

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

SIMULADOR COMPUTACIONAL PARA POÇOS DE PETRÓLEO COM MÉTODO DE ELEVAÇÃO ARTIFICIAL POR BOMBEIO MECÂNICO

¹João Maria Araújo do Nascimento, ¹Pablo Javier Alsina, ¹André Laurindo Maitelli, ²Rutácio de Oliveira Costa

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário - Lagoa Nova,
59072-970 Natal/RN - Brasil, joao@dca.ufrn.br, pablo@dca.ufrn.br, maitelli@dca.ufrn.br

²Petrobras UN-RNCE (Gerência de Elevação), Av. Interventor Mário Câmara, 59074.600
Natal/RN – Brasil, rutacio@petrobras.com.br

Resumo – Este trabalho apresenta um simulador computacional para poços de petróleo com trajetória vertical, equipados com elevação artificial por bombeio mecânico, capaz de representar o comportamento dinâmico deste sistema e avaliar numericamente diversos parâmetros relevantes ao mesmo, permitindo a fácil visualização de diversos fenômenos pertinentes ao processo, a custos e tempos menores, em relação a experimentos com poços reais. Comparado a outros simuladores existentes na indústria, o presente simulador possui características interessantes. A grande maioria dos simuladores na indústria são concebidos como ferramentas de projeto e parametrização de sistemas de bombeio. Entretanto, o simulador apresentado neste trabalho, além de ser útil no dimensionamento, projeto e parametrização destes sistemas de bombeio mecânico, possibilita ainda o estudo do comportamento dinâmico do processo, facilitando tomadas de decisões, predição de fenômenos intrínsecos ao processo e projeto de controladores. Outro diferencial deste simulador é a sua interface com controladores industriais, o que permite testá-los sem a necessidade de colocá-los em campo. Ao contrário de outros simuladores, este simulador possui um módulo de falhas que possibilita o desenvolvimento de métodos para sua detecção. Outra vantagem deste simulador é a disponibilidade de animações em 3D, que poucos outros produtos na indústria incluem.

Palavras-Chave: Simulador; Elevação Artificial; Bombeio Mecânico.

Abstract – This paper proposes a computer simulator for sucker rod pumped vertical wells. The simulator is able to represent the dynamic behavior of the systems and the computation of several important parameters, allowing the easy visualization of several pertinent phenomena. The use of the simulator allows the execution of several tests at lower costs and shorter times, than real wells experiments. Comparing with others industrial simulators, this simulator provide interesting characteristics. Most of the industrial simulators are tools for design and parameterization of sucker rod pumping systems parameters. However, the simulator presented in this paper, beside it's use in systems design and parameterization, permits to study the processes dynamic, facilitating decisions and prediction of intrinsic phenomena of the process and controllers' project. Another diferencial of this simulator is its ability of working with industrial controllers, allowing test them without the need of placing them in field. Unlike other simulators, this simulator possesses a "fault module" that permits the development of methods for their detection. Other advantage of this simulator is the 3D animations interface, that only few other products in the industry include.

Keywords: Simulator, Artificial lift, Sucker Rod Pumping.

1. Introdução

Chung (2004) definiu a simulação computacional como um processo de experimentos em sistemas ou fenômenos físicos, realizados através de modelos matematicamente computadorizados, os quais representam características observadas em sistemas reais.

A partir da simulação computacional é possível a análise de diferentes tipos de sistemas, possibilitando:

- um maior domínio e conhecimento na operação dos sistemas;
- o teste de novos conceitos ou técnicas antes da implementação física;
- a obtenção de informações sem perturbar o sistema real, e
- a observação da evolução de fenômenos em velocidades maiores ou menores do que a velocidade de fenômenos reais.

Segundo Chung (2004), através de simuladores é possível a visualização das principais etapas de um processo, examinando-se as suas formas de operação e entendendo-se suas principais conexões com ambientes externos, sem a necessidade de parar-se o processo real, o que poderia resultar em perturbações inconvenientes ao sistema. Assim, a análise de sistemas em ambientes computacionalmente simulados pode cooperar na melhoria de processos e no emprego de novas técnicas, sem possíveis desgastes do sistema real.

Neste contexto foi desenvolvido um simulador para o método de elevação de petróleo bombeio mecânico, cujo objetivo é apresentar, de forma clara e simples, os fenômenos transientes de um sistema de BM, viabilizando uma melhor compreensão dos fenômenos e facilitando o estudo do método.

2. Bombeio Mecânico

Segundo Takács (2002), o primeiro método de elevação artificial foi o bombeio mecânico, o qual após quase cem anos de sua introdução em campos de petróleo, ainda é um método muito popular. Sua importância se reflete no número de instalações existentes, que correspondem a dois terços dos poços produtores do mundo. Considerando somente os poços com elevação artificial, o bombeio mecânico compreende cerca de 80% destes poços, ou seja, é o método mais utilizado na indústria do petróleo.

Neste método, observado na Figura 1, o movimento rotativo de um motor elétrico é transformado em movimento alternativo por uma unidade de bombeio situada na superfície. O movimento alternativo é transmitido para o fundo do poço através de uma coluna de hastes, acionando uma bomba que fornece energia ao fluido vindo da formação, elevando-o para a superfície.

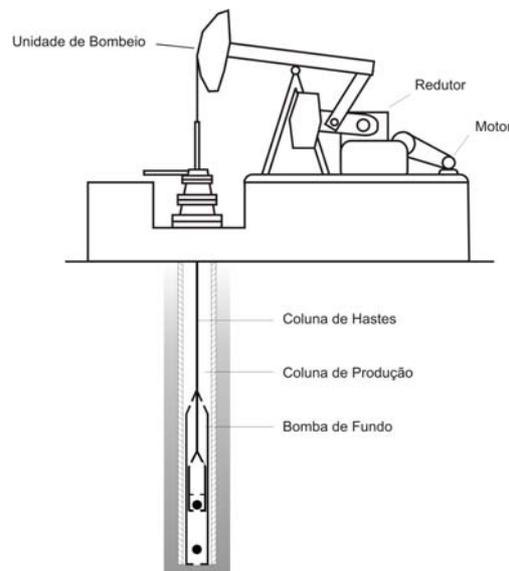


Figura 1. Sistema de Bombeio Mecânico de Petróleo.

21. Cartas Dinamométricas

As cartas dinamométricas estão entre as principais ferramentas de análise e avaliação das condições de bombeio. Uma carta dinamométrica é nada mais do que um gráfico representando os efeitos gerados pela carga atuante na bomba, durante um ciclo de bombeio, ou seja, relaciona carga versus posição. Existem dois tipos de cartas

dinamométricas, a carta de superfície e a de fundo. As cargas são registradas na superfície através de dinamômetros e no fundo do poço através de dispositivos especiais ou através de modelos matemáticos. Vide Figura 2.

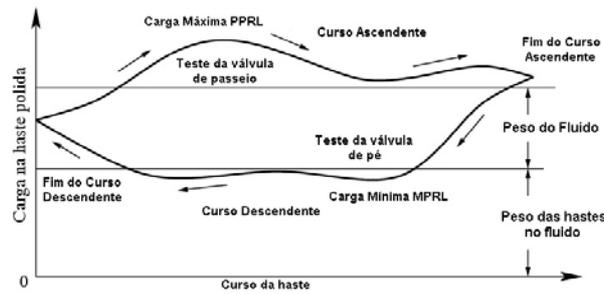


Figura 2. Carta Dinamométrica.

3. Modelagem do Sistema

Segundo Takács (2002), no início das pesquisas para a definição de variáveis importantes em sistemas de bombeio mecânico, ficou claro para os cientistas que a chave para prover um modelo preciso era a simulação do comportamento das hastes.

No projeto e análise de BM são observados muitos parâmetros importantes para o dimensionamento correto do sistema, dentre eles, se destacam: a carga máxima e mínima na haste polida; o curso efetivo do pistão; o torque requerido no redutor e a potência máxima na haste polida.

Takács (2002) ressaltou que a coluna de hastes possui um comportamento elástico, o que dificulta a solução numérica do problema. Todo movimento gerado na superfície em função da unidade de bombeio é transmitido para o fundo, da mesma forma, os esforços gerados em virtude das cargas na bomba também são transmitidos à superfície. As transmissões dos esforços na coluna de hastes são propagadas na velocidade do som e interferências ou reflexões destes esforços podem prejudicar ou comprometer o funcionamento do sistema.

Um modelo proposto para o comportamento dinâmico da coluna de hastes foi definido por Gibbs (1963), na forma de um problema de valor de contorno composto de uma equação diferencial parcial (equação da onda amortecida). A Equação 1 proposta por Gibbs é descrita a seguir:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} - g - c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

onde $u(s,t)$ é o deslocamento de um ponto s da coluna de hastes num instante t , v é a velocidade do som nas hastes, g a aceleração da gravidade e c é o coeficiente de amortecimento dado de acordo com a Equação 2:

$$c = \frac{\pi v c_D}{2 D_b} \quad (2)$$

sendo c_D o fator de amortecimento adimensional e D_b a profundidade da bomba.

Segundo Gibbs (1963), a escolha de um bom valor para c_D pode simular o atrito viscoso e o atrito de Coulomb. O coeficiente de amortecimento, neste caso, é função de características do poço, tais como: geometria, tipo de fluido do poço e equipamentos instalados.

A segunda equação importante para este modelo obedece à lei de Hooke para o cálculo das forças de tração nas hastes.

$$F(s,t) = EA \frac{\partial u}{\partial s} \quad (3)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material das hastes e A a área de seção transversal das hastes.

A solução da equação 3, durante o ciclo de bombeio mais os valores de posição da haste polida $u(D_b,t)$, constituem a carta dinamométrica de superfície. Já o conjunto de posição $u(0,t)$ e força no pistão representa a carta dinamométrica de fundo.

O modelo proposto por Gibbs (1963) subsidiou diversas outras pesquisas, dentre elas, o modelo de Lea (1990). Este modelo deduziu uma expressão para o coeficiente de amortecimento em função da viscosidade do fluido e dos diâmetros do pistão, tubo e hastes.

Para fluidos do tipo newtoniano, com escoamento laminar, incompressível e monofásico, o termo para o atrito viscoso, encontrado na equação 1, é definido por:

$$\frac{\tau U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} = \frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} (K_1 v_r - K_2 \bar{v}_{fk}) \quad (4)$$

sendo τ a tensão de cisalhamento, ρ a massa específica, v_r a velocidade das hastes (taxa de variação do deslocamento u no tempo), v_{fk} a velocidade do fluido numa determinada seção, U_r o perímetro da seção circular das hastes, K_1 e K_2 fatores geométricos, funções dos diâmetros do tubo r_t e das hastes r_r . O subscrito rk significa uma seção de haste.

Os fatores K_1 e K_2 são definidos por:

$$K_1 = \frac{(r_t^4 - r_r^4) \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)^2 - \left[2r_r^2 \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)\right]^2}{r_r \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) \left[(r_t^4 - r_r^4) \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)^2 \right]} \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{2(r_t^2 - r_r^2) \left[2r_r^2 \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2) \right]}{r_r \left[(r_t^4 - r_r^4) \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)^2 \right]} \quad (6)$$

A equação diferencial proposta por Lea (1990), desprezando-se o atrito haste-tubo e assumindo que o atrito viscoso é dado pela equação 4, dada por:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} - g - \frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} (K_1 v_r - K_2 \bar{v}_{fk}) \quad (7)$$

No simulador proposto, optou-se por utilizar o modelo de Lea (1990) com uma pequena adaptação: a introdução do coeficiente de amortecimento. A equação do movimento utilizada foi:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} - g - \frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} (K_1 v_r - K_2 \bar{v}_{fk}) - c v_r \quad (8)$$

3.1. Solução Numérica

Segundo Costa (1995), o comportamento das hastes é simulado por uma equação diferencial parcial, sendo que sua solução é obtida especificando condições iniciais e de fronteira sobre a variável dependente em uma região na qual se quer resolver o problema. As condições de contorno são as condições na superfície e no fundo. Já as condições iniciais correspondem ao sistema em repouso.

Na superfície, a condição de contorno é estabelecida através do movimento da haste polida em função da cinemática da Unidade de Bombeio. Para isto, admitiu-se uma aproximação por série de Fourier truncada com seis termos, estabelecida por Laine et al (1989), sendo a velocidade da haste polida expressa por:

$$v_r(D_b, t) = \omega S (A_1 \cos \omega t + \dots + A_6 \cos 6\omega t + B_1 \sin \omega t + \dots + B_6 \sin 6\omega t) \quad (9)$$

onde S é o curso das hastes, ω é a frequência angular da manivela e os coeficientes A_i e B_i são fornecidos em função da geometria da unidade de bombeio.

Costa (1995) apresentou a condição de contorno de fundo relacionada ao funcionamento da bomba. Para esta condição de contorno foram previstas as situações de enchimento parcial, presença de gás, coluna de produção não ancorada e pistão preso, ou seja, as principais situações de fundo.

No simulador é também incorporada a simulação fluidodinâmica do método de bombeio mecânico, garantindo a visualização de transientes no poço.

4. Simulador de Bombeio Mecânico

O simulador de bombeio mecânico desenvolvido representa a dinâmica deste método de elevação artificial de petróleo, permitindo que o usuário explore diversas situações que, caso contrário, só poderão ser observadas em campo,

auxiliando-o na tomada de decisões e no projeto de novas instalações, em um tempo curto, a partir de uma simulação computacional. A Figura 3 exibe uma tela do Simulador de bombeio mecânico desenvolvido.

Dentre as aplicações deste simulador, destacam-se: a utilização da ferramenta em cursos de formação profissional; a análise e estimação de parâmetros importantes no projeto de sistemas de bombeio mecânico; a possibilidade de testar novas técnicas de controle (algoritmos); a representação de transitórios; a determinação do tempo requerido para o poço atingir o regime permanente; a análise e detecção de condições de falhas e uma melhor interpretação de cartas dinamométricas.

Uma das características fundamentais e de grande relevância no simulador é a utilização de animações para apresentar o comportamento dinâmico das principais partes de um sistema de bombeio mecânico. Estas animações propiciam ao simulador características únicas, que permitem ao usuário a manipulação das mesmas, facilitando a visão e compreensão dos fenômenos. As animações do simulador foram criadas através da biblioteca gráfica *OpenGL*. Esta biblioteca é em essência uma biblioteca de modelagem extremamente portátil e muito rápida. Através de sua utilização pode-se criar gráficos 3D com qualidade próxima de um *raytracer*. *OpenGL* utiliza algoritmos desenvolvidos e otimizados pela *Silicon Graphics, Inc.* uma conhecida empresa mundial, líder em computação gráfica e animação

As informações inseridas pelo usuário no simulador de bombeio mecânico são: as características do reservatório e dos fluidos; a geometria do poço e a composição da coluna de hastes; características do poço, e informações sobre a Unidade de Bombeio.

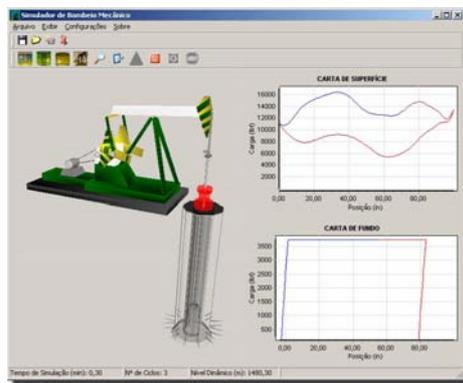


Figura 3. Simulador de Bombeio Mecânico.

4.1. Interface Microcontrolada

Outra característica interessante deste simulador é a emulação de sensores utilizados na automação de bombeio mecânico. Através de uma interface microcontrolada, os principais sensores são emulados e conectados a um controlador de bombeio mecânico, permitindo que este interprete os sinais recebidos, como se provenientes de um poço real. A Figura 4 exibe uma foto da interface microcontrolada.



Figura 4. Interface Microcontrolada.

A placa foi construída utilizando o micro-controlador PIC16F877. Este dispositivo é dotado de uma memória programável e possui diversas características interessantes. As principais são: módulo de comunicação serial, módulo PWM, entradas analógicas, saídas e entradas digitais.

4.2. Simulação de Falhas

Segundo Nascimento (2004), a simulação deve conceder ao usuário um nível de representatividade do processo apropriado para facilitar a compreensão de eventos e fenômenos ocorridos durante a execução do mesmo. Dentro deste propósito, a criação de um módulo de falhas gera diversas possibilidades de testes em controladores, melhor aproveitamento em cursos de formação e principalmente, fornece ao simulador, situações vividas em campo por operadores do sistema de bombeio mecânico.

No simulador de bombeio mecânico foram desenvolvidas condições de falhas que produzem grandes benefícios a simulação. Dentre os benefícios, destacam-se: uma maior versatilidade no treinamento de operadores na automação de BM; a possibilidade da realização de testes das funcionalidades de um controlador industrial; melhor definição de parâmetros em um controlador antes de instalá-lo em campo, e maior versatilidade para testes de algoritmos e sistemas supervisórios.

O módulo de falhas é composto de seis falhas, são elas: haste partida, pistão preso, eficiência da bomba de fundo, bloqueio de gás, pancada de fluido e parafinação.

Dentre as seis falhas presentes no módulo de falhas, duas necessitam de tratamento especial, em virtude da necessidade de diferentes condições de contorno para a solução numérica da equação diferencial, são elas: as condições de haste partida e pistão preso. Nestas falhas foram introduzidas diferentes condições de contorno viabilizando a visualização do fenômeno.

O resultado da simulação das falhas é verificado através das cartas dinamométricas e da visualização do fenômeno na animação. A Figura 5 representa uma carta dinamométrica exibindo a falha de pistão preso.

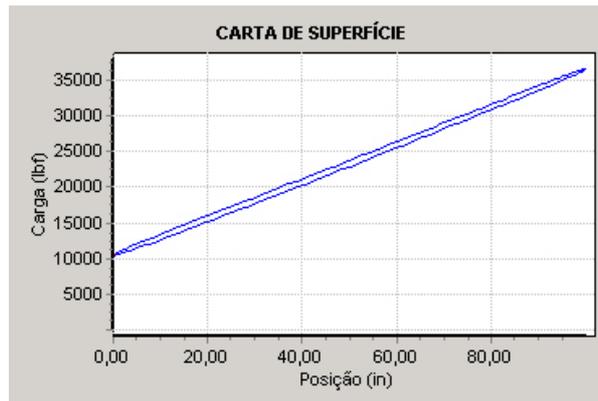


Figura 5. Falha de Pistão Preso.

5. Conclusão

Neste artigo, apresentou-se um simulador de bombeio mecânico de petróleo utilizado para fins didáticos ou para análise e parametrização de poços ou controladores. O mesmo é detentor de uma interface gráfica bastante interativa, sendo esta característica um diferencial que, comparada com os simuladores já existentes no mercado, apresenta um grande avanço. Desta forma, o usuário compreende e visualiza de diversos ângulos o funcionamento dos principais elementos de um sistema de bombeio. O simulador ainda dispõe de uma interface microcontrolada que permite através da emulação de sensores, a realização de testes em controladores, os quais em campo seriam inviáveis.

Tendo em vista que não existe no mercado atual nenhuma ferramenta que disponibilize a simulação dinâmica, com a presença de possíveis falhas encontradas em sistemas reais, acompanhada da comunicação com controladores industriais, sem dúvida este simulador contribuirá no avanço de pesquisas no tocante ao controle de poços com método de elevação de petróleo bombeio mecânico.

6. Referências

- Chung C. A., *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*, CRC Press, 2004.
- Costa, R. O., *Bombeamento Mecânico Alternativo em Poços Direcionais*, Dissertação de Mestrado, Campinas/SP, 1995.
- Gibbs, S. G., *Predicting the Behavior of Sucker-Rod Pumping Systems*, Journal of Petroleum Technology, 1963.
- Laine, R. E., D. G. Cole, and J. W. Jennings. *Harmonic Polished Rod Motion*, SPE 19724. San Antonio, Texas: 64th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE, 1989.
- Lea, J. F., *Modeling forces on a bean pump system when pumping highly viscous crude*, Society of Petroleum Engineers - SPE, 1990.
- Nascimento, J. M. A., *Simulador Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico*, Dissertação de Mestrado – UFRN, Natal/RN, 2004.
- Takács, G., *Sucker-rod Pumping Manual*, PennWell Books, 2002.