

## DIMENSIONAMENTO DO BOMBEIO MECÂNICO COM HASTES EM EXCEL®

S. S. D. FORTE\*, L. C. L. SANTOS, G. SIMONELLI

Universidade Federal da Bahia  
suelemdf@gmail.com\*

Submetido 20/05/2016 - Aceito 21/10/2017

DOI: 10.15628/holos.2017.4612

### RESUMO

Os métodos de elevação artificial são utilizados quando a energia oriunda do reservatório não é suficiente para elevar os fluidos à superfície. A elevação artificial proporciona energia ao fluido presente no fundo do poço, através da implementação de diversos equipamentos. Entre os métodos de elevação, o bombeio mecânico é o mais utilizado em poços *onshore*. Nesse método, o movimento rotativo de um motor situado na superfície é transformado em movimento alternativo da coluna de hastes. Para implementar o bombeio mecânico em um poço de petróleo é fundamental a realização do dimensionamento. O dimensionamento é responsável por determinar os

parâmetros operacionais, e colaborar na seleção dos equipamentos de superfície e de subsuperfície. Neste trabalho foi apresentado o procedimento do cálculo necessário para o dimensionamento da unidade de bombeio. Nos cálculos foram utilizadas as equações do método convencional de projeto. O método apresenta equações simples e é aplicável a poços rasos ou com profundidade média (até 2500 m). Este trabalho resultou na elaboração de uma planilha eletrônica em Excel® que, utilizando as equações contidas na literatura, calcula de forma rápida e prática as variáveis requeridas para o dimensionamento da unidade de bombeio.

**PALAVRAS-CHAVE:** Produção de óleo, Elevação artificial, Bombeio mecânico, Dimensionamento.

## DESIGN OF SUCKER ROD PUMP USING EXCEL®

### ABSTRACT

The artificial lift methods are used when the energy from the reservoir is insufficient to lift the fluids to the surface. The artificial lift provides energy to the fluid present in the downhole formation, through the implementation of various equipment. Among the lifting methods, the sucker rod pump is the most widely used in onshore wells. In this method, the rotational movement of a motor located at the surface is converted into reciprocating motion of the rod string. To implement the mechanical pump in an oil well, it is essential to perform the scaling. The design is responsible to determine operating parameters, and to

collaborate in the selection of surface and subsurface equipment. This work presents the calculation procedure necessary for the design of a pumping unit. The equations of a conventional design method were used for the calculations. This method has simple equations and it is applicable to shallow or medium wells depth. This work resulted in the preparation of a spreadsheet in Excel® that using the equations contained in the literature, it was able to quickly calculate in a practice way the variables required to design a pumping unit.

**KEYWORDS:** Petroleum production, Artificial lift, Sucker rod pump, Design.

## 1 INTRODUÇÃO

A extração do petróleo, encontrado em terra ou em mar, pode ser realizada de duas formas: elevação natural ou elevação artificial. A elevação natural ocorre quando a pressão do reservatório garante a condição de surgência do poço, enviando os fluidos armazenados até a superfície, isso acontece no início da vida produtiva de um poço, onde a pressão do reservatório é suficiente para garantir seu escoamento sem necessidade de utilizar equipamentos auxiliares para elevação do mesmo. Nesse contexto a pressão do reservatório é fator determinante. Porém, é fundamental que a seleção dos equipamentos requeridos para o escoamento dos fluidos seja feita adequadamente. Quando a energia advinda do reservatório não é suficiente para elevar os fluidos à superfície, utiliza-se a elevação artificial. A elevação artificial fornece energia ao fluido contido no fundo do poço por meio de diversos equipamentos, para que assim o petróleo possa ser produzido.

Os métodos artificiais de elevação mais utilizados são: bombeio mecânico com hastes (BM); bombeio centrífugo submerso (BCS); bombeio por cavidades progressivas (BCP); e *gas-lift* contínuo ou intermitente (GLC ou GLI).

Para determinar qual método tem melhor aplicabilidade em determinado poço, deve-se analisar a localização do poço (*onshore ou offshore*), profundidade, quantidade de gás, vazão, segurança, entre outros fatores.

O bombeio mecânico com hastes (BM) é o método mais antigo utilizado na produção de petróleo em poços terrestres. É também o método mais empregado nos dias atuais, devido ao baixo valor de investimento inicial, manutenção simples, e capacidade de elevar baixas a médias vazões de óleo. O funcionamento do bombeio mecânico consiste em transformar o movimento rotativo de um motor situado na superfície, em um movimento alternativo da coluna de hastes. A coluna de hastes transmite o movimento ao fundo do poço, acionando a bomba de fundo, e consequentemente realizando a elevação dos fluidos (THOMAS, 2001).

É de suma importância, que antes da implementação do bombeio mecânico em um poço de petróleo, seja realizado de forma correta o seu dimensionamento. O dimensionamento permite selecionar os equipamentos de superfície e de subsuperfície, bem como, determinar os parâmetros operacionais. Segundo Freitas (2010), o dimensionamento visa maximizar a produção, minimizando os custos de instalação e manutenção.

Durante o levantamento bibliográfico para realização desse trabalho, pôde-se observar que vários pesquisadores desenvolveram trabalhos utilizando softwares computacionais visando otimizar a produção de petróleo.

Diante desse contexto, esse trabalho teve como objetivo desenvolver uma planilha eletrônica capaz de realizar o dimensionamento do sistema de bombeio mecânico. O usuário deverá fornecer os dados de entrada e o sistema calculará a vazão de líquido produzida, a velocidade de bombeio, a potência requerida pelo motor principal entre outros dados necessários para funcionamento do bombeio mecânico.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura é possível encontrar métodos de dimensionamento de bombeio mecânico que foram desenvolvidos a fim de encontrar os parâmetros requeridos para o sistema.

O primeiro método admite que a coluna de hastes é uma massa concentrada em um sistema massa - mola. Logo, o sistema pode ser descrito como um movimento harmônico simples. Esse método apresentou bons resultados quando aplicados em poços rasos e com cargas menores de fluido bombeado. Entretanto, não deve ser aplicado a poços profundos, pois não contabiliza o comportamento elástico das hastes (FREITAS, 2010). Esse método é comumente denominado de método convencional (GUO, LYONS e GHALAMBOR, 2007).

Devido às limitações do método convencional de dimensionamento, o *American Petroleum Institute* (API) desenvolveu uma norma regulamentadora para projetos de dimensionamento. A norma API RP 11L descreveu o movimento alternativo das hastes em função do tempo e da velocidade de propagação do som nas hastes podendo ser aplicada em poços profundos, visto que contabiliza o comportamento elástico da coluna de hastes. Apesar, de apresentar uma abordagem matemática mais abrangente do que o método convencional, a norma possui alguns limitantes, pois só pode ser utilizada para unidades de bombeio convencionais (FREITAS, 2010).

A utilização da norma API RP 11 L numa planilha eletrônica necessitaria da modelagem matemática dos gráficos. A modelagem é um processo complexo e demanda conhecimento específico da técnica de modelagem. Entretanto, o modelo convencional apresenta equações simples e não dispõe de gráficos. Desse modo, nesse trabalho será detalhado apenas o modelo convencional para cálculo do dimensionamento.

O sistema de bombeio mecânico envolve diversas áreas de conhecimento da engenharia, como por exemplo: mecânica, elétrica, automação e petróleo. Ao longo dos anos, o bombeio mecânico se tornou objeto de pesquisa de muitos pesquisadores, em diversas áreas de conhecimento. Isso ocorre devido à sua ampla utilização, inclusive nos dias atuais, e também pela necessidade de otimizar cada vez mais o processo de produção.

Nascimento (2005) desenvolveu um simulador computacional aplicável a poços de petróleo com bombeio mecânico, fundamentado no comportamento dinâmico da coluna de hastes do bombeio mecânico. O mesmo permite que o usuário possa visualizar diversas situações operacionais similares as que ocorrem num campo de produção. O simulador conta ainda com módulos de falhas, animações em 3D e emulação dos principais sensores encontrados em campo. A utilização do simulador permite que o usuário possa analisar poços, realizar testes em controladores, validar algoritmos de controle, entre outros (NASCIMENTO, 2005).

Gomes (2009) propôs utilizar a inteligência artificial para analisar e reconhecer as cartas dinamométricas, e em seguida classifica-las. A classificação das cartas dinamométricas é uma atividade complexa, pois para cada condição de funcionamento é apresentado um tipo de carta dinamométrica. Nesse sentido, Gomes (2009) desenvolveu um sistema inteligente para analisar as cartas dinamométricas de forma rápida e eficiente. O sistema foi fundamentado nas redes neurais artificiais utilizando os padrões de cartas pré-estabelecidas. O sistema pode ser integrado a um sistema supervisório, colaborando para uma supervisão mais eficiente (GOMES, 2009).

Freitas (2010) constatou que é de suma importância que o dimensionamento do bombeio mecânico esteja correto, pois um dimensionamento incorreto implicará diretamente na produção de petróleo. O dimensionamento determina quais os equipamentos de superfície e de fundo serão instalados no poço, o modo de operação dos equipamentos e calcula as variáveis operacionais relativos ao funcionamento dos equipamentos, como por exemplo, o torque máximo que pode ser aplicado no sistema. O dimensionamento é uma tarefa longa e complexa, pois visa maximizar a produção, minimizar os custos de equipamentos e intervenções no poço. Devido à necessidade da otimização no dimensionamento, foi desenvolvido por Freitas (2010), um sistema especialista fuzzy para dimensionamento de bombeio mecânico. O sistema cria configurações de bombeio a partir dos dados implementados pelo usuário. Além disso, especifica qual o equipamento que deve ser implementado no poço (FREITAS, 2010).

Ainda nesse contexto, Lins (2010) verificou que a realização de uma simulação permitiria prever o comportamento e avaliar as configurações do sistema, minimizando assim os riscos e os custos operacionais referentes ao bombeio mecânico. Com essas justificativas, Lins (2010) desenvolveu uma modelagem e simulação de um sistema de bombeio mecânico para poços direcionais. O sistema considerou a geometria do poço, o escoamento do fluido na coluna de produção, o comportamento da coluna de hastes e um modelo para motor de indução (LINS, 2010).

Sousa (2010) constatou que os aplicativos em dispositivos móveis estão cada vez mais sendo implementados no ambiente empresarial, visto que permite o acesso remoto aos sistemas e também agiliza as tarefas. Em um campo de produção de petróleo, a configuração dos equipamentos é determinada usando sistemas computacionais em plataformas *desktop*. Em seguida, um funcionário deve ir ao equipamento e executar as configurações que foram determinadas no sistema computacional. Este processo demanda tempo e não garante que a manutenção seja feita em tempo hábil. Nesse contexto, Sousa (2010) desenvolveu um sistema de dimensionamento de bombeio mecânico (BMMobile) a ser implementado em dispositivos móveis. O software permite que o funcionário possa implementar alterações no bombeio mecânico sem que precise se deslocar até o poço (SOUSA, 2010).

Paula (2012) utilizou as medidas de tensão no barramento DC oriundo dos inversores de frequência a fim de realizar o equilíbrio das forças que atuam no sistema. O balanceamento das unidades de bombeio (UB) é geralmente feito a partir das cartas dinamométricas de superfície com o objetivo de obter o torque ou inferir a potência solicitada pelo motor. Para balancear a unidade é necessário também conhecer a geometria da UB, o desbalanceamento estrutural da UB e a análise de um especialista em elevação artificial. Esses parâmetros tornam-se um limitante dependendo da fase do projeto, pois com o passar do tempo as condições operacionais se alteram. Diante desse contexto, foi desenvolvido por Paula (2012), um método para monitorar e controlar o balanceamento da unidade de bombeio usando inversor de frequência e o fator de carga cíclica. Neste método de balanceamento da UB não há a necessidade do conhecimento das características do bombeio mecânico, pois é utilizado o valor mínimo de fator de carga cíclica para controlar o torque solicitado pelo BM (PAULA, 2012).

Lima (2014) verificou que a classificação das cartas dinamométrica, deve ser realizada de forma ágil, evitando assim possíveis danos ao poço e aumentando a produção de petróleo. Há uma grande quantidade de poços equipados com bombeio mecânico, e muitas vezes somente

um engenheiro é designado em ser o responsável por analisar e interpretar as cartas, podendo ocorrer erros na sua interpretação. A interpretação das cartas dinamométricas corretamente é de suma importância na produção, visto que permite detectar os problemas do fundo do poço. Nesse sentido, Lima (2014) desenvolveu um modelo para detectar e classificar os modos de operação do bombeio mecânico via cartas dinamométricas. Esse modelo visou propor e analisar o desempenho de técnicas de reconhecimento padrões não paramétricas, utilizando descritores de forma e ferramenta estatísticas, auxiliando assim a manutenção preditiva do sistema (LIMA, 2014).

Diante do exposto, verificou-se que em todos os trabalhos apresentados, foram utilizados softwares computacionais. Os softwares computacionais desenvolvidos tiveram como objetivo agilizar as atividades necessárias para a produção de petróleo. Nota-se ainda que, para utilização de alguns softwares é necessário ter um conhecimento mais aprofundado em determinada área. Nesse sentido, a utilização de um novo software computacional que fosse de fácil acesso e coeso, seria uma contribuição para o estudo técnico do bombeio mecânico operacional.

### 3 METODOLOGIA

“A predição exata das condições operacionais do sistema de bombeio mecânico tem importância vital para o projeto de novas instalações e também na análise e otimização de instalações existentes” (TAKÁCS, 2003, p. 147).

De acordo com Takács (2003), a maioria dos parâmetros operacionais necessários para realização do projeto ou análise são oriundos dos seguintes parâmetros:

- As cargas atuantes na haste polida durante o bombeio;
- O curso do pistão da bomba de fundo;
- O torque no eixo do redutor.

O cálculo desses parâmetros é feito a partir dos dados do sistema de bombeio mecânico e do poço. Logo, para dar início ao projeto de dimensionamento de bombeio mecânico é necessário que se tenha as seguintes informações: dados do fluido que será produzido, como por exemplo, o grau API do fluido, gravidade específica do fluido e fator volume formação do óleo; características do poço e tipo da unidade de bombeio utilizada (FREITAS, 2010).

Inicialmente deve-se calcular algumas variáveis importantes. A primeira é o comprimento da haste polida ( $S$ ), e é descrita pela Equação 1.

$$S = \frac{2cd_2}{d_1} \text{ (in)} \quad (1)$$

No qual,  $d_1$  e  $d_2$  são as dimensões da viga e  $c$  comprimento da manivela. A unidade destas variáveis também deve ser polegadas. As dimensões da viga variam de acordo com o tipo de unidade de bombeio, como pode ser observado na Figura 1.

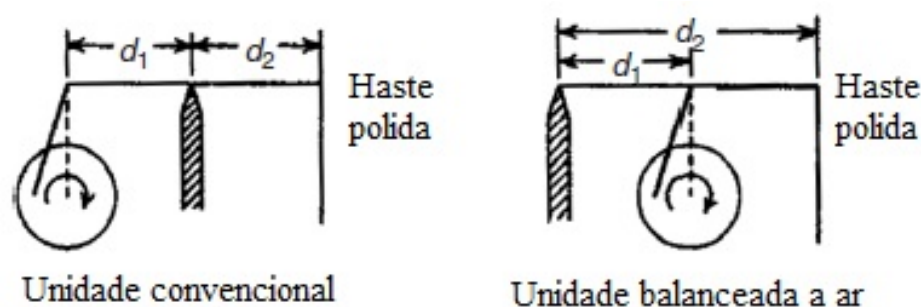


Figura 1: Posições das dimensões da viga.

Fonte: adaptado de Guo, Lyons e Ghalambor (2007, p. 165)

A área ocupada pelo pistão é descrita pela Equação 2:

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \text{ (in}^2\text{)} \quad (2)$$

sendo  $d_p$  o diâmetro do pistão, em polegadas.

A área transversal das hastes de bombeio é dada pela Equação 3:

$$A_r = \frac{\pi d_r^2}{4} \text{ (in}^2\text{)} \quad (3)$$

onde  $d_r$  é o diâmetro da seção da haste, em polegadas.

A Equação 4 determina o peso da coluna de hastes no ar.

$$W_r = \frac{\gamma_s D A_r}{144} \text{ (lbf)} \quad (4)$$

sendo  $\gamma_s$  peso específico do aço (490 lbf/ft<sup>3</sup>) e  $D$  profundidade de assentamento da bomba (ft).

A Equação 5 apresenta o peso efetivo do fluido sobre o pistão.

$$W_f = 62,4 S_f \frac{D A_p}{144} \text{ (lbf)} \quad (5)$$

onde  $S_f$  é a densidade relativa do fluido.

As variáveis mais importantes no projeto de dimensionamento de bombeio mecânico são: carga máxima na haste polida ( $PRL_{\max}$ ), carga mínima na haste polida ( $PRL_{\min}$ ), contrabalanceio (C) e o torque máximo no redutor (T).

A carga máxima na haste polida ( $PRL_{\max}$ ) é o somatório das seguintes forças atuantes: peso do fluido produzido, peso do pistão, peso da haste polida, carga dinâmica devido a

aceleração, força de atrito e da força de empuxo do pistão. Assume-se que a válvula de passeio está fechada, para que assim a aceleração esteja em seu valor máximo (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007).

A carga máxima na haste polida ( $PRL_{max}$ ) é expressa pela Equação 6.

$$PRL_{max} = W_f - 62,4 S_f \frac{W_r}{\gamma_s} + W_r + W_r F_1 \quad (\text{lbf}) \quad (6)$$

onde:

$F_1 = \frac{(1 \pm \frac{c}{h}) S N^2}{70471,2}$ , sendo  $h$  o comprimento da biela,  $c$  comprimento da manivela,  $S$  o comprimento da haste polida e  $N$  o número de ciclos por minuto. Se a unidade for do tipo convencional utiliza-se o sinal positivo, e se a unidade for balanceada a ar devemos utilizar o sinal negativo da equação.

“A carga mínima na haste polida ( $PRL_{min}$ ) ocorre quando a válvula de passeio é aberta para que o peso da coluna de fluido seja transportado pelo tubo e não pelas hastes” (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007, p. 168, traduzido pelos autores).

A carga mínima na haste polida ( $PRL_{min}$ ) é obtida pela Equação 7.

$$PRL_{min} = - 62,4 S_f \frac{W_r}{\gamma_s} + W_r - W_r F_2 \quad (\text{lbf}) \quad (7)$$

onde  $F_2 = \frac{(1 \mp \frac{c}{h}) S N^2}{70471,2}$ .

A utilização do contrapeso é fundamental para reduzir a energia solicitada pelo motor do bombeio mecânico. O efeito do contrapeso na unidade de bombeio é denominado contrabalanceio (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007; PAULA, 2012).

O valor do contrabalanceio ( $C$ ) ideal é dado pela média das PRL, e é definido pela Equação 8.

$$C = \frac{1}{2} (PRL_{max} + PRL_{min}) \quad (\text{lb}) \quad (8)$$

Para o cálculo do torque máximo deve-se admitir a pior situação de operação, a qual ocorre quando a carga é máxima e o comprimento da manivela está em valor máximo (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007).

O torque máximo é dado pela Equação 9.

$$T = \frac{1}{4} S (W_f + \frac{2 S N^2 W_r}{70471,2}) \quad (\text{lbf.in}) \quad (9)$$

A velocidade da bomba é dada pela Equação 10.

$$N_{limit} = \sqrt{\frac{70471,2 L}{S (1 \mp \frac{c}{h})}} \quad (\text{cpm}) \quad (10)$$

se a unidade for do tipo convencional utiliza-se o sinal negativo, e se a unidade for balanceada a ar deve-se utilizar o sinal positivo da equação.

O curso do pistão é dado pela Equação 11:

$$S_p = S - \frac{12D}{E} \left[ W_f \left( \frac{1}{A_r} + \frac{1}{A_t} \right) - \frac{SN^2 MW_r}{70471,2 A_r} \right] \quad (\text{in}) \quad (11)$$

sendo  $E = 30 * 10^6 \text{ lbf/m}^2$ .

A vazão de líquido produzida é obtida através da Equação 12.

$$q = 0,1484 \frac{A_p N S_p E_v}{B_o} \quad (\text{stb/dia}) \quad (12)$$

onde  $E_v$  é a eficiência volumétrica da bomba e  $B_o$  o fator volume formação do óleo (bbl/stb).

O motor principal deve ser dimensionado corretamente a fim de fornecer a potência necessária para elevar os fluidos produzidos bem como superar as perdas por atrito da bomba, da coluna de hastes, da haste polida e da unidade de bombeio (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007).

A potência necessária para elevar os fluidos à superfície é expressa pela Equação 13.

$$P_h = 7,36 * 10^{-6} q \gamma_l L_N \quad (\text{hp}) \quad (13)$$

onde  $\gamma_l$  é a gravidade específica do líquido e  $L_N = H + \frac{p_{tf}}{0,433 \gamma_l}$ , no qual  $H$  é a profundidade média do fluido no anular, dada em ft e  $p_{tf}$  a pressão de fluxo na cabeça da coluna de produção, dada em psig.

De acordo com Guo, Lyons e Ghalambor (2007) a potência necessária para superar as perdas por atrito pode ser estimada pela Equação 14.

$$P_f = 6,31 * 10^{-7} W_r SN \quad (\text{hp}) \quad (14)$$

A potência requerida pelo motor principal é dada pela Equação 15.

$$P_{pm} = F_s (P_h + P_f) \quad (\text{hp}) \quad (15)$$

sendo  $F_s$  é o fator de segurança (1,25 – 1,50).

A quantidade significativa de variáveis e de equações (1 a 15) necessárias para o dimensionamento do bombeio mecânico pode resultar em possíveis erros durante a execução dos cálculos, além de demandar um tempo considerável para sua realização. A fim de tornar o processo de dimensionamento mais rápido e mais preciso foi desenvolvida uma planilha eletrônica contendo todas as equações requeridas para o dimensionamento. A planilha foi desenvolvida no software *Microsoft Office Excel®* 2013, permitindo que os cálculos sejam



realizados de forma simples e rápida, necessitando apenas que usuário forneça os parâmetros de entrada.

### 3.1 Aplicação

Com o objetivo de demonstrar o uso da planilha que foi elaborada, selecionou-se do livro de Guo, Lyons e Ghalambor (2007) um caso que retrata um poço produzindo por meio do bombeio mecânico convencional. Sabe-se que:

$$\begin{aligned}d_1 &= 96,05 \text{ in} \\d_2 &= 111 \text{ in} \\c/h &= 0,33 \\d_p &= 2 \frac{1}{2} \text{ in} \\D &= 4000 \text{ ft} \\H &= 4000 \text{ ft} \\p_{tf} &= 100 \text{ psig} \\E_v &= 0,8 \\F_s &= 1,35 \\B_o &= 1,2 \text{ bbl/stb}\end{aligned}$$

A coluna de produção tem 3 in (3,5 in (diâmetro externo) e 2,995 in (diâmetro interno)) em um poço que não é ancorado. O diâmetro da seção da haste polida é 0,75 in, com comprimento de 4000 ft. A densidade do óleo bruto é 25° API. Logo, deve-se calcular a vazão de fluido produzido esperada, e a força requerida pelo motor primário.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inserindo as Equações 1 a 15 em uma planilha eletrônica, foi possível desenvolver um simulador que tem a finalidade de dimensionar de forma rápida e prática o sistema de bombeio mecânico com hastes.

A planilha foi elaborada de modo a permitir um fácil entendimento ao usuário, tanto nas variáveis solicitadas quanto nas variações obtidas. As variáveis de entrada são solicitadas de uma única vez, cabendo ao usuário a opção de preencher somente as células necessárias para obter o resultado requerido. Vale ressaltar que as variáveis inseridas encontram-se no sistema americano de unidades.

A Figura 2 apresenta a planilha desenvolvida devidamente preenchida com os dados do caso escolhido para estudo de caso.

## Dimensionamento do sistema de bombeio mecânico

Objetivo: realizar o dimensionamento do sistema de bombeio mecânico de forma rápida e eficaz.  
O usuário deve inserir os dados no sistema americano.

## Dados de entrada

Comprimento da manivela ( c )	37,000 in
Dimensão da viga 1 ( d <sub>1</sub> )	96,050 in
Dimensão da viga 2 ( d <sub>2</sub> )	111,000 in
Diâmetro do pistão (d <sub>p</sub> )	2,500 in
Seção haste 1 , diâmetro (dr1)	in
comprimento(L1)	ft
Seção haste 2, diâmetro (dr2)	in
comprimento(L2)	ft
Seção haste 3, diâmetro (dr3)	0,750 in
comprimento (L3)	4000,000 ft
Seção haste 4, diâmetro (dr4)	in
comprimento(L4)	ft
Comprimento da coluna (D)	4000,000 ft
Gravidade específica do fluido (S <sub>f</sub> )	0,904
Comprimento da biela (h)	112,120 ft
Quantidade de ciclos por minuto (N)	cpm
Tipo da unidade de bombeio ( 1 = convencional ; -1 balanceada a ar )	1,000
Fator de aceleração máxima admissível (L)	0,400
Eficiência volumétrica da bomba (E <sub>v</sub> )	0,800
Fator volume formação do óleo (B <sub>o</sub> )	1,200 bbl/stb
Diâmetro interno do tubo (d <sub>ti</sub> )	2,995 in
Diâmetro externo do tubo (d <sub>to</sub> )	3,500 in
Profundidade do líquido do anular (H)	4000,000 ft
Pressão na cabeça da tubulação (ptf)	100,000 psia
Gravidade específica do líquido	0,904
Fator de segurança (Fs)	1,350

Figura 2: Tela da planilha com os dados do estudo de caso.

É possível observar ainda, que na Figura 2 algumas células não foram preenchidas. Essas células referem-se aos diâmetros e comprimentos de cada haste da coluna de hastes. Usualmente são utilizadas em campo quatro colunas de hastes, com diferentes comprimentos e com diâmetro sendo reduzido conforme a profundidade de utilização. Entretanto, no estudo de caso os autores admitiram que só havia uma haste sendo empregada no bombeio mecânico.

Alguns dados utilizados foram obtidos devido a padronização existente devidos as características do óleo. Como por exemplo, a densidade do fluido (0,9042) está relacionada ao grau API do óleo (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007).

Após a implementação dos dados de entrada, o simulador calcula automaticamente os resultados das equações (1 a 15), conforme verifica-se na Figura 3.

1 ETAPA		
Comprimento da haste polida	$S = 2c \frac{d_2}{d_1}$	85,518 in
Área ocupada pelo pistão	$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4}$	4,906 in <sup>2</sup>
Área da seção da haste	$A_r = \frac{\pi d_r^2}{4}$	0,442 in <sup>2</sup>
Área total	$A_t = \frac{\pi d_t^2}{4}$	2,576 in <sup>2</sup>
Peso das hastes no ar	$W_r = \frac{\gamma_r D A_r}{144}$	6010,156 lbs
Quantidade de fluido carregada	$W_f = S_f (62.4) \frac{D A_p}{144}$	7689,468 lbs
2 ETAPA		
Carga máxima na haste polida	$PRL_{max} = W_r - S_f (62.4) \frac{W_r}{\gamma_f} + W_r + W_r F_1$	17779,853 lbs
Carga mínima na haste polida	$PRL_{min} = -S_f (62.4) \frac{W_r}{\gamma_f} + W_r - W_r F_2$	2914,042 lbs
Contrapeso	$C = \frac{1}{2} (PRL_{max} + PRL_{min})$	10346,948 lbs
Torque máximo	$T = \frac{1}{4} S \left( W_r + \frac{2SN^2 W_r}{704712} \right)$	317823,470 in.lbs
3 ETAPA		
Limite de velocidade	$N = \sqrt{\frac{70471.2L}{S(1-\frac{1}{4})}}$	22,180 cpm
Curso do pistão	$S_p = S - \frac{12D}{E} \left[ W_r \left( \frac{1}{A_r} + \frac{1}{A_t} \right) - \frac{SN^2 M}{70471.2} \frac{W_r}{A_r} \right]$	70,172 in
Vazão da bomba	$q = 0.1484 \frac{A_p N S_p E_v}{B_p}$	755,483 stb/dia
Net lift	$L_N = H + \frac{P_f}{0.433 \gamma_f}$	4255,467 ft
Potência necessária devido as perdas por atrito	$P_f = 6.31 \times 10^{-7} W_r SN$	7,194 hp
Potência hidráulica	$P_h = 7.36 \times 10^{-6} q \gamma_f L_N$	21,391 hp
Potência necessária para o motor principal	$P_{pm} = F_s (P_h + P_f)$	38,589 hp

Figura 3: Tela de soluções do simulador.

Conforme observado na Figura 3, na primeira etapa foram calculadas as variáveis básicas do dimensionamento, necessárias para cálculo das variáveis das etapas seguintes. O comprimento da haste polida (85,518 in), a área ocupada pelo pistão (4,906 in<sup>2</sup>) e a área da seção

da haste ( $0,442 \text{ in}^2$ ) apresentaram resultados idênticos aos obtidos por Guo, Lyons e Ghalambor (2007).

O peso das hastes no ar encontrado foi de 6010,156 lbf e o peso do fluido carregado obtido pela planilha foi de 7689,468 lbf, enquanto que o valor encontrado por Guo, Lyons e Ghalambor (2007) foram respectivamente 6013,219 lbf e 7692,989 lbf.

Na segunda etapa das soluções, calculou-se a carga máxima na haste polida (17779,853 lbf), carga mínima na haste polida (2914,042 lbf), contrabalanceio (10346,948 lbf) e o torque máximo de operação (317823,470 lbf.in). Guo, Lyons e Ghalambor (2007) encontraram os seguintes valores: carga máxima na haste polida 17788,514 lbf, carga mínima na haste polida 2915,562 lbf, contrapeso 10352,038 lbf e para o torque máximo 317976,116 in.lbf.

Na terceira etapa obtiveram-se as soluções das variáveis relacionadas ao motor e a bomba. O curso do pistão (70,170 in), vazão da bomba (755,836 stb/d) e *net lift* (4255,429 ft) encontrados por Guo, Lyons e Ghalambor (2007) possuem os valores próximos ao solucionado pelo simulador. Do mesmo modo, a potência necessária devido às perdas por atrito obtido pelo simulador e por Guo, Lyons e Ghalambor (2007) apresentaram resultados idênticos.

Os resultados obtidos pela planilha eletrônica e os encontrados por Guo, Lyons e Ghalambor (2007) possuem a mesma ordem de grandeza. Assim, a comparação entre os dois resultados torna-se mais precisa.

A utilização de softwares na engenharia de petróleo permite que os problemas possam ser solucionados o mais breve possível. Os softwares são utilizados em diversos ramos da engenharia de petróleo, como por exemplo, na área de projetos, gestão de informações, supervisão de poços, entre outros. O dimensionamento de sistema de bombeio mecânico quando realizado por meio de software é mais rápido e mostra-se mais preciso do que se realizando manualmente. Uma vez que o desenvolvimento de todos os cálculos manuais necessita de tempo considerável, podendo resultar em alguma falha por desatenção.

Nesse sentido, observou-se algumas vantagens na utilização da planilha eletrônica: solução rápida das variáveis do dimensionamento; utilização de programa acessível (Excel®) e acesso gratuito a planilha.

O *download* gratuito da planilha pode ser realizado em [https://docs.google.com/spreadsheets/d/1\\_Me6haehUsu4AZOoODC\\_yYhU2FSmhFs5Lb8sH5evMk/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1_Me6haehUsu4AZOoODC_yYhU2FSmhFs5Lb8sH5evMk/edit?usp=sharing)

## 5 CONCLUSÃO

O dimensionamento do bombeio mecânico tem papel fundamental para implementação desse método de elevação artificial em poços de petróleo. Se houver algum erro no dimensionamento, o mesmo pode ocasionar uma seleção errada do sistema de bombeio.

A planilha eletrônica desenvolvida apresentou resultados compatíveis com um simulador existente e mostrou-se ser eficiente no dimensionamento de sistemas de unidades de bombeio mecânico para poços de até 2500 m de profundidade.

Observou-se ainda, uma precariedade de materiais sobre dimensionamento de sistemas de unidade de bombeio mecânico para poços de petróleo em língua portuguesa.

## 6 REFERÊNCIAS

- Freitas, C. H. D. (2010). *Sistema especialista fuzzy para dimensionamento de bombeio mecânico* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).
- Gomes, H. P. (2009). *Desenvolvimento de um sistema inteligente para a análise de cartas dinamométricas no método de elevação por bombeio mecânico* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).
- Guo, B.; Lyons, W. C.; & Ghalambor, A. (2007). *Petroleum Production Engineering : A Computer-Assisted Approach*, Elsevier, Oxford.
- Lima, F. S. D. (2014). *Detecção e classificação de modos de operação do bombeio mecânico via cartas dinamométricas* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).
- Lins, F. C. D. A. (2010). *Modelagem e simulação de um sistema de bombeio mecânico em poços direcionais utilizando parâmetros concentrados* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).
- Nascimento, J. M. A. D. (2005). *Simulador computacional para poços de petróleo com método de elevação artificial por bombeio mecânico* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).
- Paula, C. A. B. (2016). *Monitoramento e controle do balanceamento de unidade de bombeio mecânico usando inversor de frequência e fator de carga cíclica* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia).
- Sousa, M. A. D. (2010). *BMMobile: uma linha de produtos para dimensionamento de bombeio mecânico em dispositivos móveis* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).
- Takács, G. (2003). *Sucker-rod pumping manual*. PennWell Books.
- THOMAS, J. E. (2001). *Fundamentos da Engenharia do Petróleo*. Segunda edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência.