

## DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE BOMBEIO MECÂNICO

Stephanie Lara Correia <sup>1</sup>  
Pablo Diego Pinheiro de Souza <sup>2</sup>

### RESUMO

Com o intuito de implementar o método de bombeio mecânico em poços, uma importante etapa é o dimensionamento do sistema. Assim, esse trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de realizar os cálculos de dimensionamento e otimização da elevação de petróleo por bombeio mecânico em tempo reduzido e com pequena margem de erro, bem como possibilitar a comparação entre os resultados de várias possibilidades de projeto, selecionando aquele mais eficiente. A ferramenta trata de um sistema web que permitirá que aqueles usuários cadastrados possam realizar o dimensionamento de novos projetos, bem como otimizar aqueles sistemas que não estão operando no máximo de sua eficiência, de forma rápida e precisa.

**Palavras-chave:** Ferramenta Computacional, Elevação Artificial, Bombeio Mecânico, Dimensionamento.

### INTRODUÇÃO

Após a etapa de perfuração e completação dos poços petrolíferos, inicia-se a produção, escoando o fluido de subsuperfície até a superfície, etapa cujo consumo de energia é bastante considerável (COSTA, 2012). Caso a energia/pressão do reservatório seja insuficiente, torna-se necessário optar por um dos métodos de elevação artificial. Esses métodos também são aplicados quando a vazão do poço é inferior à sua capacidade de produção ou no final da vida produtiva do poço por surgência (THOMAS, 2001).

Dentre os principais métodos de elevação artificial, destaca-se o bombeio mecânico, que surgiu logo após o nascimento da indústria do petróleo, sendo considerado o primeiro método de elevação artificial. Estima-se que, atualmente, dos poços equipados com elevação artificial no mundo, cerca de 71% utilizam o sistema de bombeio mecânico. No Brasil, 73% dos poços produzem através dessa técnica (PETROBRAS, 2014 apud LIMA, 2014). A sua grande

---

<sup>1</sup> Graduanda do Curso de Engenharia de Petróleo, Unidade Acadêmica de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Campina Grande - PB, [stephanie.lara@estudante.ufcg.edu.br](mailto:stephanie.lara@estudante.ufcg.edu.br);

<sup>2</sup> Doutor, Professor da Unidade Acadêmica de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Campina Grande - PB, [pablo.diego@ufcg.edu.br](mailto:pablo.diego@ufcg.edu.br).

aceitação ocorre pelo fato deste método apresentar como principais vantagens: uma boa relação custo/benefício; manutenção fácil e barata; e simplicidade de operação (BEZERRA, 2015).

Para os poços que serão equipados com bombeio mecânico, uma das etapas cruciais do projeto de implementação é o dimensionamento do sistema. É nessa etapa onde serão definidos os parâmetros operacionais necessários, de acordo com as características do sistema fluido/reservatório/poço, bem como da capacidade de produção desejada. Com base nessas informações, serão selecionados os equipamentos mais adequados.

Para dimensionar um sistema de bombeio mecânico, era utilizado, anteriormente, um método convencional, onde se considera uma coluna de aceleração como uma massa concentrada em um sistema de massa-mola, logo, o sistema poderia ser descrito como um movimento harmônico simples. Esse método apresentou bons resultados quando obtidos em poços rasos e com pequenas cargas de fluido, entretanto, os resultados não eram satisfatórios quando processados em poços profundos, uma vez que não levava em consideração o comportamento elástico da coluna de hastes (FREITAS, 2010).

Atualmente, o dimensionamento de um sistema de bombeio mecânico é regulamentado pela norma internacional API 11L da American Petroleum Institute, composta por uma série de equações e tabelas, sendo, portanto, bastante complexo e demandando bastante tempo, se resolvido manualmente e, conseqüentemente, com alta probabilidade de erro. A utilização de programas que possam realizar esses cálculos reduz o tempo de execução e a probabilidade de erro, bem como possibilita comparar os resultados dentre as várias possibilidades de projeto, selecionando aquele mais eficiente.

Já aqueles poços que já estão produzindo utilizando o bombeio mecânico, é desejável realizar o seu acompanhamento operacional para determinar se o mesmo está operando no seu máximo potencial, uma vez que, com o tempo, as variáveis operacionais poderão sofrer alterações, alterando, conseqüentemente, sua eficiência.

## **METODOLOGIA**

Para o dimensionamento, de acordo com a norma API 11L, o cálculo dos parâmetros depende das características de diversos elementos envolvidos no sistema de produção do poço; do conhecimento de alguns termos e de uma série de constantes que devem ser encontradas previamente.

Inicialmente, temos que a **vazão proporcionada por uma bomba de fundo (PD)** pode ser calculada utilizando a Equação 01.

$$PD = 0,1166d^2 S_p N \quad (01)$$

Devido ao escorregamento de fluido através da folga pistão/camisa, a presença de gás livre e a má vedação das válvulas de pé e de passeio, temos que a vazão de líquido na superfície geralmente é inferior ao projetado para bomba. Assim, podemos calcular a **eficiência volumétrica ( $E_v$ )**, de acordo com a Equação 02.

$$E_v = \frac{Q_l}{PD} \quad (02)$$

A norma API leva em consideração o comportamento elástico das hastes durante sua movimentação. Forças elásticas (ou vibrações) são geradas no topo (UB) e na base da coluna de hastes (bomba de fundo) e são transmitidas através de seu comprimento, com suas interações influenciando as forças e deslocamentos ao longo da coluna. Dessa forma, para hastes de aço homogêneas, a **frequência natural ( $N_0$ )** é dada pela Equação 03.

$$N_0 = \frac{245000}{L} \quad (03)$$

Para uma coluna heterogênea, a **frequência natural ( $N'_0$ )** é sempre maior do que uma homogênea de mesmo comprimento. Para esses casos, é introduzido um **fator de frequência ( $F_c$ )**, de acordo com a Equação 04.

$$N'_0 = F_c N_0 \quad (04)$$

Dessa forma, podemos chegar às relações das Equações 05 (velocidade de bombeio de uma coluna homogênea) e 06 (velocidade de bombeio de uma coluna heterogênea).

$$\frac{N}{N_0} \quad (05)$$

$$\frac{N}{N'_0} \quad (06)$$

A partir dessas relações, chegamos na Equação 07, que será ser utilizada para determinar as velocidades de bombeio para colunas homogêneas e heterogêneas. O *fator de frequência* é tabelado, de acordo com o grau API da coluna de hastes utilizada.

$$\frac{N}{N'_0} = \frac{NL}{245000F_c} \quad (07)$$

O valor da frequência natural da coluna de hastes heterogênea é de 30 vibrações/min ou maior, enquanto a velocidade de bombeio dificilmente será maior que 20 spm. Dessa forma o valor de  $\frac{N}{N'_0}$  deve variar entre 0 e 0,6.

Para se determinar a **carga de fluido sobre o pistão ( $F_0$ )**, utiliza-se a Equação 08.

$$F_0 = 0,34Hd^2G_r \quad (08)$$

A elongação da coluna de hastes irá depender do material da qual ela é composta, de acordo com a Equação 09.

$$\frac{1}{K_r} = \sum LE_r \quad (09)$$

Com isso, determina-se a **elongação da coluna** devido à carga do fluido, utilizando a Equação 10. Esse valor representa quanto, percentualmente, a coluna irá se alongar em relação ao curso da haste polida.

$$\frac{F_0}{SK_r} \quad (10)$$

O **curso efetivo do pistão ( $S_p$ )** leva em consideração a elongação da coluna de hastes devido ao seu peso e ao peso do fluido deslocado. Para uma coluna de produção ancorada, esse

parâmetro é encontrado utilizando a Equação 11, enquanto, para uma coluna de produção não ancorada, utiliza-se a Equação 12.

$$S_p = \left[ S \left( \frac{S_p}{S} \right) \right] \quad (11)$$

$$S_p = \left[ S \left( \frac{S_p}{S} \right) \right] - \left[ F_0 \left( \frac{1}{K_t} \right) \right] \quad (12)$$

A **constante elástica da coluna de produção ( $K_t$ )** pode ser calculada a partir da Equação 13:

$$\frac{1}{K_t} = \sum L E_t \quad (13)$$

Para se determinar as **cargas máxima (PPRL)** e **mínima (MPRL)** na haste polida (lb), durante o ciclo de bombeio, primeiramente, precisa determinar o **peso da coluna de hastes no ar ( $W_r$ )** e no **fluido ( $W_{rf}$ )**, por meio das Equações 14 e 15, respectivamente. Em seguida utiliza-se as equações 16 e 17 para encontrar as cargas.

$$W_r = \sum \rho_i L_i \quad (14)$$

$$W_{rf} = W_r (1 - 0,128 G_r) \quad (15)$$

$$PPRL = W_{rf} + \left[ \left( \frac{F_1}{SK_r} \right) SK_r \right] \quad (16)$$

$$MPRL = W_{rf} - \left[ \left( \frac{F_2}{SK_r} \right) SK_r \right] \quad (17)$$

Devido a variação das cargas atuantes na coluna de hastes, essa sofre com a fadiga durante a repetição do ciclo de bombeio. Em um projeto de bombeio mecânico, estima-se uma vida em serviços de, pelo menos, 10 milhões de ciclos, e por esse motivo, devem ser conhecidas as tensões atuantes na coluna.

As **tensões mínima ( $\sigma_{min}$ )**, **máxima ( $\sigma_{max}$ )** e **admissível ( $\sigma_{adm}$ )** na coluna de hastes são calculadas, respectivamente, pelas Equações 18, 19 e 20. Para que a coluna de hastes esteja bem dimensionada quanto a fadiga, a tensão máxima deve ser menor do que a tensão admissível.

$$\sigma_{max} = \frac{PPRL}{A_r} \quad (18)$$

$$\sigma_{min} = \frac{MPRL}{A_r} \quad (19)$$

$$\sigma_{adm} = \left( \frac{T}{4} + 0,5625 \cdot \sigma_{min} \right) SF \quad (20)$$

A **potência requerida da haste polida (PRHP)**, em que HP, a ser fornecida pelo motor para movimentar a unidade de bombeio é obtida por meio da Equação 21.

$$PRHP = 2,53 * 10^{-6} \left( \frac{F_3}{SK_r} \right) SK_r SN \quad (21)$$

O **torque máximo** sobre o redutor de velocidade (em lb.pol<sup>2</sup>) assumindo que a unidade de bombeio está perfeitamente balanceada, é calculado com a Equação 22.

$$PT = \left( \frac{2T}{S^2 K_r} \right) SK_r \frac{S}{2} T_a \quad (22)$$

Após o conhecimento de todas as fórmulas, para o desenvolvimento da ferramenta computacional, foi realizado o levantamento das linguagens disponíveis e que melhor atendessem a demanda exigida, dessa forma, foram utilizadas algumas linguagens para a composição do código fonte:

- **HTML** – é uma linguagem utilizada para desenvolver *websites*.
- **PHP** – é uma linguagem de *script open source* de uso geral, geralmente utilizada para construir sites dinâmicos, extensões de integração de aplicações e agilizar no desenvolvimento de um sistema.
- **Cascading Style Sheets (CSS)** – é um mecanismo para adicionar estilo (cores, fontes, espaçamento, etc.) a um documento web.
- **JavaScript** – é uma linguagem de programação interpretada estruturada, que permite implementar funcionalidades mais complexas em páginas web.

Juntamente com as linguagens HTML, PHP e CSS, o JavaScript é uma das principais tecnologias que permitem o desenvolvimento de páginas interativas e de fácil entendimento e, portanto, são essenciais para os aplicativos da web.

Também foi utilizado o Bootstrap, “um *framework web* com código-fonte aberto para desenvolvimento de componentes de interface e *front-end* para sites e aplicações

web usando HTML, CSS e JavaScript, baseado em modelos de design para a tipografia, melhorando a experiência do usuário em um site amigável e responsivo.” (WIKIPÉDIA, 2018)

O *website* foi desenvolvido com o intuito de fazer o dimensionamento e otimização da elevação de petróleo por bombeio mecânico. Inicialmente é solicitado ao usuário que efetue o login, por meio dele é verificado a elegibilidade do usuário para acessar então os cálculos propostos. Após essa etapa, o usuário se depara com dois formulários, um deles é responsável pela coleta das variáveis de entrada para o cálculo de dimensionamento, e outro formulário que irá efetuar a otimização.

Além das variáveis necessárias padrões, caso o usuário tenha solicitado o cálculo da otimização, será solicitado que selecione o tipo de otimização desejado, ou seja, qual a variável ele deseja que seja testada, podendo escolher entre: Velocidade, Diâmetro e Curso.

Finalmente, os dados são enviados para um arquivo externo de extensão .php, que contém todas as equações citadas e tabelas auxiliares regulamentadas pela norma internacional API 11L da *American Petroleum Institute* implementadas, além de outras equações e métodos desenvolvidos para que fosse possível o cálculo de forma rápida e precisa.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

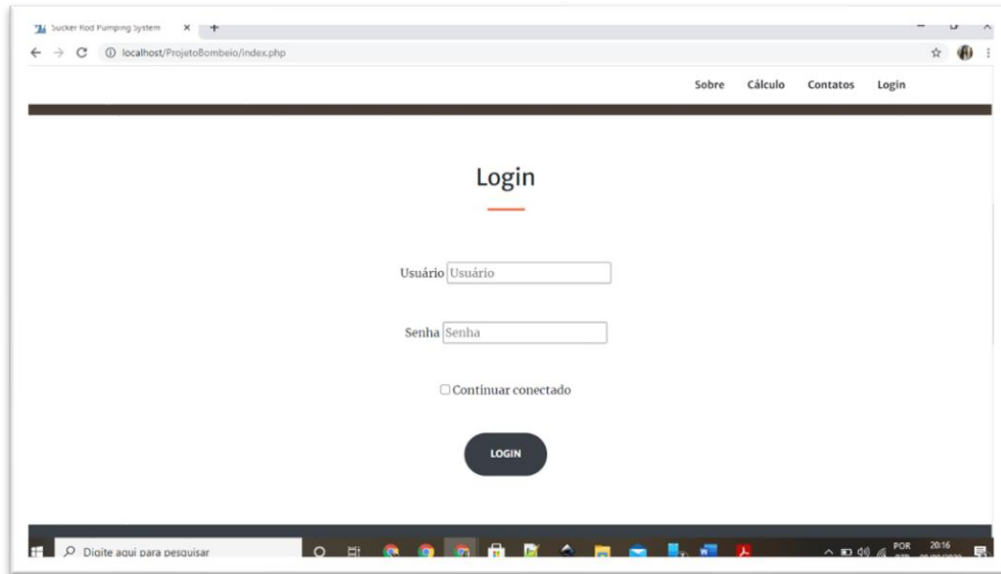
Na Figura 01, é mostrada a tela inicial da ferramenta computacional desenvolvida.

Figura 01. Tela inicial da ferramenta.



Na Figura 02, é apresentada a tela de *login*, primeira interação do sistema com o usuário.

Figura 02. Tela de *login*.



Nas Figuras 03 e 04 temos as telas que fazem a coleta das variáveis por meio de formulário dos dados necessários para o dimensionamento e otimização, respectivamente.

Figura 03. Tela de dimensionamento.

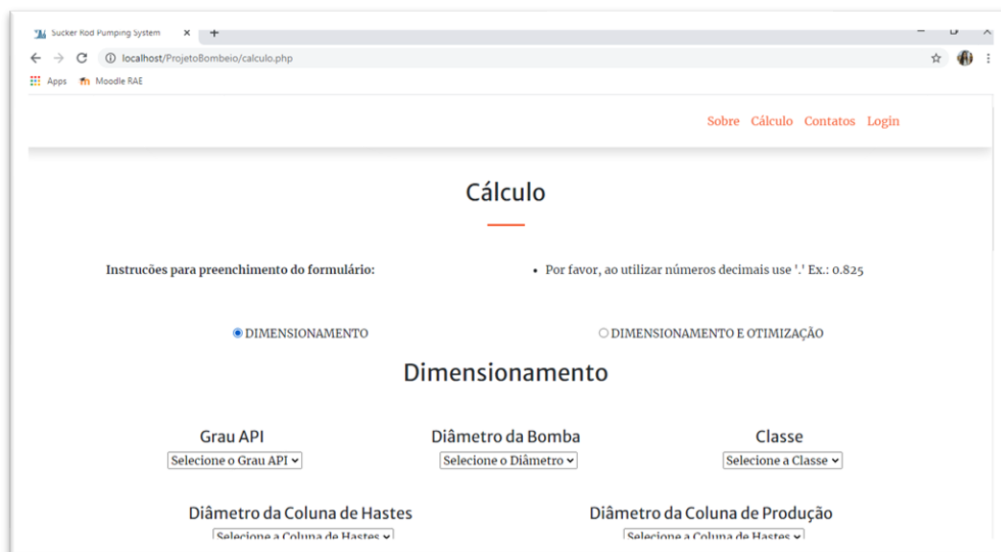




Figura 04. Tela de otimização.

Sucker Rod Pumping System

localhost/ProjetoBombeio/calculo.php

Sobre Cálculo Contatos Login

**Cálculo**

Instruções para preenchimento do formulário:

- Por favor, ao utilizar números decimais use '.' Ex.: 0.825

DIMENSIONAMENTO  DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO

**Dimensionamento e Otimização**

Grau API

Diâmetro da Bomba

Classe

Diâmetro da Coluna de Hastes

Diâmetro da Coluna de Produção

Curso Máximo

Nas Figuras 05 e 06, temos os resultados dos cálculos de dimensionamento e otimização, tanto para coluna de produção ancorada e não ancorada, respectivamente.

Figura 05. Tela de resultados de dimensionamento.

Sucker Rod Pumping System

localhost/ProjetoBombeio/dimensionar.php

Sobre Cálculo Contatos Login

Ankorada  Não Ankorada

**Ankorada:**

Velocidade de Bombeio : 0.31

Carga de Fluido sobre o Pistão : 3672.36 lb

Constante Elástica da Coluna de Hastes : 264.91 lb/in

Elongação da Coluna devido à Carga do Fluido: 0.22

Sp/S : 0.89

F1Skr : 0.41

F2Skr : 0.192

F3Skr : 0.26

zT/Skr : 0.34

Ta : 0.005

Figura 06. Tela de resultados de otimização.



Posteriormente, foi realizado a comparação entre os resultados obtidos da ferramenta com os da própria norma API 11L. A Tabela 01 apresenta os dados de saída da cada uma das variáveis analisadas pela ferramenta em comparação com os apresentados na norma e o erro percentual entre eles. Após analisar os dados de saída calculados, foi notável que o erro percentual foi baixo. Para algumas variáveis foi de 0%. Para aqueles erros mais elevados, podemos justificar levando em conta arredondamentos e, principalmente, que os dados lidos a partir das tabelas constantes na norma são os de maior discrepância devido a inconsistência na interpretação dos gráficos presente na norma API 11L. A norma utiliza gráficos, enquanto utilizamos tabelas baseadas nesses gráficos, com aproximação de valores.

Tabela 01. Comparação entre os dados de saída da ferramenta com os Norma API11L e o erro percentual encontrado.

VARIÁVEIS	NORMA	FERRAMENTA	ERRO PERCENTUAL
F <sub>O</sub>	3098	3098,25	0,01%
K <sub>R</sub>	248,76	248,76	0,00%
F <sub>O</sub> /SK <sub>R</sub>	0,231	0,231	0,00%
N/N' <sub>O</sub>	0,301	0,302	0,33%
K <sub>T</sub>	651,47	651,47	0,00%
S <sub>P</sub>	41,7	43,30	3,84%

PD	175	181,76	3,86%
W	9165	9165	0,00%
$W_{RF}$	8110	8109,19	0,01%
PPRL	14356	13616,74	5,15%
MPRL	5249	5530,05	5,35%
PT	8,5	7,63	10,24%
PRHP	133793	125187,7	6,43%
CBE	10239	10237,81	0,01%
$S_P/S$	0,86	0,89	3,49%
$F_1/SK_R$	0,465	0,41	11,83%
$F_2/SK_R$	0,213	0,192	9,86%
$F_3/SK_R$	0,29	0,26	10,34%
$2T/S^2K_R$	0,37	0,34	8,11%
$T_A$	0,997	1,015	1,81%

Utilizando a ferramenta, foi feita a otimização do sistema, onde foi utilizado como dado de entrada uma *Vazão de Superfície* (estipulada teoricamente) de 100 bpd. Inicialmente, a eficiência volumétrica ( $E_v$ ) calculada com os dados de entrada não era a melhor para o sistema, pois a eficiência era 55.02%. Dessa forma, após a otimização, a  $E_v$  aumentou, pois ao variar o *Diâmetro*, o *Curso* e a *Velocidade*, foi possível concluir que para determinados valores o sistema teria um melhor funcionamento.

Tabela 02. Otimização.

CALCULADO		OTIMIZADO	
Diâmetro (pol)	$E_v$	Diâmetro (pol)	$E_v$
1,5	55.02 %	1.25	79.23%
Velocidade (spm)	$E_v$	Velocidade (spm)	$E_v$
16	55.02 %	9	97.81%
Curso (pol)	$E_v$	Curso (pol)	$E_v$
54	55.02 %	82	98.82%

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos estudos realizados nessa pesquisa e dos resultados obtidos para os cálculos de dimensionamento e otimização por bombeio mecânico, foi possível concluir que o objetivo do projeto foi alcançado. A ferramenta computacional desenvolvida realizou os cálculos de forma rápida e precisa, devido as equações e tabelas regulamentadas pela norma internacional API 11L da American Petroleum Institute que foram implementadas diretamente no código, sem que seja necessário que o usuário perca muito tempo fazendo consultas. As linguagens utilizadas também contribuíram para que o layout do site fosse organizado e de fácil entendimento para todos as pessoas que venham a utilizá-lo.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil. PIBIC/CNPq-UFCG.

## REFERÊNCIAS

- API TECHNICAL REPORT 11L. **Design Calculations for Sucker Rod Pumping Systems**. 5ª edição. American Petroleum Institute, 2018.
- BEZERRA, A. R. A. **Protótipo de uma Unidade de Bombeio Mecânico**. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia de Petróleo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- COSTA, R. O. **Controle Aplicado a Poços com Método de Elevação Bombeio Centrífugo Submerso**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- FREITAS, C. H. **Sistema Especialista Fuzzy para Dimensionamento de Bombeio Mecânico**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Sistemas e Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- LIMA, F. S. **Deteção e Classificação de Modos de Operação do Bombeio Mecânico Via Cartas Dinamométricas**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- TAKÁCS, G. **Sucker-Rod Pumping Handbook: Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping**. Gulf Professional Publishing, 2015.
- THOMAS J. E. (org.). **Fundamentos da Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.