



## C A P Í T U L O 5

# MODELAGEM NA CONDIÇÃO DE CONTORNO DE CARTAS DINAMOMÉTRICAS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM VÁLVULAS DE BOMBEIO MECÂNICO

**Camila Melo dos Santos**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

**Ana Carla C. Andrade**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

**Carla Wilza P. S. Maitelli**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

**Rutácio de O. Costa**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

**Andre Laurindo Maitelli**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

**ABSTRACT:** Sucker Rod Pump is the most widely used artificial lift method in onshore oil wells due to its operational advantages. Like all mechanical systems, rod pump components are subject to wear and fatigue, which can result in failures such as leakage through the downhole pump valves. This paper presents a mathematical model to simulate fluid leakage through these valves as a function of plunger displacement and pump pressure. The ability to predict such failures can enhance pumping system performance, reduce operational costs, and optimize oil production.

**KEYWORDS:** mathematical modeling; sucker rod pump; bottom boundary condition; valve leakage.

## INTRODUÇÃO

O petróleo presente na subsuperfície terrestre *onshore* ou *offshore* pode ser extraído natural ou artificialmente a depender da condição do poço. Esse processo de extração recebe o nome de elevação natural, quando a pressão do reservatório é maior que a pressão do poço, fazendo com que os fluidos armazenados na rocha fluam até a superfície, sem a necessidade de usar equipamentos auxiliares para a elevação, geralmente, isso ocorre no início da vida produtiva de um poço. Quando

a energia do reservatório já não é mais suficiente para garantir a surgência do poço, utiliza-se a elevação artificial, que fornece energia ao fluido localizado no fundo do poço por meio de equipamentos, fazendo com que esse fluido suba até a superfície (TAKÁCS, 2003).

Os principais métodos de elevação usados pela indústria são: a injeção de gás lift contínuo ou intermitente (GLC ou GLI), o bombeio centrífugo submerso (BCS), bombeio por cavidades progressivas (BCP) e o bombeio mecânico com hastes (BM). A escolha do método depende do projeto do poço e deve ser analisado o local de perfuração, a profundidade do poço, a vazão, se há presença de gás entre outros fatores (GALVÃO, 2016).

O objeto de estudo deste trabalho é o Bombeio Mecânico, considerado originalmente o primeiro método de elevação. Desde então, é o mais usado na indústria petrolífera, especialmente em poços terrestres, por operar de maneira simples, dispor de uma manutenção economicamente viável e apresentar um longo período de vida útil dos poços (TAKÁCS, 2003). Em 2014, este método era usado em 73,5% dos poços produtores do Brasil que usavam elevação artificial (LIMA, 2014). Esse equipamento é subdividido em equipamentos de superfície: Unidade de Bombeio, Motor Principal, Caixa de Velocidade e Conjunto de Cabeça de Poço; e de subsuperfície: Bomba de Fundo, Coluna de Hastes e Pistão (TAKÁCS, 2003).

Apesar de suas vantagens, o BM apresenta limitações significativas, entre elas a ocorrência de algumas falhas (ou defeitos) durante a operação do equipamento. As falhas que ocorrem com mais frequência são *pump off*, interferência de gás, haste partida, vazamento nas válvulas de passeio e/ou de pé, que resultam em interrupções da produção e em custos adicionais de manutenção. Para monitorar o funcionamento do método tem-se o registro das cartas dinamométricas de superfície (que mede a posição e a carga na haste polida) e de fundo (medindo a posição e a carga acima da bomba), que, se interpretadas corretamente, indicam a situação da operação (ARAÚJO JÚNIOR, 2019).

Dada a importância das cartas dinamométricas para avaliação dos poços de petróleo, foram desenvolvidas tecnologias capazes de simular o funcionamento do bombeio mecânico a partir de equações matemáticas que modelam as condições de superfície e de fundo de um poço em produção. Essas modelagens permitem prever o comportamento dinâmico do sistema, tornando possível analisar diferentes cenários operacionais e identificar anomalias que comprometam a eficiência do BM.

Desse modo, este trabalho tem como objetivo apresentar a modelagem na condição de contorno de fundo de cartas dinamométricas, que permite fazer a detecção de vazamentos em válvulas de bombeio mecânico.

## METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se na modelagem matemática do sistema de BM, conforme abordagem proposta por GIBBS (1963), com o objetivo de desenvolver um modelo capaz de simular o comportamento do sistema em situações de vazamento nas válvulas da bomba de fundo. Como ponto de partida, foi utilizada a formulação apresentada na dissertação de SILVA (2017), a qual oferece um modelo inicial para o caso em estudo. A partir disso, foram realizadas complementações nas condições de contorno e nos parâmetros ausentes, de modo a permitir a simulação completa do fenômeno. A seguir, são descritos os fundamentos físicos e as principais equações utilizadas na simulação do sistema de BM.

### Modelagem matemática

Em síntese, o funcionamento do bombeio mecânico ocorre por meio da conversão do movimento rotativo do motor principal em movimento alternativo da coluna de hastes, esse acionamento é feito pela Unidade de Bombeio (UB). Durante o ciclo de bombeio, as cargas que atuam sobre a UB variam de acordo com o movimento das hastes, uma vez que as cargas dinâmicas e estáticas são maiores no curso ascendente que no descendente, devido à carga do fluido (LIMA, 2014).

É possível prever o comportamento do sistema de BM ao longo do tempo, sendo necessário conhecer as condições de contorno de superfície e de fundo. A condição de contorno de superfície consiste no deslocamento da haste polida ao longo do tempo. Já para a condição de contorno de fundo é necessário determinar o deslocamento do pistão a cada instante, por meio de um processo iterativo que envolve a força dinâmica que atua no pistão. Essa força, por sua vez, depende da pressão no interior da bomba de fundo e pode ser expressa pela força diferencial de pressão aplicada sobre uma área, conforme a equação a seguir, definida por Silva (2017):

$$F_D(t) = (p_d - p_b(t))A_p \quad (1)$$

Onde,

- $F_D(t)$  - força dinâmica atuando no pistão da bomba de fundo, *lbf*.
- $p_b(t)$  - pressão no interior da bomba de fundo, em *psi*, em um dado instante.
- $p_d$  - pressão de descarga, em, *psi*.
- $A_p$  - área do pistão da bomba de fundo, *in*<sup>2</sup>.

Logo, é possível concluir que a modelagem de contorno de fundo é equivalente à modelagem da pressão no interior da bomba em função do deslocamento do pistão. Essa modelagem envolve as propriedades dos fluidos e processos de compressão e expansão. No entanto, o vazamento nas válvulas de passeio e de pé também pode ser considerado.

Durante o curso ascendente, o pistão sobe, a câmara entre as válvulas se expande e a pressão no interior da bomba cai. A pressão maior acima da válvula de passeio do que abaixo desta faz com que ela se mantenha fechada. A pressão entre as válvulas continua a cair até que seja menor que a pressão na sucção. Quando isto ocorre, a válvula de pé abre e permanece aberta até o final do curso ascendente. Já no curso descendente, as posições invertem, pois o deslocamento do pistão para baixo acarretará o aumento da pressão na região entre as válvulas, o que causará o fechamento da válvula de pé e a abertura da válvula de passeio (OLIVA, 2017).

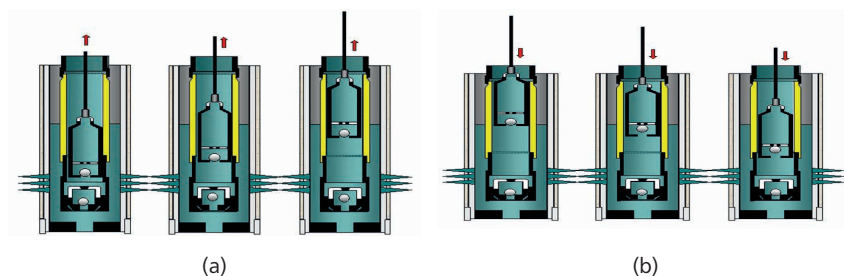


Figura 1 – Pistão no Curso Ascendente (a) e no no Curso Descendente (b).

Fonte: elaborada pelos autores.

Enquanto as válvulas permanecem fechadas, o deslocamento do pistão gera compressão ou expansão dos fluidos. Para o cálculo da pressão com o aumento do volume, considerar-se-á processo isotérmico, com as propriedades dos fluidos conforme correlações obtidas para o modelo *black oil*, que considera a transferência de massa entre as fases líquida e gasosa.

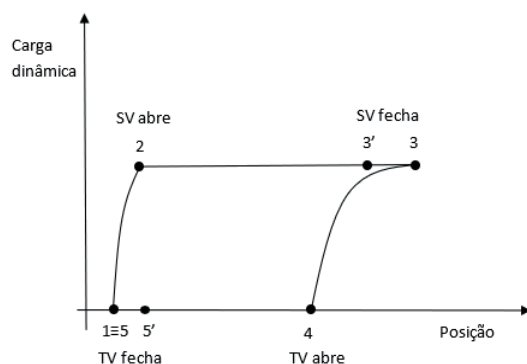


Figura 2 – Carta Dinamométrica De Fundo Típica.

Fonte: autoria desconhecida.

Dada uma carta dinamométrica típica, é possível determinar o momento onde as válvulas de passeio e de pé abrem e fecham, considerando os cursos ascendente e descendente. Desse modo, estabelecemos uma relação entre o movimento do pistão e a pressão interna da bomba ( $p_b$ ), a pressão de sucção ( $p_s$ ) e a pressão de descarga ( $p_d$ ), para elaborar um modelo matemático que determine se há vazamentos que não foram previstos no projeto do poço.

Considerando as possibilidades de haver vazamento em diferentes condições, fizemos um arranjo matemático distinto considerando as diferenças de pressão ao longo dos cursos ascendentes e descendentes. Situação 1: Condição Inicial, situação 2:  $p_s < p_b \leq p_d$  no curso ascendente, situação 3:  $p_b \cong p_s$  no curso ascendente, situação 4:  $p_s < p_b \leq p_d$  no curso descendente, situação 5:  $p_b \cong p_s$  no curso descendente.

## Condição Inicial

Consideremos a Figura 3, que ilustra em (a) a condição inicial; em (b) o deslocamento dinâmico do pistão, a elongação do tubing e a distância entre as válvulas em algum ponto do curso ascendente; e em (c) o pistão em algum ponto do curso descendente.

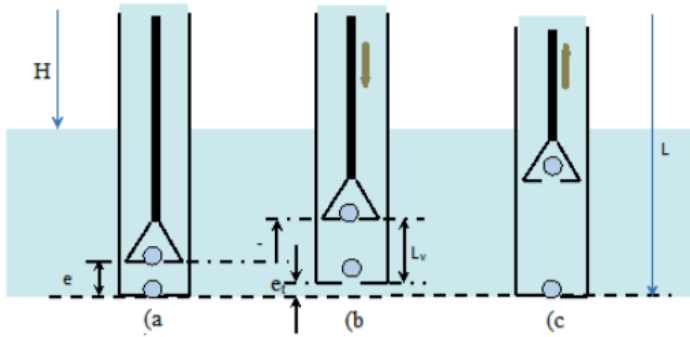


Figura 3 – Bomba de fundo (a) na condição inicial, (b) no curso ascendente, (c) no curso descendente.

Fonte: SILVA, 2017.

A bomba está instalada numa profundidade  $L$  (ft) e o nível dinâmico no espaço anular é  $H$  (ft). Considere que a coluna de produção está cheia de líquido.

Observe que a figura 3, evidencia a distância entre as válvulas  $L_v(t)$ , mostrada na figura 1, num dado instante  $t$ , Silva (2017), definiu essa distância, como:

$$L_v(t) = -u_p(t) + e_m - e_t(t) \quad (2)$$

Onde,

- $u_p(t)$  - do pistão, na direção para baixo, in.
- $e_m$  - espaço morto estático, in.
- $e_t(t)$  - elongação do tubing, in.

Considere as variáveis a seguir, para equações futuras,

- |   |  |
|---|--|
| ■ $B_o$ - fator volume para o óleo, adimensional                                    | ■ $RGO'$ - razão gás-óleo do fluido que escoar através da sucção da bomba de fundo, SCT/STB    |
| ■ $t_s$ - momento em que a válvula de pé fecha, s                                   | ■ $RGL$ - razão gás-líquido de produção, SCF/STB.  |
| ■ $t_t$ - momento em que a válvula de passeio abre, s                               | ■ $RGL'$ - razão gás-líquido do fluido que escoar através da sucção da bomba de fundo, SCT/STB |
| ■ $p_s$ - pressão de sucção, em psi   | ■ $f_w$ - fração de água ou corte de água, adimensional.                                       |
| ■ $A_p$ - área do pistão da bomba de fundo, in <sup>2</sup>                         | ■ $B_g$ - fator volume para o gás, adimensional.   |
| ■ $A_t$ - área metálica da seção transversal da coluna de produção, in <sup>2</sup> | ■ $R_s$ - razão de solubilidade do gás, SCF/STB  |
| ■ $E_t$ - módulo de elasticidade do material da coluna de produção, psi             | ■ $L_v$ - distância entre a válvula de passeio e a válvula de pé, in                           |
| ■ $RGO$ - razão gás-óleo de produção, SCF/STB                                       | ■ $t_i$ - momento em que ocorre o início do curso ascendente, s                                |

Na condição inicial, ilustrado na Figura 2, ponto 1, e Figura 3(a), a diferença entre a pressão no interior da bomba e a pressão de sucção gera uma carga de fluido que é suportada pela coluna de produção, cujo comprimento é  $L$ . A pressão no interior da bomba de fundo é igual à pressão de descarga. A temperatura da bomba de fundo será considerada igual à temperatura da formação, dada pelo gradiente geotérmico.

O volume total de fluido ( $V_f$ ) no espaço entre as válvulas, na condição inicial ( $t=t_i$ ), é igual a soma dos fluidos produzidos ou, como neste momento está totalmente preenchido, podemos calcular como sendo o produto do espaço morto ( $e_m$ ) pela área do pistão ( $A_p$ ), ou seja:

$$V_{f1} = V_{o1} + V_{g1} + V_{w1} = e_m A_p \quad (3)$$

Onde

- $V_{o1}$  - volume de óleo existente na condição inicial,  $in^3$ .
- $V_{g1}$  - volume ocupado pelo gás livre, na condição inicial,  $in^3$ .
- $V_{w1}$  - volume de água, na condição inicial,  $in^3$ .
- $V_{f1}$  - volume ocupado pelos fluidos, na condição inicial,  $in^3$ .

Esses fluidos no interior da bomba estão na pressão de descarga e temperatura  $T$  da formação. Silva (2017) definiu esses volumes como sendo,

$$V_{oi} = V_{oisc} B_o(p_d, T) = V_{lisc} (1 - f_w) B_o(p_d, T) \quad (4)$$

$$V_{gi} = 0,1781 V_{lisc} \left[ RGL' - (1 - f_w) R_s(p_d, T) \right] B_g(p_d, T) \quad (5)$$

$$V_{wi} = V_{lisc} \cdot f_w \cdot B_w(p_d, T) \quad (6)$$

A relação entre os volumes de gás e líquido (óleo+água), expressos em condição padrão, presentes na bomba, será designada por  $RGL'$ , em  $SCF/STB$ . Com  $RGL = RGO (1 - f_w)$ . Percebe-se que o volume de gás livre será nulo, na condição inicial, se  $R_s(p_d, T) = RGO'$ , o que é razoável esperar, pois, em geral, a pressão de descarga é elevada e os poços bombeados produzem pouco gás.

Substituindo as equações 4, 5 e 6 na eq. 3, podemos calcular o volume de líquido inicial,  $V_{lisc1}$ , em  $in^3$ , expresso em condições padrão:

$$V_{lisc1} = \frac{V_{f1}}{(1 - f_w) B_o(p_d, T) + 0,1781 \left[ RGL' - (1 - f_w) R_s(p_d, T) \right] B_g(p_d, T) + f_w \cdot B_w(p_d, T)} \quad (7)$$

Considerando a equação 7, podemos definir o fator de volume para o fluido em função da pressão da bomba e da temperatura, como na equação 8:

$$B_f(p_b(t), T) = \frac{V_f(p_b(t), T)}{V_{isc}} = (1 - f_w)B_o(p_b(t), T) + 0,1781 \left[ RGL' - (1 - f_w)R_s(p_b(t), T) \right] B_g(p_b(t), T) + f_w \cdot B_w(p_b(t), T) \quad (8)$$

Desse modo é possível reescrever a equação 7, considerando a condição inicial,  $p_b(t_1) = p_d$ :

$$V_{isc1} = \frac{V_{f1}}{B_f(p_d, T)} = \frac{e_m A_p}{B_f(p_d, T)} \quad (9)$$

### Modelagem do curso ascendente com $p_s < p_b \leq p_d$

Ainda na figura 2, observe que o ponto 1 marca o início do curso ascendente, que podemos considerar como sendo o início de um novo ciclo de bombeio. No instante  $t=t_1$ , quando o pistão começa a se mover, as duas válvulas permanecem fechadas.

Presumindo que a pressão  $p_b(t)$  seja conhecida, com  $t_1 < t < t_2$  enquanto as válvulas permanecem fechadas, se houver algum vazamento, o interior da bomba será ocupado com os fluidos que estavam presentes no instante  $t$ , mais o fluido que vazou da descarga para o interior da bomba menos o que vazou do interior da bomba para a sucção. Neste instante, a distância entre as válvulas será:

$$L_v(t + \Delta t)A_p = V_f(p_b(t + \Delta t), T) + V_{vtv} - V_{vsv} \quad (10)$$

Onde:

- $V_{vtv}$  - volume de fluido que vazou através da válvula de passeio para o interior da bomba,  $in^3$ .
- $V_{vsv}$  - volume de fluido que vazou do interior da bomba para a sucção,  $in^3$ .
- $V_f(p_b(t + \Delta t), T)$  - volume correspondente ao fluido que havia na bomba no instante  $t$ , na pressão  $p_b(t + \Delta t)$ ,  $in^3$ .

Se considerarmos que o vazamento é proporcional ao diferencial de pressão na válvula e assumindo um valor máximo quando o diferencial de pressão for máximo, sendo a constante de proporcionalidade medida em unidades de vazão por unidade de diferencial de pressão, então o volume acumulado pela válvula de passeio ( $V_{vtv}$ ) e de pé ( $V_{vsv}$ ) entre  $t_1$  e  $t$ , poderá ser dado por

$$V_{vtv} = \int_{t_1}^{t+\Delta t} B_f(p_b(t), T) q_{vtvsc} \frac{p_d - p_b(t)}{p_d - p_s} dt \quad (11)$$

$$V_{vsv} = \int_{t_1}^{t+\Delta t} B_f(p_b(t), T) q_{vspsc} \frac{p_b(t) - p_s}{p_d - p_s} dt \quad (12)$$



Onde,

- $q_{vTVSC}$  - vazão do vazamento de líquido através da válvula de passeio quando o diferencial de pressão sobre a válvula é  $p_d - p_s$ , medido em condições padrão,  $in^3/s$ .
- $q_{vSVSC}$  - vazão do vazamento de líquido através da válvula de pé quando o diferencial de pressão sobre a válvula é  $p_d - p_s$ , medido em condições padrão,  $in^3/s$ .

Considerando  $\Delta t$  suficientemente pequena, as integrais 11 e 12 podem ser aproximadas pela regra do trapézio. Então,

$$V_{TV} = q_{vTVSC} \left\{ B_f(p_b(t), T) [p_d - p_b(t)] + B_f(p_b(t + \Delta t), T) [p_d - p_b(t + \Delta t)] \right\} \frac{\Delta t}{2} \quad (13)$$

$$V_{SV} = q_{vSVSC} \left\{ B_f(p_b(t), T) [p_b(t) - p_s] + B_f(p_b(t + \Delta t), T) [p_b(t + \Delta t) - p_s] \right\} \frac{\Delta t}{2} \quad (14)$$

### Modelagem do curso ascendente com $p_b \cong p_s$

Essa modelagem compreende o movimento do pistão do momento em que a válvula de pé abre até o seu fechamento. Se houver vazamento na válvula de passeio, a válvula de pé fechará antes de finalizar o curso ascendente, enquanto a válvula de pé estiver aberta, não consideramos um vazamento por ela. Assim, o volume do fluido presente na bomba é dado por:

$$L_v(t)A_p = V_f(t_2) + V_{isv}(t) + V_{TV}(t) \quad (15)$$

Onde;

- $V_f(t_2)$  - volume de fluido existente na bomba no momento da abertura da válvula de pé ( $t_2$ ),  $in^3$ .
- $V_{isv}(t)$  - volume de fluido que entrou na bomba pela válvula de pé, desde a sua abertura (intervalo  $t - t_2$ ),  $in^3$ .
- $V_{TV}(t)$  - volume oriundo do vazamento da válvula de passeio,  $in^3$ .

Derivando 15 em relação a  $t$ , temos:

$$A_p \left[ -\frac{du_p}{dt} + \frac{12A_p L}{E_t A_t} \frac{dp_b(t)}{dt} \right] = \frac{dV_{isv}(t)}{dt} + B_f(p_b(t), T) q_{vTVSC} (p_d - p_b(t)) \quad (16)$$

Na iminência de ocorrer o fechamento da válvula de pé, devido ao vazamento na válvula de passeio, a pressão na bomba é aproximadamente constante e igual à pressão de sucção e a vazão que entra pela válvula de pé tende a zero. Então

$$B_f(p_s, T) q_{vTVSC} (p_d - p_s) + A_p \frac{du_p}{dt} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{du_p}{dt} = - \frac{B_f(p_s, T) q_{vfvsc} (p_d - p_s)}{A_p} \quad (18)$$

### Modelagem do curso descendente com $p_s < p_b \leq p_d$

Neste contexto, as válvulas estão fechadas enquanto o pistão desloca-se no curso descendente. O fluido contido entre as válvulas é comprimido e a pressão aumenta até haver abertura da válvula de passeio.

Ao final do curso ascendente, o espaço entre as válvulas de passeio e de pé estava preenchido com fluido a uma pressão  $p_b(t_3)$ . Portanto, num instante  $t_3 < t + \Delta t \leq t_4$ , com ambas as válvulas fechadas, neste caso usamos a mesma abordagem usada para essa configuração de pressão no curso ascendente.

### Modelagem do curso descendente com $p_b \cong p_s$

Neste momento, compreende-se o movimento do pistão no curso descendente, desde a abertura da válvula de passeio até o seu fechamento. Caso haja vazamento na válvula de pé, a válvula de passeio fechará antes que o curso termine. Enquanto a válvula de passeio estiver aberta, não consideramos um vazamento proveniente dela, logo, o volume do fluido presente no interior da bomba poderá ser dado por:

$$L_v(t)A_p = V_f(t_4) - V_{otv}(t) - V_{vsv}(t) \quad (19)$$

Onde,

- $V_f(t_4)$  - volume de fluido existente na bomba no momento da abertura da válvula de passeio ( $t_4$ ),  $\text{in}^3$ .
- $V_{otv}(t)$  - volume de fluido que saiu da bomba pela válvula de passeio, desde a sua abertura (no intervalo  $t - t_4$ ),  $\text{in}^3$ .
- $V_{vsv}(t)$  - volume do vazamento da válvula de pé,  $\text{in}^3$ .

Quando ocorre o fechamento da válvula de passeio, devido ao vazamento, a pressão na bomba é aproximadamente constante e igual à pressão de descarga e a vazão que escoar do interior da bomba para a descarga, através da válvula de passeio é nula.

Derivando 19 em relação a  $t$ , temos:

$$A_p \left[ -\frac{du_p}{dt} + \frac{12A_p L}{E_t A_t} \frac{dp_b(t)}{dt} \right] = -\frac{dV_{otv}(t)}{dt} - B_f(p_b(t), T) q_{vfvsc} (p_b(t) - p_s) \quad (20)$$

Quando ocorre o fechamento da válvula de passeio, devido ao vazamento, a pressão na bomba é aproximadamente constante e igual à pressão de descarga e a vazão que escoar do interior da bomba para a descarga, através da válvula de passeio é nula. Então,

$$B_f(p_d, T) q_{vs\text{vsc}} (p_d - p_s) - A_p \frac{du_p}{dt} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{B_f(p_d, T) q_{vs\text{vsc}} (p_d - p_s)}{A_p} \quad (22)$$

O final do curso descendente, é caracterizado por velocidade nula, isto é,  $\frac{du_p}{dt} = 0$ . Esse instante coincide com o início do curso ascendente do próximo ciclo de bombeio. O valor da pressão no interior da bomba deve ser guardado para ser usado no início do próximo ciclo.

## Simulação computacional

Os cálculos apresentados anteriormente foram incorporados ao algoritmo de um simulador de Bombeio Mecânico que está na fase de desenvolvimento, a parte de vazamento nas válvulas é apenas uma das funcionalidades do simulador. Este simulador foi desenvolvido no Excel, usando programação em VBA e posteriormente reescrito em *Python*. O simulador foi projetado para gerar cartas dinamométricas de superfície e de fundo, com base nas condições de contorno e nos parâmetros operacionais definidos pelo usuário. Os dados de entrada podem ser inseridos diretamente na planilha Excel (VBA) ou diretamente no código (*Python*). Ressalta-se que o conteúdo apresentado neste artigo corresponde a apenas uma das funcionalidades do simulador, com foco específico na modelagem do comportamento da bomba de fundo em situações de vazamento nas válvulas. A tabela a seguir mostra os principais dados de entrada para simular uma condição de vazamento nas válvulas, os valores associados foram usados no teste apresentado nos resultados.

Profundidade da bomba de fundo	2001,1 (m)	Pressão Estática	1500 (psi)
Curso	68 (in)	Razão gás-líquido	1346 (SCF/STB)
Tamanho do pistão	1,5 (in)	Fator de água	62%
Densidade do fluido	0,99	Vazamento na válvula de passeio	0 (bpd/psi)
Prof. média dos canhoneados	2516,0	Vazamento na válvula de pé	0,07 (bpd/psi)

Tabela 1 - Principais dados de entrada do simulador

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir observa-se duas cartas dinamométricas de fundo, a primeira é uma carta de referência, retirada do banco de dados do *Echometer*, a segunda foi calculada pelo simulador de BM que usa a modelagem matemática descrita neste trabalho.

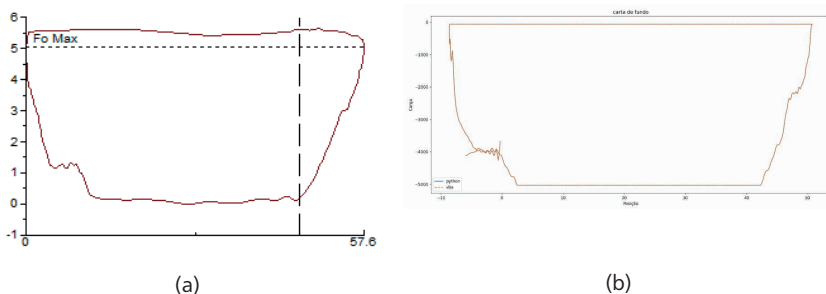


Figura 3 – Carta Dinamométrica de Fundo com vazamento na Válvula de Pé.

Fonte: (a) *Echometer* e (b) elaborada pelos autores, 2025.

Observe que as duas cartas apresentam um comportamento típico para vazamento na válvula de pé, com um recuo no canto inferior esquerdo, demonstrando que a válvula de passeio fechou antes de terminar o curso descendente, reduzindo a eficiência do sistema de bombeio.

Usando as informações disponíveis como dados de entrada para reproduzir a carta dinamométrica disponibilizada. As figuras 3(a) e 3(b), são cartas dinamométricas que apresentam um vazamento na válvula de pé, observe que a carta produzida é equivalente à carta de referência, evidenciando a validade do modelo para reproduzir o comportamento de um poço que tenha vazamentos não previstos no projeto inicial.

## CONCLUSÕES E/OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo matemático apresentado neste trabalho mostrou-se eficaz no cálculo de vazamento em válvulas de BM, tornando-se uma ferramenta para análise e otimização da produção de petróleo, já que possibilita a detecção precoce desse tipo de falha. A abordagem proposta pode contribuir para a implementação de medidas de manutenção antecipada, já que é possível identificar a ocorrência da falha antes que ela comprometa significativamente a produção do poço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO JÚNIOR, Antônio Pereira de. **Cálculo da carta dinamométrica de fundo para poços direcionais**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Centro de Tecnologia; Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo. Natal, 2014. 81 p. (Dissertação Mestrado).

BOOMER, Paul M.; Podio, A. L. **The Beam Lift Handbook**. United States of America: University of Texas at Austin, 2012. ISBN 978-0-88698-257-7. capítulo 6. Disponível em: [https://fliphtml5.com/inygn/smei/The\\_Beam\\_Lift\\_Handbook/56](https://fliphtml5.com/inygn/smei/The_Beam_Lift_Handbook/56). Acessado em: 1 abr 2025 às 22h00.

CAJUEIRO, Emanuel Benício de Almeida. **Inferindo posição e carga de haste polida de bombeio mecânico a partir da corrente de saída de inversor de frequência**. Universidade Federal da Bahia: Escola Politécnica; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial. Salvador, 2012. 138 p. (Dissertação Mestrado).

FONTE, S. S. D.; SANTOS, L. C. L.; SIMONELLI, G. **Dimensionamento do bombeio mecânico com hastes em Excel**. Holos, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - IFRN, Natal, v. 7, p. 17-29, 2017. ISSN 1518-1634. Disponível em: Dimensionamento do bombeio mecânico com hastes em excel. Acesso em: 1 abr 2025 às 22h03.

GALVÃO, Hannah Lícia Cruz. **Desenvolvimento e aplicação de uma estratégia de controle para o método de elevação artificial por bombeio mecânico**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Natal, 2016. 74 p. (Dissertação Mestrado).

GIBBS, S. G. **Predicting the Behavior of Sucker-Rod Pumping Systems**. Journal of Petroleum Technology, v. 15, n. 10, pp. 769-778, 1963.

LIMA, Fabio Soares de. **Deteção e classificação de modos de operação do bombeio mecânico via cartas dinamométricas**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Centro de Tecnologia; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Natal, 2014. 173 p. (Tese Doutorado).

OLIVA, Gabriel Bessa de Freitas Fuezi. **Desenvolvimento de uma estratégia de controle para uma unidade de bombeio inteligente**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Natal, 2017. 73 p. (Dissertação Mestrado)

SILVA, Raphael Eliedson da. **Estudo do efeito de um modelo aperfeiçoado de uma bomba de uma bomba de fundo sobre a simulação global do método de elevação por bombeio mecânico**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Natal, 2017. 81 p. (Dissertação Mestrado)

TAKÁCS, Gabor. **Sucker-Rod Pumping Manual**. United States of America: Pennwell Corporation, 2003. ISBN 0-87814-892-2. Capítulo 1.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT) em parceria com a WEG e com o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de PD&I da Resolução ANP nº 50/2015.