou diminuição dos níveis de fluxo no anular, respectivamente, empregando-se um medidor de vazão. O principal objetivo deste trabalho é empregar a planta experimental para programar o monitoramento inteligente e diagnóstico/tomada de decisão em tempo real, a fim de assegurar a perfuração dentro da janela operacional, através de medições em linha.

**Palavras-chave:** Poços de petróleo; kick, invasão, controle.

<sup>1</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>2</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>3</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>4</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>5</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>6</sup>UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

**Abstract:** An experimental unit was built, presenting the most important characteristics of the drilling process. The transient nature of annulus bottom hole pressure, due to the inherent phenomena of the modifications on density and viscosity, affecting the hydrostatic pressure and frictional losses and the growth of the length of the well, can be implemented using the feeding tanks, containing distinct fluids (water and mud). The pipe connection procedure can be implemented experimentally through executing the stopping and the start of the pump. Also, the kick or the lost circulation problem (mud loss) can also be implemented experimentally, being detected through an increase or decrease of the annulus flow levels, respectively. The major objective of this paper is using the experimental plant for implementing smart monitoring and real time diagnosing/decision making, in order to assure drilling inside operational window, using in line measurements.

**Keywords:** Oil wells, kick, invasion, control.

---

## 1. Introdução

A perfuração de poços de petróleo se dá através de sondas de perfuração. Na perfuração rotativa as rochas são perfuradas pela ação da rotação e pesos aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração, a qual consiste basicamente de comandos (tubos de paredes espessas) e tubos de perfuração (tubos de paredes finas). O controle da pressão no fundo do poço (pressão anular de fundo) balanceada com a pressão dos poros é uma tarefa de suma importância durante o processo de perfuração. Se a pressão no fundo do poço for maior que a pressão nos poros do reservatório (perfuração overbalanced) o fluido de perfuração tenderá a invadir o reservatório. Entretanto, se a pressão nos poros do reservatório for maior que a pressão no fundo do poço (perfuração underbalanced) os fluidos da formação rochosa tenderão a invadir o poço (Waldmann et.al., 2006). A diferença entre as pressões nos poros do reservatório e no poço em perfurações overbalanced representa a primeira barreira para evitar influxos controláveis (kick) e incontroláveis (blowout).

A relevância do trabalho apresentado é a construção de uma unidade experimental, que apresenta as características mais importantes do processo de perfuração, e também, a utilização da unidade experimental para validar o monitoramento inteligente e o diagnóstico/tomada de decisão em tempo real. Cenários contemplando a perfuração dentro de janela operacional são implementados, experimentalmente, para a análise do desempenho da metodologia desenvolvida.

## 2. Revisão de literatura

Durante a perfuração podem ocorrer alguns distúrbios que causam flutuações na pressão de fundo do poço. Um dos distúrbios é o aumento da pressão com o aumento do comprimento do poço, devido ao aumento do peso de fluido de perfuração e o processo de conexão de tubos, que é um procedimento periódico realizado durante a perfuração. Nesse procedimento, a perfuração e o bombeamento de fluido são interrompidos e, em seguida, um novo segmento de tubo é conectado. Em seguida, se reinicia a perfuração e o bombeamento. Segundo Nygaard et. al., (2013) nesse procedimento a principal causa de flutuação na pressão de fundo é a mudança da vazão do fluido de perfuração.

Uma das estratégias que podem ser adotadas a fim de controlar a pressão do poço é através do ajuste contínuo da densidade, através do aumento ou diminuição da velocidade de perfuração (ROP). No caso em que a variável manipulada é a densidade, o aumento na velocidade de perfuração proporciona o aumento da produção de cascalhos, esse aumento da quantidade de sólidos suspensos no fluido ocasiona o aumento da densidade do fluido de

perfuração em relação à densidade do mesmo a rotações inferiores. No caso da diminuição da velocidade de perfuração a quantidade de sólidos (cascalhos) em suspensão diminui, ocasionando um decréscimo na densidade do fluido em relação à densidade do fluido a rotações maiores. Essa mudança de densidade altera a pressão hidrostática que a coluna de fluido exerce no fundo do poço. Outra forma de se alterar a pressão no poço é mudar o índice de abertura da válvula choke, situada na superfície da linha do choke, por onde escoo o fluido vindo da região anular do poço. Este elemento final de controle produz uma rápida resposta na variável controlada (pressão) (Vega et al. 2008). Outra variável de resposta rápida é a vazão da bomba de lama que atua alterando a pressão pelo aumento das perdas por atrito. Além disso, o aumento da vazão de fluido de perfuração pode acarretar na ressuspensão de sólidos e na consequente incorporação desses sólidos ao fluido, ocasionando a redução da pressão no fundo do poço (Aragão et. al, 2006).

Os problemas de instabilidade de um poço de petróleo geralmente estão ligados ao desconhecimento das tensões in situ e da pressão de poros; e do uso de massa específica de fluido de perfuração inadequada. Segundo Zhang et al. (2004), a pressão do fluido depende de sua massa específica e esta é a principal propriedade responsável pela estabilidade do poço. As pressões que levam a parede do poço à ruptura são pressão de colapso e pressão de fratura (Waldmann,et. al, 2006).

Manter a pressão anular de fundo dentro dos limites da janela operacional, compreendida entre a pressão de fratura (limite superior) e a pressão de poros (limite inferior), é de fundamental importância nos processos de perfuração de poços de petróleo devido aos altos custos e riscos que as flutuações da pressão de fundo podem causar ao processo. São vários os fatores que podem causar impacto na pressão de fundo do poço durante o processo de perfuração, como, a remoção insuficiente de sólidos pelo fluido de perfuração, desmoronamento do poço, influxos do reservatório para o poço, processo de conexão de tubos, etc (Rezende et. al., 2009; Thomas (2001)). Neste cenário, para controle da pressão anular de fundo podem ser empregadas à abertura da válvula de *choke*, a velocidade de perfuração, apesar desta variável ser imprópria quando do procedimento de conexão de tubos, a densidade da lama de perfuração e a vazão da bomba de lama, adotando-se o sistema mecânico reportado por Jenner et al. (2004), capaz de manter o bombeamento de fluido de perfuração mesmo durante o procedimento de conexão de tubos. Vale ressaltar que Jenner et al., (2004) desenvolveram uma técnica denominada CCS (continuous circulating system), com base em um dispositivo mecânico capaz de bombear continuamente os fluidos de perfuração, mesmo durante o procedimento de conexão de tubos.

Há um crescente interesse e entusiasmo da indústria do petróleo em construir sistemas para perfuração inteligente, ou seja, que em tempo real, análise e interprete grandes quantidades de dados para otimização do processo. Nos últimos anos, sistemas inteligentes híbridos que

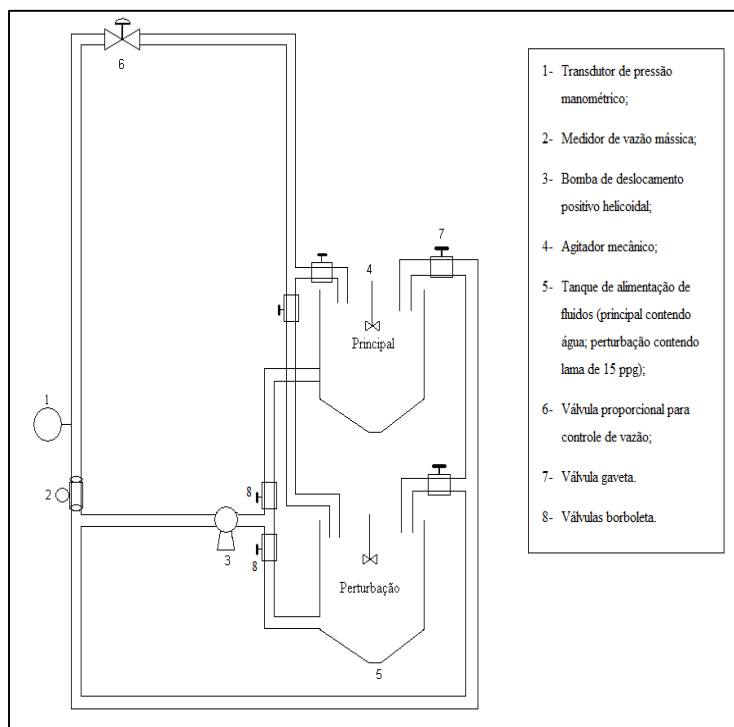
integram diferentes técnicas e ramos do conhecimento se tornaram objetos de investigação (Sheremetov et al., 2008). Para o processamento do conhecimento especializado de uma maneira confiável, um sistema especialista deve ser capaz de representar e manipular a percepção baseada em avaliações de incertezas de fatos e regras, para tirar conclusões com valores desconhecidos das variáveis. Por outro lado, a necessidade de integrar esses sistemas em ambientes de computação, introduz novos níveis de complexidade.

A ferramenta de monitoramento denominada PWD fornece valores ECD (Equivalent circulating density) enquanto a bomba está ligada, e dados de ESD (Equivalent static density) quando há interrupção da circulação do fluido. O principal problema de controle de pressão, durante a perfuração, é que não há uma medida de pressão disponível, durante a perturbação periódica, denominada procedimento de conexão de tubos, quando a circulação da lama é interrompida. Wind et al., (2005) empregaram um sistema de transmissão electro-magnética, que entretanto, pode apresentar problemas devido à atenuação do sinal em poços profundos. Os dados de monitoramento, a partir das ferramentas denominadas PWD e Mud-logging são formas muito eficientes para implementar o monitoramento e controle de processos, também, antecipando problemas de perfuração (limpeza, estabilidade do poço, gelificação, kick, hidratos, etc). Medições em tempo real, o desenvolvimento da tecnologia de sensores robustos, modelagem matemática, otimização e controle são ferramentas que essenciais para regular o processo de perfuração, sendo associadas com robustez e segurança das operações de perfuração, viabilizando o diagnóstico de situações espúrias e de atuação para efeitos de rejeição de perturbação. Assim, o controle e a automação das operações de perfuração são atividades necessárias para os futuros desafios da engenharia de petróleo, primordialmente, sob um cenário de janelas operacionais estreitas. Uma análise dos trabalhos da literatura revela que a maioria dos trabalhos emprega monitoramento inteligente (Alvarado et al, 2004; Mohaghegh, 2005; Nikravesh et al, 2002;. Zhang, 2004; Sheremetov et al, 2005 e Sheremetov et al, 2008, Hermann, 2014), sem acoplamento com estudos de diagnóstico/tomada de decisão.

### **3. Material e métodos**

A unidade experimental de perfuração foi construída empregando uma coluna de 2,80 m de altura, dispondo de sensores de vazão, densidade e um transdutor de pressão instalado em sua parte inferior (Figura 1). Como o objetivo primordial é regular a pressão anular de fundo, a unidade foi projetada de modo a poder empregar duas variáveis manipuladas: vazão da bomba helicoidal de deslocamento positivo, acionada via inversor de frequência e abertura da válvula de choke. Para retratar o distúrbio, frequentemente presente, que é o aumento da velocidade de perfuração ou a perfuração de rochas apresentando diferentes densidades, foram projetados dois

tanques de alimentação, contendo fluidos de densidades diferentes, quais sejam, água (8ppg) e lama de perfuração (15ppg).



**Figura 1.** Esquema da unidade de controle de pressão anular de fundo

A unidade experimental possui uma bomba helicoidal de deslocamento positivo conectada a uma tubulação de 2" na direção horizontal, que, posteriormente, sofre uma divisão para duas linhas: a primeira é uma tubulação de 2" de by-pass que segue em direção aos tanques de alimentação. Essa linha tem como finalidade principal fornecer alívio ao sistema caso a pressão ultrapasse o valor de 170 psi. A outra tubulação sofre uma redução para 1", e, posteriormente, sobe verticalmente até 2,80 m de altura, a fim de simular o escoamento anular vertical dos fluidos, durante a perfuração de poços. Logo após a bomba, foi instalado um manômetro para realizar a leitura da pressão da saída da bomba. Trata-se de uma bomba de 6 HP e pressão de recalque 12 kgf/cm<sup>2</sup>. A homogeneização dos tanques de alimentação é feita através de agitadores mecânicos com potência de 1,5 cv, equipados com impelidor do tipo hélice naval. A velocidade de rotação dos motores é alterada utilizando-se dispositivos de alteração de velocidade (inversores de frequência), instalados no painel de controle, de acordo com a potência de cada motor, o que permite operação do sistema com vazões variáveis, possibilitando o uso da vazão como uma variável manipulada para o controle da pressão, bem como alteração da frequência de agitação dos tanques, promovendo a homogeneização do fluido. Na seção vertical da unidade, no fundo da coluna está conectado um medidor de vazão

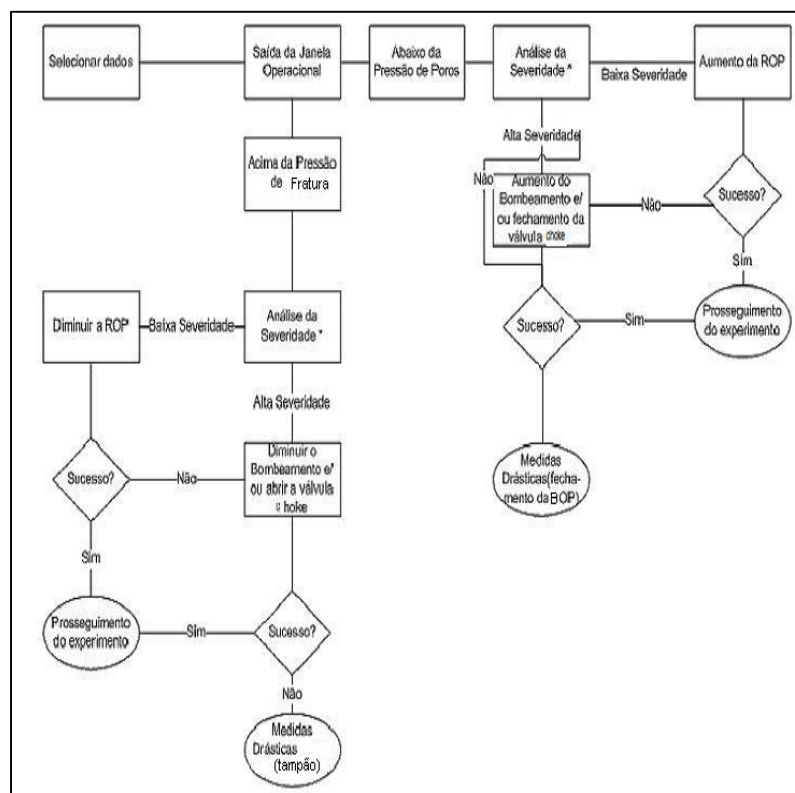
mássica, que fornece dados de vazão (medido de acordo com o efeito Coriolis) e densidade. Os valores de densidade são verificados no transmissor que é um periférico do medidor de vazão.

O transmissor de pressão fornece dados de pressão de fundo do sistema, que é a variável a ser controlada. Por fim, a unidade dispõe de uma válvula de controle que está situada no topo da unidade, após o trecho vertical, simulando a válvula choke que pode ser usada como variável manipulada no esquema de controle. Há uma válvula proporcional para controle de vazão, equipada com um posicionador de alimentação pneumática. A unidade experimental dispõe, ainda, de um programa desenvolvido em linguagem C++ para monitoramento (vazão, pressão, abertura válvula *choke*, abertura das válvulas borboleta) e tomada de decisão. Foram utilizadas duas válvulas borboleta (tipo wafer, diâmetro 4", corpo em ferro fundido ASTM A-216, disco revestido em Nylon 11, vedação em EPDM). Estas válvulas estão localizadas nas saídas dos tanques de água e lama, responsáveis pelo aumento ou diminuição da injeção dos fluidos no sistema, com o objetivo de controlar a pressão anular de fundo, alterando a densidade do fluido de perfuração, o que simula a variação da velocidade de perfuração.

O programa computacional desenvolvido para a unidade é um sistema de monitoramento e diagnóstico que detecta problemas operacionais e distúrbios e fornece uma indicação para assegurar a perfuração dentro de janela operacional. Manter a pressão anular de fundo dentro dos limites da janela operacional, isto é, pressão de fratura (limite superior) e pressão de poros (limite inferior), é essencial nos processos de perfuração de poços de petróleo. São vários os fatores que podem causar impacto na pressão de fundo do poço durante o processo de perfuração, como, a remoção insuficiente de sólidos pelo fluido de perfuração, desmoronamento do poço, influxos do reservatório para o poço (kicks), processo de conexão de tubos, etc (Rezende et. al., 2009). Perda de circulação é um dos problemas mais comuns encontrados durante a perfuração: lama de perfuração que pode fluir livremente sobre as formações superficiais não consolidadas, pela alta permeabilidade, ou apenas por causa de um tubo danificado. Para saber a solução adequada e eficiente, a intervenção, de engenheiros de petróleo experientes, é normalmente exigida. Vale ressaltar que a perda de circulação pode aumentar os custos de operação.

O processo decisório é organizado de acordo com a árvore de decisão, como é mostrado na Figura 2, selecionando a técnica mais adequada para cada situação (usando como variável de entrada: válvula choke, ROP ou vazão da bomba). Uma estratégia eficaz para regular a pressão baseia-se na adequada correlação de parâmetros, tais como: monitoramento da perda de volume (perda de circulação), localização do ponto da perda, rastreamento da janela operacional, impondo valores de pressão anular de fundo entre pressão fratura e pressão de poros, etc. O conhecimento destes indicadores é fortemente baseado em experiências de campo. De acordo com o diagrama da Figura 7, o bloco 1 é composto de alimentação de dados, sendo que, quando o sistema ultrapassar a janela operacional, medidas deverão ser tomadas. Inicialmente, o

programa analisará se a operação está acima ou abaixo da pressão de poros, se a pressão estiver cerca de 10 % abaixo da pressão de poros deve-se aumentar a ROP, caso a pressão esteja 10-20% abaixo da pressão de poros, deve-se promover o aumento do bombeamento ou diminuição do índice de abertura da válvula choke e, finalmente, caso a pressão esteja 30% abaixo da pressão de poros, devem ser tomadas medidas drásticas (fechamento da BOP). De forma oposta, caso a pressão esteja 10% acima da pressão de fratura deve-se diminuir a ROP, caso a pressão anular de fundo ultrapasse 10%- 20% o limite máximo, deve-se diminuir o bombeamento ou aumentar o índice de abertura da válvula choke e, por fim, se a pressão estiver acima de 30% da pressão de fratura medidas drásticas deverão ser tomadas, como a injeção de tampão de cimento.



**Figura 2.** Arvore de decisão para uma situação de risco

#### 4. Resultados e discussão

Com o objetivo de avaliar as variáveis de entrada: vazão da bomba de lama, índice de abertura da válvula choke e ROP (taxa de penetração), a serem empregadas no processo de diagnóstico/tomada de decisão do programa computacional, foram executados testes experimentais de resposta ao degrau (Seborg et al., 2011). O objetivo primordial dos testes foi

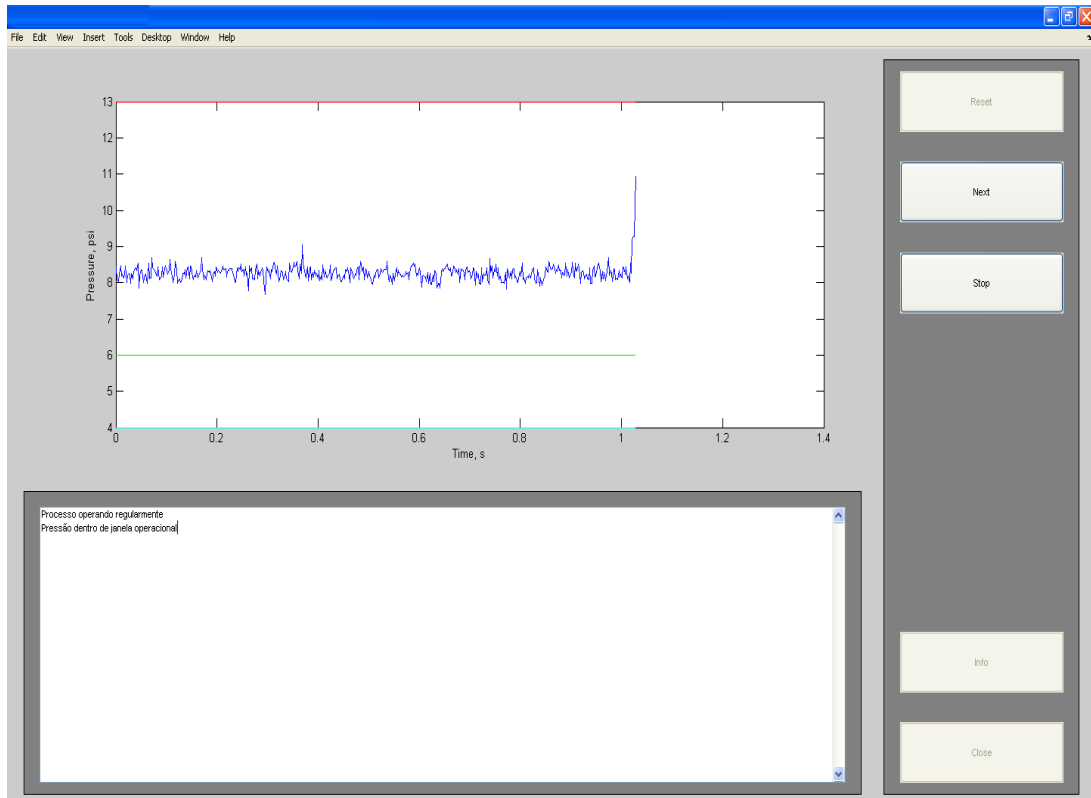


mapear o comportamento entre as variáveis de entrada e a variável de saída (pressão anular de fundo).

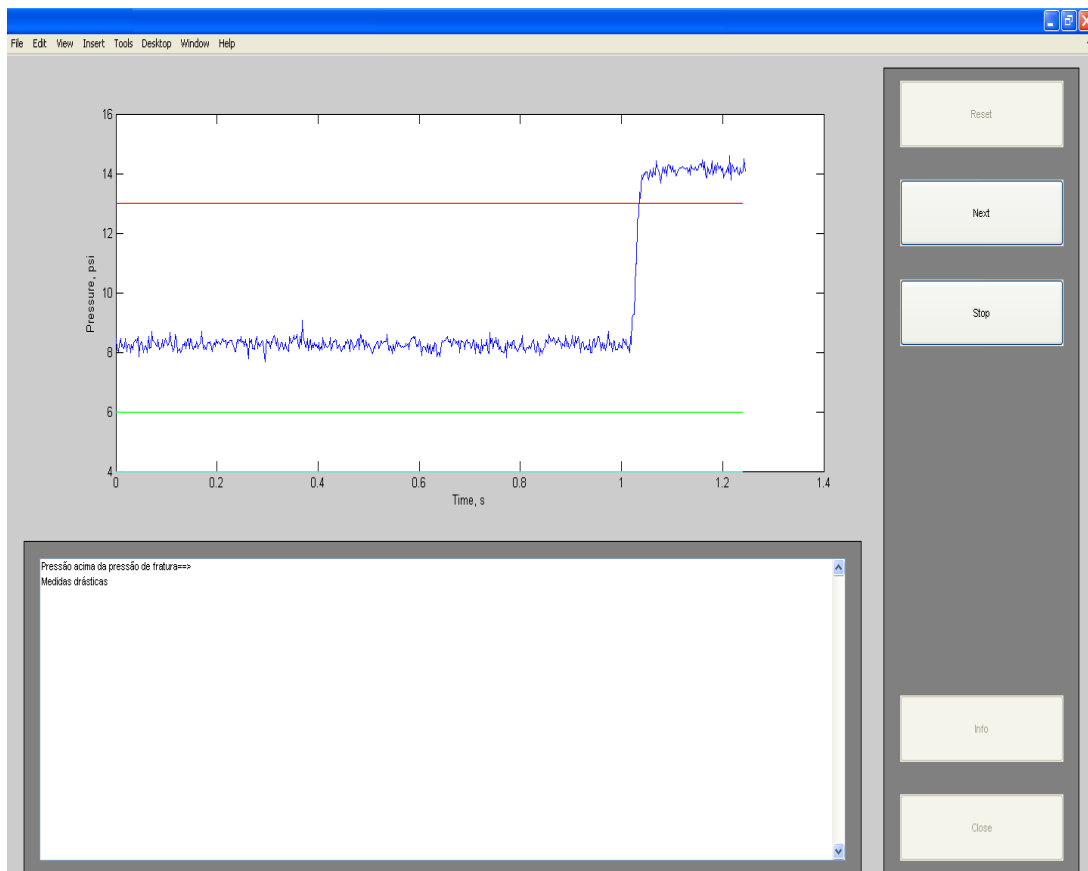
Uma análise comparativa das variáveis de entrada revela que a pressão no poço é mais lentamente modificada quando do uso da ROP como variável manipulada, já que há um atraso de tempo para que as variações sejam sentidas ao longo de todo o poço. Outra forma de se alterar a pressão anular de fundo é mudar a abertura da válvula de *choke*, situada na superfície, por onde escoar o fluido, vindo da região anular do poço. Este elemento final de controle produz uma resposta rápida na variável controlada (pressão anular).

De forma análoga, o uso da vazão da bomba como variável de entrada também apresenta uma resposta rápida e satisfatória para alterar a pressão anular de fundo. Neste cenário, para controle da pressão anular de fundo podem ser empregadas a abertura da válvula de *choke* e a vazão da bomba de lama, adotando-se o sistema mecânico reportado por Jenner et al. (2004), capaz de manter o bombeamento de fluido de perfuração mesmo durante o procedimento de conexão de tubos. Dessa forma, o índice de severidade 10 % de desvio emprega a ROP como variável de entrada e o índice de 10- 20% de desvio recomenda o uso do bombeamento ou modificação da abertura da válvula *choke* (variáveis de entrada mais efetivas e rápidas).

A Figura 3 refere-se à análise dos dados experimentais onde a pressão de poros (reta em verde) é de 6 psi e a pressão de fratura (reta em vermelho) é de 13 psi. Nesta figura, os dados analisados estão dentro da janela operacional, não sendo necessária a manipulação de nenhuma variável de entrada, porém, no instante  $t = 1$  s há um pico de pressão, indicando que o processo certamente sairá da normalidade, sendo necessária a manipulação de alguma das variáveis de entrada. Na Figura 4, a pressão do sistema ultrapassa a pressão de fratura de 13 psi, fazendo-se necessário a implantação de medidas drásticas, como, por exemplo, a injeção de um tampão de cimento.



**Figura 3.** Operação dentro da Janela Operacional



**Figura 4.** Pressão anular de fundo acima da pressão de fratura.

## 5. Conclusões

Uma unidade experimental foi construída para analisar cenários recorrentes que ocorrem durante o processo de perfuração de poços de petróleo. A planta experimental contém sensores em linha: fluxo, densidade e transdutor de pressão, para fins de detecção de distúrbios. Duas válvulas borboleta, conectadas aos tanques de alimentação, uma bomba de lama e uma válvula choke podem ser empregadas como variáveis de entrada (variáveis manipuladas), para fins de regulação da pressão anular de fundo.

A unidade experimental retrata a natureza transiente da pressão anular de fundo, decorrente dos fenômenos inerentes de crescimento do comprimento do poço, modificações na densidade e viscosidade e o procedimento de conexão de tubos. Além disso, o kick e a perda de circulação (perda de lama) também foram implementados experimentalmente, sendo detectados por meio de um aumento ou diminuição dos níveis de fluxo no anular, respectivamente, empregando-se um medidor de vazão.

O programa de monitoramento inteligente foi construído com base em sensores on-line. A fim de assegurar perfuração dentro de janela operacional, diversas variáveis manipuladas podem ser utilizadas, dependendo da severidade da perda (infiltração, perda parcial ou perda total). O programa de monitoramento inteligente da planta experimental de perfuração de poços de petróleo foi implementado a fim de garantir pressão anular de fundo dentro da janela operacional e também para rejeitar distúrbios.

## 6. Referências

ALVARADO M., SHEREMETOV, L., CANTÚ, F., 2004. Autonomous agents and computational intelligence: the future of AI applications for petroleum industry, *Expert Syst. Appl.*, v. 26, p. 3–8.

ARAGÃO, A.F.L.; WALDMANN, A., ANDRADE, A.R., MARTINS A.L., LOMBA, R.T.F., 2006. Sobre os mecanismos responsáveis por minimizar a invasão do fluido de perfuração na rocha reservatório, Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração e Completação de Poços de Petróleo e Gás, Pedra Azul, Domingos Martins.

HEMERLY, E. M., 1996. Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos, Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo.

HERMANN, G., 2014, Application of Artificial Intelligence Techniques in Monitoring Drilling Processes, *Advances in Soft Computing, Intelligent Robotics and Control - Topics in Intelligent Engineering and Informatics*, v. 8, p. 69-79.

JENNER, J.W., ELKINS, H.L., SPRINGETT, F., LURIE, P.G., WELLINGS, J.S., 2004. The continuous circulations systems: an advance in constante pressure drilling, in SPE anual technical Conferenca and Exhibition, no. SPE 90702, Houston, TX, USA.

MOHAGHEGH, S.D., 2005. Recent developments in application of artificial intelligence in petroleum engineering, J. Pet. Technol., v. 57, n. 4, p. 86–91.

NIKRAVESH, M., AMINZADEH F., ZADEH L. (Eds.), 2002. Soft Computing and Intelligent Data Analysis in Oil Exploration, Elsevier Science.

NYGAARD, G., GODHAVN, J.-M., AAMO, O.M., HAUGE E., 2013. A novel model-based scheme for kick and loss mitigation during drilling, Journal of process control, v. 23, n. 4, p. 463-472.

REZENDE, M.S.C., KERN, E., MALISKA JÚNIOR, C.R., ARAGÃO, A.F.L., TEIXEIRA, G.T., GANDELMAN, R.A., 2009. Interpretação De Dados De Pressão Durante A Perfuração De Poços Horizontais, III Enahpe, Campos do Jordão, São Paulo.

SHEREMETOV L., BATYRSHIN I., MARTINEZ J., RODRIGUEZ H., .FILATOV D., 2005. Fuzzy expert system for solving lost circulation problem, in: N. Nedjah, L. Mourelle, M. Vallasco, A. Abraham, M. Koppen (Eds.), Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Hybrid Intelligent Systems, Rio de Janeiro, Brasil, Nov. 6–9, IEEE, 92–97.

SHEREMETOV, L., BATYRSHIN, I, FILATOV, D., MARTINEZ, J., RODRIGUEZ, H., 2008. Fuzzy expert system for solving lost circulation problem, Applied Soft Computing, v. 8, p.14.

THOMAS, J. E., 2001. Fundamentos de Engenharia do Petróleo. Editora Interciência. Rio de Janeiro.

VEGA, M.P., SCHEID, C.M., CALÇADA, L.A., MARTINS, A.L., 2008. Nonlinear Identification and Model Based Control of an Oil Well Drilling Process, ESCAPE, 2008.

WALDMANN, A., ANDRADE, A.R., MARTINS A.L., LOMBA, R.T.F., ARAGÃO, A.F.L., 2006. Sobre os mecanismos responsáveis por minimizar a invasão do fluido de perfuração na rocha reservatório, Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração e Completação de Poços de Petróleo e Gás, Pedra Azul, Domingos Martins.

WIND, J. WEISBECK, D. CULEN, M., 2005. Successful integration of electromagnetic MWDLWD technology extends UBD operation envelope into severely depleted fields, in: Proceedings for the SPE/IADC Drilling Conference, no. SPE/IADC 92617, Amsterdam, The Netherlands.

ZHANG, X.; LAST N.; POWRIE W. & HARKNESS R., 1999. Numerical Modelling of Wellbore Behaviour in Fractures Rock Masses, Petroleum Sci&Engng.,v. 23,p. 95-115.

## **7. Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio técnico e financeiro.