

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



## TÍTULO DO TRABALHO:

Simulação Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Centrífugo Submerso.

## AUTORES:

Evellyne da Silva Batista , Rutácio de Oliveira Costa , André Laurindo Maitelli , Tiago de Souza Barbosa , Andres Ortiz Salazar.

## INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

*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.*

## Simulação Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Centrífugo Submerso.

### Resumo

O Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) tem se mostrado uma das soluções mais adequadas como método de elevação. Tanto em aplicações *onshore* como *offshore*, em condições adversas de temperatura, fluidos viscosos e ambientes gaseificados. As dificuldades encontradas na manutenção e instalação de equipamentos são fatores que oneram a produção de petróleo em águas profundas, com isso, a otimização da produção, via automação, pode ser um passo fundamental para a redução de custos e falhas nos equipamentos de subsuperfície.

Este artigo apresenta um simulador computacional relacionado ao método de elevação artificial BCS. Esta ferramenta será capaz de representar o comportamento dinâmico, considerando o modelo e transmissão de energia elétrica da superfície ao motor, modelo do motor elétrico (incluindo o efeito térmico), simulação do escoamento na tubulação, levando em consideração o efeito da viscosidade. Assim como, animações tridimensionais para cada subsistema BCS (transformador, motor, bomba, selo ou protetor, separador de gás e quadro de comando).

### 1. Introdução

Para a produção de petróleo é necessário, antes de tudo, descobrir o campo potencialmente produtor através de estudos geológicos e sísmicos. Posteriormente, um poço atravessando uma ou mais zonas portadoras de hidrocarbonetos deve ser perfurado. Durante a perfuração é possível confirmar a presença de óleo. Neste caso, o poço deverá ser revestido e completado com um sistema de elevação natural ou artificial que permita a elevação de fluidos até a superfície.

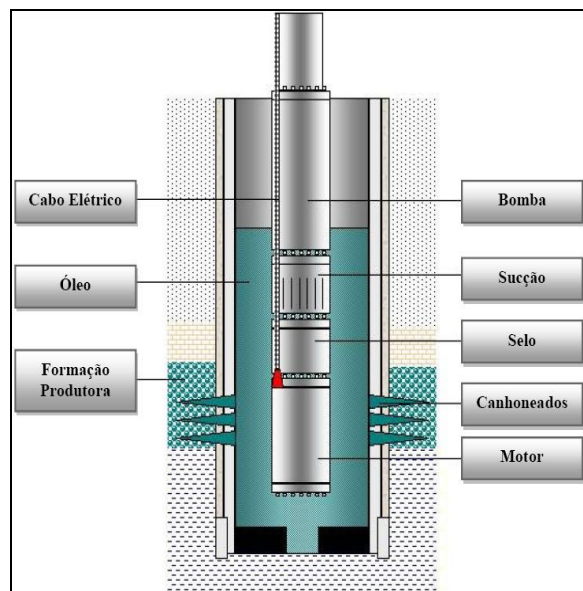


Figura 1. Sistema BCS típico.

O BCS é um método de elevação artificial no qual a energia elétrica é transmitida por um cabo até um motor elétrico de fundo que aciona uma bomba centrífuga, como apresentado na figura 1.

O simulador propõe uma melhoria no acompanhamento de poços de petróleo através do aumento da produtividade do poço. Assim como, poderá promover uma redução de custos operacionais, evitando possíveis falhas.

Atualmente, os simuladores comerciais estão baseados em equipamentos específicos do fabricante, dificultando obter resultados com outros equipamentos. Este simulador permitirá o cadastramento para qualquer fabricante, tornando-o genérico.

## 2. Metodologia

Através de simuladores, é possível a visualização das principais etapas de um processo. Neste contexto, este trabalho propõe um simulador computacional para o conjunto BCS, considerando as características do reservatório, modelo de escoamento de fluidos no interior de uma bomba BCS, incluindo o efeito da viscosidade do óleo, modelo do motor elétrico levando-se em consideração o efeito térmico e integração ao variador de velocidade (VSD).

### 2.1. MOTOR

Os motores elétricos utilizados para impulsionar as BCSs são de indução trifásicos, com geometria tubular, normalmente de dois pólos, que giram em torno de 3.500 rpm (rotações por minuto) para uma frequência de rede de 60Hz, como mostra a figura 2. Estes motores são projetados para trabalhar em condições bastante severas: imersos nos fluidos que estão sendo produzidos, a altas pressões e altas temperaturas. Para suportar estas condições, os motores são cheios com um óleo especial de origem mineral para garantir o isolamento elétrico, a lubrificação dos mancais e o resfriamento do motor.

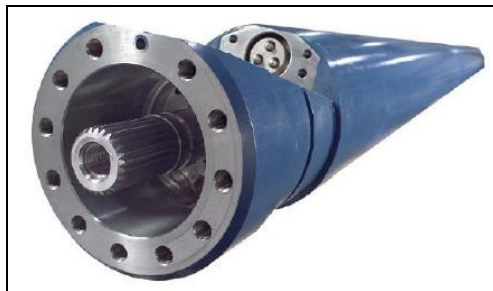


Figura 2. Motor de Indução.

O modelo do comportamento dinâmico do motor elétrico foi baseado em Ong (1998). Esse modelo baseia-se em uma transformada linear denominada  $dq0$  que permite o cálculo de torque, correlacionando tensões, correntes, fluxos de dispersão e velocidade angular instantânea. A partir dessas relações calcula-se fator de potência, potência ativa, escorregamento, correntes, eficiência e torque eletromagnético.

#### 2.1.1. Efeito Térmico

A fim de obter a temperatura do motor, o simulador tem o objetivo de prever uma possível queima do motor. Na literatura, existem várias correlações que se relacionam com geometria, regime de fluxo (laminar ou turbulento) com diversas condições de contorno. Neste trabalho, tentou-se integrar as correlações que mais se aproximaram do problema. A partir da geometria ilustrada na figura 3a, o trabalho adotou um estudo do comportamento de uma convecção forçada no interior de tubos e dutos (escoamento interno), conforme Kreith (1997).

Na convecção, o calor transmitido por unidade de tempo entre uma superfície e um fluido pode ser calculado pela relação:

$$q_c = \bar{h}_c A (T_{Superfície} - T_{Fluido})$$

Onde:  $q_c$  é o calor transmitido por unidade de tempo por convecção (Kcal/h); o  $h_c$  é o coeficiente médio de transmissão de calor por convecção (Kcal/h m<sup>2</sup> °C) e  $A$  é a área de transmissão de calor (m<sup>2</sup>).

Para tubos ou dutos curtos com distribuições de velocidade e de temperatura inicialmente uniformes, as condições de escoamento ao longo da parede do motor se aproximam daquelas ao longo de uma placa plana. O simulador considera a geometria de uma placa plana entre a parede do motor e a tubulação, como ilustra a figura 3b.

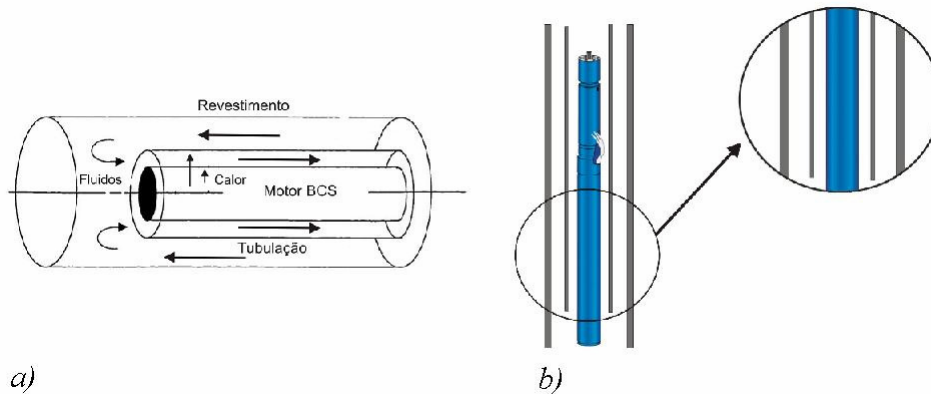


Figura 3. a) Esquema da transferência térmica do motor. b) Geometria de placas planas.

As propriedades físicas da água, óleo e gás foram baseadas em correlações empíricas conforme Brill e Mukherjee (1999).

## 2.2. BOMBA

A bomba utilizada é do tipo centrífuga com múltiplos estágios, cada estágio consistindo de um impelidor e um difusor. O impelidor, ao girar cria um campo centrífugo que é responsável pelo aumento da velocidade e pressão do fluido. Ao escoar através do difusor o fluido vai encontrar um aumento progressivo na área de escoamento que causará queda de velocidade e aumento de pressão (Teorema de Bernoulli). Cada estágio fornece um incremento de pressão ao fluido. Numa bomba são colocados tantos estágios quanto forem necessários para que os fluidos cheguem à superfície. Na figura 4 está representado um estágio da bomba e o princípio de funcionamento para vários estágios.

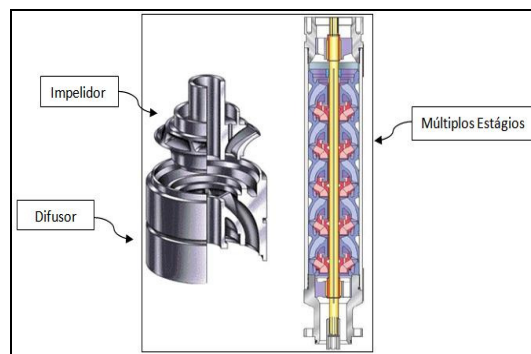
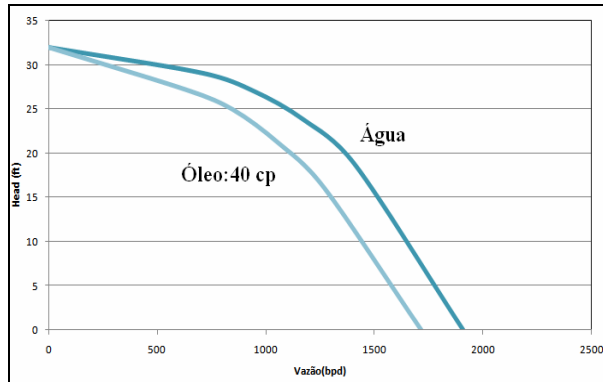


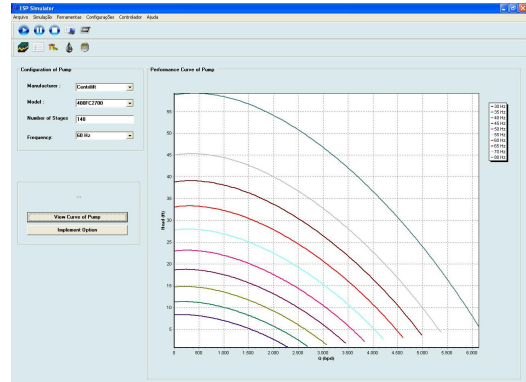
Figura 4. Representação de uma bomba centrífuga

A forma e o tamanho do impelidor e do difusor determinam a vazão a ser bombeada, número de estágios e a sua capacidade de elevação ou *head*. Os fabricantes publicam a curva característica de

cada modelo de bomba. Essas curvas são fornecidas considerando apenas um estágio e o bombeio de água, devendo sofrer correções quando aplicadas a fluidos com outros valores de viscosidade. O simulador levará em consideração a correção da curva de desempenho das bombas quando bombeando óleos viscosos. Na figura 5a, observa-se o comportamento da curva da bomba para água e com viscosidade de 40cp. Se houver escoamento bifásico no interior da bomba o efeito do gás deve ser considerado.



a)



b)

Figura 5 – a) Efeito da viscosidade na curva característica. b) Aplicação das leis de afinidade.

Uma vez que o simulador irá utilizar motores com variação de velocidade (VFD) faz necessário calcular-se as novas curvas de desempenho da bomba baseadas nas leis de afinidade para diferentes frequências de alimentação do motor elétrico. Essas leis são expressões matemáticas que definem mudanças na capacidade da bomba, carga e potência. Estas mudanças conforme Mattos (1998) são regidas pelas seguintes relações, onde se considera o subscrito 1 referenciando à condição inicial e 2 à nova condição.

1. A vazão  $Q$  é proporcional à rotação  $N$ ;
2. O *head* ( $H$ ) varia com o quadrado da rotação  $N$ ;
3. A potência absorvida ( $Pot$ ) varia com o cubo da rotação  $N$ ;

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{Pot_2}{Pot_1}}$$

Na ilustração 5b, apresenta-se um exemplo de aplicação das leis de afinidade para diversas frequências.

### 2.3. RESERVATÓRIO

Para elaboração de um simulador de elevação artificial é necessário o conhecimento preciso dos fatores que determinam a vazão através do meio poroso até o poço. As curvas de pressão disponível em um reservatório, denominadas curvas de IPR (Inflow Performance Relationship). Elas representam a relação que existe entre a pressão de fluxo no fundo do poço e a vazão. O modelo de Vogel para IPR é dado por:

$$\frac{q_o}{q_{max}} = 1 - 0,2 \frac{P_{wf}}{P_e} - 0,8 \left( \frac{P_{wf}}{P_e} \right)^2$$

Onde:  $P_e$  é a pressão estática (kgf/cm<sup>2</sup>),  $q_{\max}$  é a vazão máxima (m<sup>3</sup>/d),  $q_o$  é a vazão (m<sup>3</sup>/d) e  $P_{wf}$  a pressão do fundo em fluxo (kgf/cm<sup>2</sup>).

### 2.4. ESCOAMENTO DE FLUIDOS

Os fluidos que escoam através de um poço de petróleo são misturas complexas de água e hidrocarbonetos. Assim, considera-se o escoamento de óleo, água e gás. Para os objetivos deste trabalho utilizou-se o cálculo do escoamento multifásico em tubulações em dois trechos: no revestimento, entre o conhoneado e a bomba; e na tubulação de produção entre a bomba e a superfície. As correlações adotadas, configuráveis pelo usuário, são aquelas empregadas largamente na indústria do petróleo, conforme descritas por Brill e Mukherjee (1999).

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1. INTERFACE

A tela principal do simulador está representada na figura 8, de maneira que, à esquerda observa-se a animação tridimensional do conjunto BCS, assim como, cada componente (motor, bomba, selo, protetor). No lado direito da tela, apresenta-se as curvas da bomba (head, potência e eficiência), curvas pertinentes ao motor (rotação, torque, corrente, tensão) e as curvas do comportamento dinâmico de todo o processo (nível dinâmico, submergência, diferença de pressão, etc.).

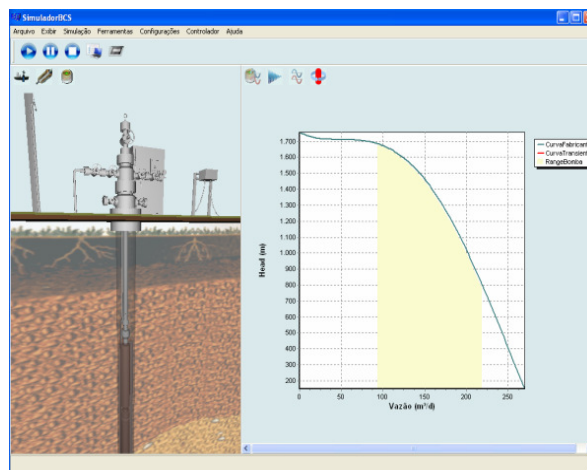


Figura 6. Tela principal do simulador – curva da bomba.

Desta forma, dividiu-se a configuração do simulador em:

- Propriedades dos fluidos: Grau API, RGO, gravidades específicas dos fluidos e etc;
- Esquema mecânico: profundidade da bomba, profundidade do conhoneado, ângulo do poço, rugosidade da tubulação, diâmetro da coluna de produção e do revestimento;
- Correlações de fluxo multifásico;
- Reservatório: pressão estática, pressão e vazão de teste;
- Configuração da bomba: opções de escolha de fabricante e modelos de bombas centrífugas.

3.2. SIMULAÇÃO DE UM CASO

Na aplicação de um caso, escolheu-se o modelo da bomba conforme ilustra a figura 7a, o número de estágios com frequência de 60 Hz.

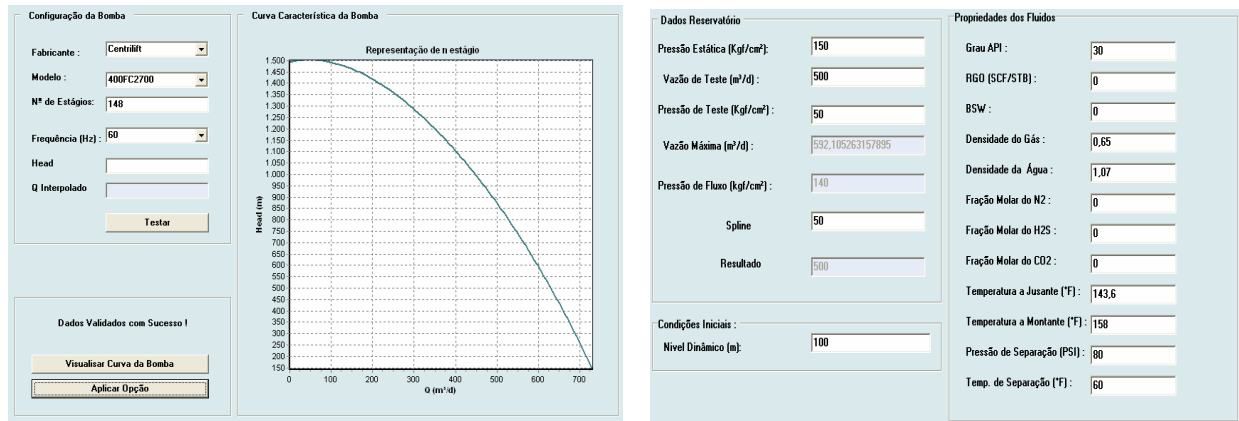


Figura 7. a) Configuração da bomba. b) Telas de configuração do reservatório e propriedades dos fluidos.

A figura 7b ilustra os dados de entrada para as propriedades dos fluidos e reservatório. A configuração do esquema mecânico com valores de revestimento, coluna de produção, profundidades da bomba e poço estão ilustrados na figura 8.

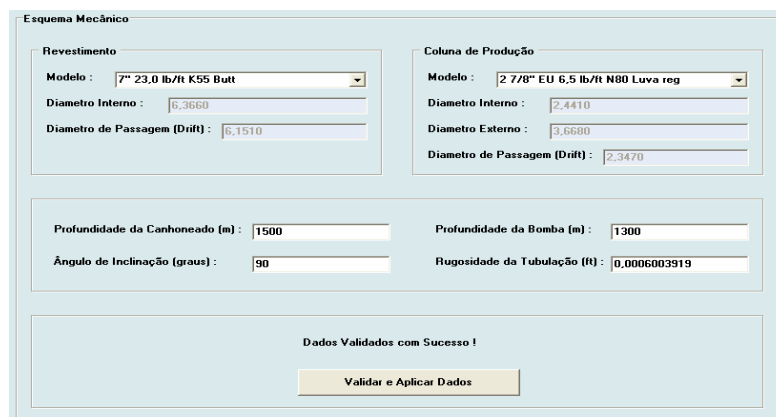


Figura 8. Tela de configuração do esquema mecânico do poço

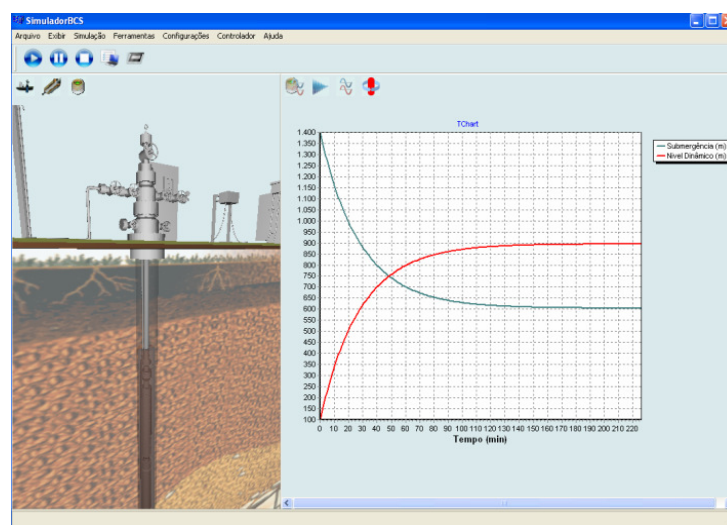


Figura 9. Tela principal do simulador – curva de desempenho do poço

No gráfico da figura 9, são representados o comportamentos do nível dinâmico do poço (m) e da submersão (m) em função do tempo (min) até o sistema entrar em equilíbrio (regime permanente). Nota-se que o sistema apresenta equilíbrio por volta de 905 m com vazão em regime permanente de 491, 4 m<sup>3</sup>/d. O simulador permite o ajuste da frequência de alimentação para 70Hz que vai corresponder a uma vazão de 564,2 m<sup>3</sup>/d e nível dinâmico de 1240m.

### 4. Conclusões

É viável o desenvolvimento de um simulador computacional transiente para o sistema BCS, a partir da integração dos modelos disponíveis na literatura para o comportamento do reservatório, da bomba, do escoamento dos fluidos e do motor elétrico. A ferramenta computacional apresentada neste artigo permite a previsão de parâmetros operacionais do sistema BCS. A operação do sistema de uma forma mais racional podendo contribuir para o aumento da produção de óleo e da vida útil do equipamento, reduzindo custos de intervenção e lucros cessantes. O simulador também será útil para treinamento de operadores, contribuindo para o aumento da eficiência da indústria de produção de petróleo.

### Agradecimentos

A Petrobrás, pelo financiamento e precioso apoio ao desenvolvimento do projeto Autopoc.

Ao PRH-ANP 14 / FINEP pela concessão de bolsas de iniciação científica a alguns alunos durante o desenvolvimento do projeto.

Ao Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT/DCA/UFRN) por nos conceder o privilégio de usufruir de sua excelente infra-estrutura no desenvolvimento dos projetos de pesquisa.

A todos que compõe o Grupo de Automação em Petróleo da UFRN.

### Referências Bibliográficas

MATTOS, EDSON EZEQUIEL, F.,REINALDO. Bombas Industriais. 2º Ed- Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

ONG, CHEE-MUN. Dynamic Simulation of Eletric Machinery, 1a edição, p.122-243, 1998.

J.P. BRILL, H. MUKEHERJEE, *Multiphase Flow in Wells*. Vol. 17, Texas, 1999.

KREITH, FRANK. Princípios de Transmissão de Calor, 3º edição - São Paulo: 1997.

James P. Brill, Hemanta Mukherjee (1999), *Multiphase flow in wells*, Monographia - University of Tulsa / Society of Petroleum Engineers.