

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

MODELAGEM DINÂMICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE POÇOS DE PETRÓLEO VERTICAIS E DIRECIONAIS COM ELEVAÇÃO POR BOMBEIO MECÂNICO

AUTORES:

FILIPE C. A. LINS; KAYO G. SILVA; ADELARDO A. D. MEDEIROS; RUTÁCIO O. COSTA

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. 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 5ºPDPETRO.

MODELAGEM DINÂMICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE POÇOS DE PETRÓLEO VERTICAIS E DIRECIONAIS COM ELEVAÇÃO POR BOMBEIO MECÂNICO

Abstract

This paper presents a dynamic model of vertical oil wells using artificial elevation by sucker-rod pumping. The modeling of the system is separated by modules that provide a good understanding of the system. The modules are: a) induction motor, using a stationary model that describes the behavior of movement transmitted to the pumping unit in function of load received b) pumping unit, responsible for describing the transformation of the rotational movement to alternative movement by the kinematic model, c) rod string, using a model with concentrated parameters to describe the propagation of movement along of the rod string d) fluid, used to describe the motion of fluid in the column of production according to the movement of the rod string d) subsurface pump, which describes the behavior of the variation of pressure inside the pump according to the movement of the piston, the actuation of traveling and standing valves and the production of fluid to the surface, f) annular, used to describe the behavior of fluid flow in the revetment; g) reservoir, describing the production of fluid from the reservoir to the well with the linear model and the Vogel IPR curve (inflow performance relationship). The main advantage of this modeling is the use of, whenever possible, instead of concentrated parameters distributed parameters, which allows the use of ordinary differential equations instead of partial differential equations, the simulation is much more complex.

Introdução

Chung (2004) definiu 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 simulação computacional proporciona um maior domínio e conhecimento na operação de sistemas, a obtenção de informações sem perturbar o sistema e o projeto de sistemas otimizados antes da implementação física.

Outra vantagem é que a simulação pode ser processada num tempo muito inferior ao tempo que um sistema real levaria.

Tais vantagens casam muito bem com a necessidade do mercado exigente de hoje, pois possibilitam o projeto de sistemas cada vez mais eficientes.

Diante disso foi desenvolvido um modelo e a simulação de sistemas de poços de petróleo por bombeio mecânico. Tal modelo apresentado compreende a simulação de poços verticais e direcionais, sendo parte de um modelo mais completo que leva em consideração a modelagem dinâmica do escoamento do fluido. O modelo completo atualmente está em desenvolvimento.

Segundo Takács (2002), mais de 80 % dos poços de petróleo providos de algum tipo de elevação artificial, usam o bombeio mecânico como método. A Figura 1 mostra os componentes de um sistema de bombeio mecânico em um poço de geometria vertical.

O bombeio mecânico é dividido em dois tipos de componentes básicos. Os componentes de superfície e os componentes de fundo. Os componentes de superfície são: o motor, a caixa de redução, a unidade de bombeio e a haste polida. Já os componentes de fundo são: a coluna de hastes e a bomba de fundo.

Nos últimos anos, o uso do bombeio mecânico em poços de geometria direcional tem se tornando cada vez mais comum. Isto acontece devido ao fato de que muitas áreas de exploração estão situadas abaixo de rios, salinas e cidades.

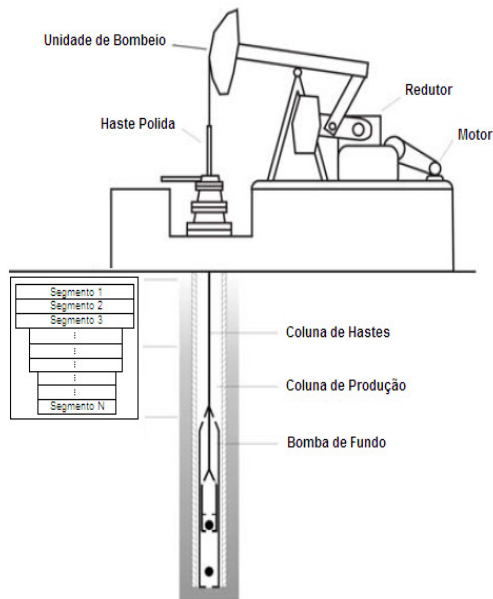


Figura 1. Sistema de Bombeio Mecânico

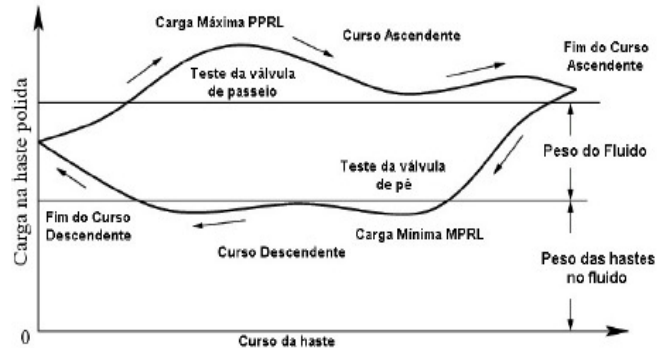


Figura 2. Carta dinamométrica

Um parâmetro importante na simulação do bombeio mecânico é a carta dinamométrica. Basicamente ela é um gráfico que mostra os efeitos gerados pelos esforços causados pela carga atuante na bomba. Uma carta relaciona a carga versus posição durante um ciclo de bombeio. 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 modelos matemáticos. Uma carta dinamométrica é vista através da Figura 2.

Metodologia

A simulação de um sistema de bombeio mecânico envolve a determinação do comportamento de vários sistemas. Dentre os sistemas, a coluna de hastes é a que detêm maior importância. Isto acontece pois todo movimento gerado na superfície pela unidade de bombeio é transmitido, através da coluna de hastes à bomba de fundo. E que todos os esforços gerados pelas cargas na bomba são transmitidos passando pela coluna de hastes até a superfície. Um fator complicador se deve ao fato de cada haste, presente na coluna de hastes, possuir elasticidade.

A maioria dos modelos que descrevem o comportamento da coluna de hastes são baseados no modelo definido por Gibbs (1963), onde a coluna de hastes é representada pela equação da onda amortecida.

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

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

No qual $u(s, t)$ representa o deslocamento de um ponto da coluna de hastes s num instante t , v_s é a velocidade do som nas hastes e c_D é o fator de amortecimento adimensional.

Tal modelo leva em consideração a utilização de parâmetros distribuídos e descreve o comportamento de toda a coluna de hastes no tempo. Ou seja, a equação é representada por uma equação diferencial parcial. Devido a isso, os métodos numéricos utilizados para simulação do modelo são mais complexos que os métodos utilizados caso a equação fosse ordinária.

Diante de tal problema, foi realizada uma modelagem que gera um sistema de equações diferenciais ordinárias ao invés de gerar uma equação diferencial parcial. Tal formulação foi possível em razão da utilização de parâmetros concentrados. O que significa que a coluna de hastes é separada em vários segmentos e que cada segmento possui seu sistema de equações, e ainda, que os segmentos interagem entre si conforme a Figura 1 e a Figura 3. Nas seções seguintes será mostrada a modelagem do sistema.

a) Modelagem da coluna de hastes

O modelo de um segmento pode ser visto na Figura 3 onde K representa a elastância do segmento de haste, m é a massa do segmento de haste, p é a componente do peso do segmento de haste paralelo ao tubing, f_f é a força de atrito gerada entre o contato haste-fluido, f_s é a força de atrito gerada entre o contato haste-tubing, f_{in} é a carga vinda do segmento de haste posterior, v_{in} é a velocidade recebida do segmento de haste anterior, v é a velocidade do segmento e f é a carga do segmento.

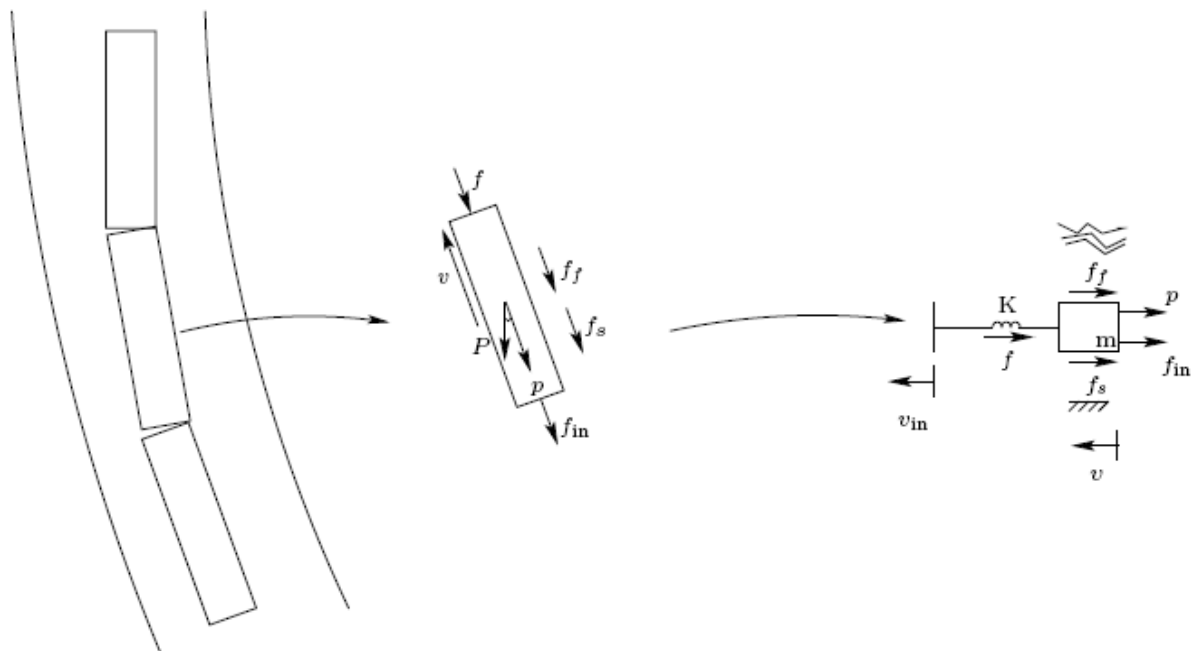


Figura 3. Modelo físico

Utilizando a segunda lei de Newton e a lei de elasticidade de Hook, podemos obter um sistema de equações diferenciais ordinárias, que descreve o comportamento de cada segmento.

$$F = -f - f_s - f_f - f_{in} - p = m \cdot a = m \cdot \dot{v} \quad (1)$$

$$\dot{v} = -\frac{1}{m}(f + f_s + f_f + f_{in} + p) \quad (2)$$

onde:

$$p = P \cdot \cos(\phi) \quad (3)$$

em que ϕ representa o ângulo de inclinação do tubing com a vertical e P é o peso.

E através da lei de Hook teremos:

$$f = K \cdot \Delta u = K \cdot (u_{in} - u). \quad (4)$$

Derivando f chegaremos a expressão:

$$\dot{f} = -K \cdot v + K \cdot v_{in} \quad (5)$$

Com isso o sistema de equações diferenciais ordinárias que descreve cada segmento será representado pela Equação 2 e pela Equação 5.

As equações dos parâmetros do modelo são:

$$K = \frac{E \cdot A_r}{\Delta L} \quad (6)$$

onde E é a constante de elasticidade do material, A_r é a área de seção do segmento de haste e ΔL é o comprimento do segmento de haste. A massa é dada pela Equação 7:

$$M = \rho_r \cdot A_r \cdot \Delta L \quad (7)$$

ρ_r é a massa específica do material da haste.

Para o atrito seco é adotado o modelo de Costa (1995) que é definido pela seguinte equação:

$$F_s = \mu \Delta L \frac{v}{|v|} \sqrt{\left[\vec{g} \cdot \vec{B} \right]^2 + \left[\vec{g} \cdot \vec{N} + \left| \vec{K} \right| \frac{f}{\rho_r A_r} \right]^2} \quad (8)$$

no qual \vec{N} , \vec{B} e \vec{K} são, respectivamente, os vetores normal, binormal e curvatura, obtidos da geometria, que é determinada por modelos que interpolam os pontos medidos na perfuração, French Oil and Gas Industry Association (1990). O coeficiente de atrito de seco é dado por μ .

Para o atrito viscoso é adotado o modelo de Lea (1990) que é definido pelas seguintes equações:

$$F_f = \mu \cdot (K_1 V - K_2 V_f) \cdot \Delta L \quad (9)$$

Dado os raios da haste r_r e do tubo da coluna de produção r_t é possível encontrar as constantes K_1 e K_2 .

$$K_1 = \frac{\left(r_t^4 - r_r^4 \right) \cdot \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + \left(r_t^2 - r_r^2 \right)^2 - \left[2r_r^2 \cdot \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + \left(r_t^2 - r_r^2 \right) \right]^2}{r_r \cdot \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) \cdot \left[\left(r_t^4 - r_r^4 \right) \cdot \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + \left(r_t^2 - r_r^2 \right)^2 \right]} \quad (10)$$

$$K_2 = \frac{2 \cdot \left(r_t^2 - r_r^2 \right) \cdot \left[2r_r^2 \cdot \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + \left(r_t^2 - r_r^2 \right) \right]}{r_r \cdot \left[\left(r_t^4 - r_r^4 \right) \cdot \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + \left(r_t^2 - r_r^2 \right)^2 \right]} \quad (11)$$

b) Fluido

O escoamento de fluido dentro do tubing é um dado que deve ser levado em consideração principalmente devido ao fato de que o contato haste-fluido produz o atrito viscoso interferindo na carga a ser recebida pela unidade de bombeio. Tal modelo não está finalizado e um modelo simplificado foi utilizado.

O modelo é o mesmo adotado por Lea (1990) e é mostrado pela Equação 12:

$$V_f = \begin{cases} -V \cdot \frac{A_{r,k}}{A_t - A_r}, & \text{se } V < 0 \\ V \cdot \frac{A_p - A_r}{A_t - A_r}, & \text{se } V \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

onde A_p é a área do pistão.

c) Outros Modelos

Para as condições de contorno, o sistema foi dividido em condições de superfície e de fundo. Nas condições de superfície foi utilizado um modelo estacionário de motor de indução, mostrado por Fitzgerald (2006), e um modelo de unidade de bombeio, definido pela norma API SPEC 11E (1988). Já para as condições de fundo, foi utilizado um modelo de bomba de fundo, apresentado por Alhanati (1988), que prevê o enchimento parcial do pistão, presença de gás, e coluna de produção não ancorada. Ainda considerando condições de fundo, foram adotados os modelos clássicos de curvas de IPR linear e de Vogel para descrever o comportamento do reservatório.

Resultados e Discussão

Para a validação do modelo proposto foram obtidas algumas cartas dinamométricas medidas em poços reais. Tais dados foram obtidos do sistema supervisório SISAL, mostrado em De Souza (2006). Tal sistema foi desenvolvido pela universidade Federal do Rio grande do Norte e é adotado pela Petrobrás.

Como exemplo, um poço da UN-RNCE da Petrobrás foi utilizado para validação. As características do poço, em operação normal, são: revestimento: 5 1/2" 15.5 (lb/ft); coluna de produção: 2 7/8" EU; bomba de fundo: 2 1/4" x15; coluna de haste: 115 hastes de 3/4", grau E, 25 ft e 85 hastes de 5/8", grau E, 25 ft; Unidade de bombeio API C-320-256-100 com curso de operação de 90,01 e 9,3 (CPM).

A Figura 4 mostra as cartas de fundo e superfície obtidas do poço real, e as Figuras 5 e 6 mostram as cartas de superfície e fundo, respectivamente, obtidas na simulação do modelo.

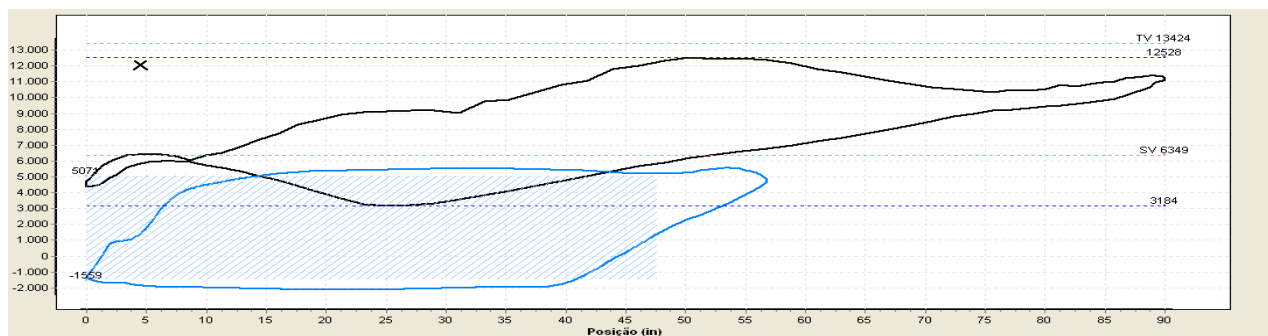


Figura 4: Carta dinamométricas obtidas do supervisório SISAL

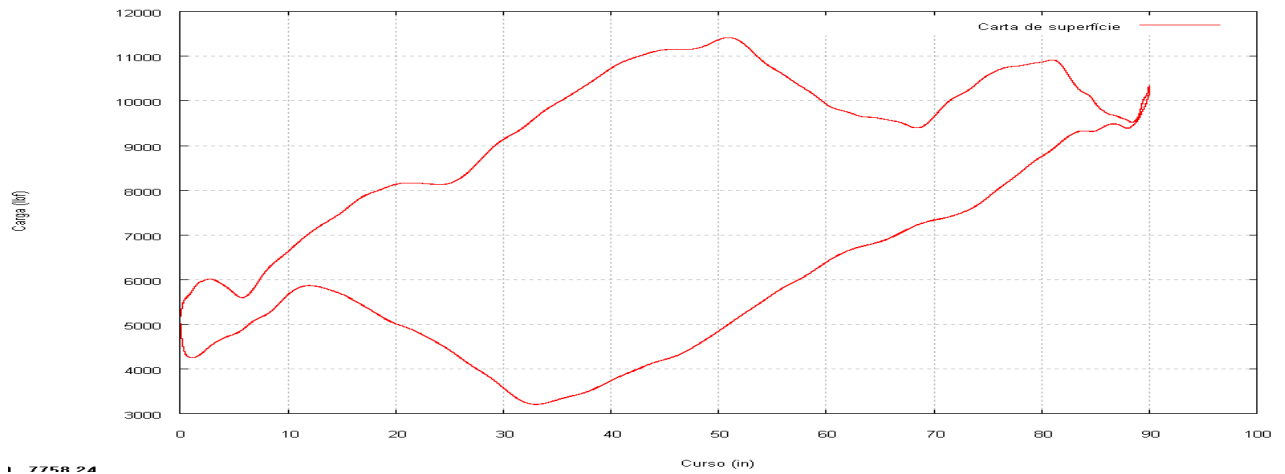


Figura 5: Carta dinamométrica de superfície obtida na simulação

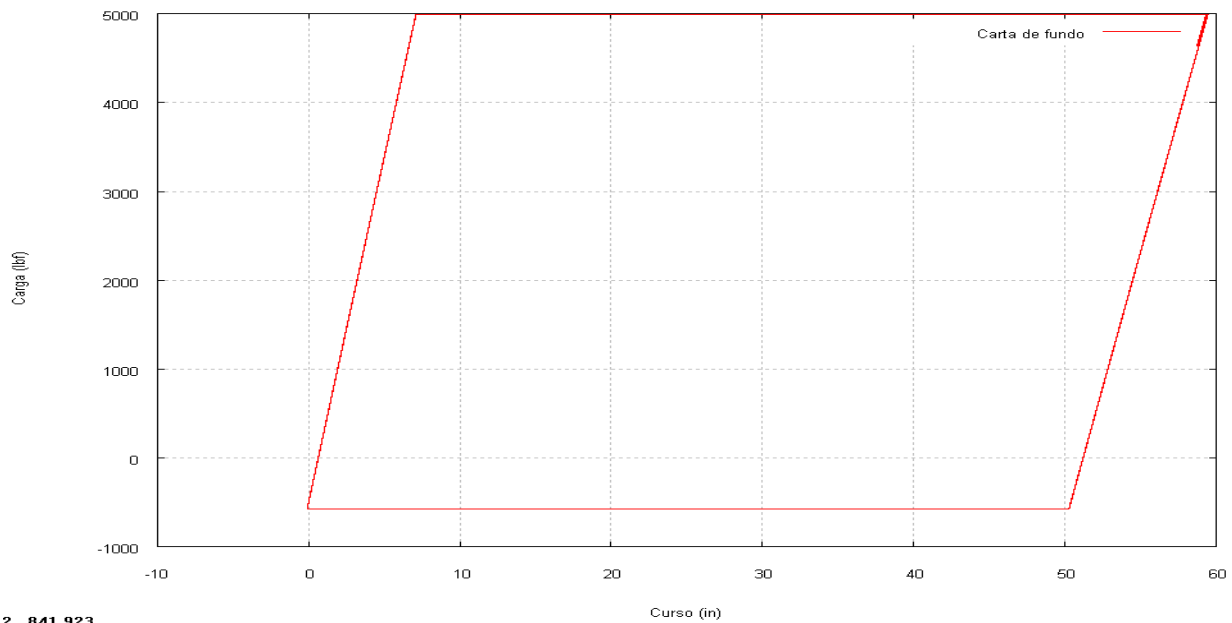


Figura 6: Carta dinamométrica de fundo obtida na simulação

Conclusões

Foi apresentado neste artigo a modelagem e simulação de poços verticais e direcionais de petróleo por bombeio mecânico. O exemplo mostrado foi de um poço vertical, pois apesar da modelagem do sistema para poços com desvios estar adiantada, sua implementação encontra-se incompleta. Entretanto, o exemplo apresentado com um poço vertical, mostra um resultado próximo do real, o que sugere que o modelo servirá para poços direcionais quando a implementação estiver completa.

Outra limitação deste modelo está em relação ao escoamento do fluido que sai do canhoneado até a bomba. Pois o modelo não está completo e simplificações estão sendo levadas em consideração.

Agradecimentos

O desenvolvimento do trabalho descrito neste artigo ocorreu devido ao projeto RODCAD, financiado pelo CENPES – Petrobrás.

Agradecemos ao Laboratório de Automação em petróleo da UFRN (LAUT), pela disponibilização do espaço de trabalho.

Referências Bibliográficas

ALHANATI, F.J.S., Modelo de previsão de comportamento de bombeio mecânico. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1988.

CHUNG, C. A., Simulation modeling handbook: A practical approach, CRC Press, 2004. API SPEC 11E, Specification for pumping units, American Petroleum institute, 1988.

COSTA, R. O., Bombeamento Mecânico Alternativo em Poços Direcionais, Dissertação de Mestrado - UNICAMP, Campinas/SP, 1995.

DE SOUZA, R. B., MEDEIROS, A. A. D., NASCIMENTO, J. M. A., MAITELLI, A. L., GOMES, H. P. SISAL - Um sistema supervisorio para elevação artificial. In: Rio Oil & Gás Expo and Conference .2006.

FITZGERALD, A. E., JR, C.K., UMANS, S. D. Máquinas elétricas, Bookman, 2006.

FRECH OIL AND GAS INDUSTRY ASSOCIATION, Directional drilling and deviation control technology, Houston, 1990.

GIBBS, S. G., Predicting the Behavior of Sucker-Rod Pumping Systems, Journal of Petroleum Technology, 1963.

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.