

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO**



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UNIDADES DE BOMBEIO MECÂNICO

Alire Maria Lisbôa de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

**NATAL/RN
27 de Novembro de 2014**

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UNIDADES DE BOMBEIO MECÂNICO

Alire Maria Lisbôa de Oliveira

**NATAL/RN
27 de Novembro de 2014**

Alire Maria Lisbôa de Oliveira

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UNIDADES DE BOMBEIO MECÂNICO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em ____ de _____ de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte
Orientador - UFRN

Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues
Membro interno - UFRN

Msc. Anthony Andrey Ramalho Diniz
Membro Interno - UFRN

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais,
Ricardo Luiz de Oliveira e
Silvana Cristina Lisbôa,
que me ensinaram o melhor caminho
a seguir e não mediram esforços
para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, que tem guiado meus planos em toda a minha vida, e que me ajudou em todas as minhas decisões e escolhas, me dando força, paz, segurança, confiança e sabedoria.

Aos meus pais Ricardo e Silvana, e minhas irmãs Alinne e Anna Júlia, por todo apoio que me foi dado, sempre me transmitindo força e ensinamentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte, pela orientação, mas principalmente pela confiança e paciência.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia do Petróleo pelas orientações, dedicação e contribuições científicas.

Aos meus amigos da graduação que, de forma direta ou indireta, fizeram parte dessa caminhada. Muito obrigada pela parceria e incentivo nesses anos de caminhada acadêmica.

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP 43) pelo apoio financeiro.

Oliveira. Alire M. L. – Análise do desempenho de unidades de Bombeio Mecânico. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

RESUMO

A avaliação da viabilidade técnica de um projeto de elevação artificial de petróleo é fundamental para o aumento da recuperação do fluido de interesse e a otimização do desempenho do Bombeio Mecânico. Claramente, em algum período da vida produtiva do poço, algum tipo de elevação artificial será requerido, devido à redução da pressão do reservatório, a fim de fazer com que o fluido alcance a superfície e restaure a vazão de produção a níveis normais, maximizando a recuperação dos hidrocarbonetos presentes. Assim, no presente trabalho realizou-se uma avaliação técnica em poços de petróleo equipados com Bombeio Mecânico, através dos principais parâmetros (peso de fluido, MPRL, PPRL, curso do pistão, PD da bomba, potência do motor, torque, etc) e das cartas dinamométricas com o intuito de avaliar o desempenho operacional do sistema de elevação. Para o estudo, foi utilizado o software Total Well Management (TWM), da empresa Echometer. A partir dele, foi apresentado o comportamento de alguns parâmetros e esses resultados mostraram que as unidades de Bombeio Mecânico avaliadas apresentam problemas relacionados à pancada de fluido, à interferência de gás e parafinas. Neste sentido, foram apresentadas as causas e as possíveis soluções para revertê-los.

Palavras-chave: elevação artificial, Bombeio Mecânico, carta dinamométrica.

Oliveira. Alire M. L. – Análise do desempenho de unidades de Bombeio Mecânico. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

ABSTRACT

The assessment of the technical feasibility of a project of artificial lift of oil is critical to increasing the fluid recovery of interest and performance optimization of the sucker rod pumping. Clearly, in some period of the productive life of the well, some kind of artificial lifting method will be required, due to the reduction of the pressure reservoir, in order to make the fluid reaches the surface and restore the flow of production to normal levels, maximizing the recovery of hydrocarbons present. Thus, in the present work was carried out a technical assessment in oil wells equipped with sucker rod pumping through the main parameters (weight of fluid, MPRL, PPRL, plunger stroke, pump displacement, engine power, rod torque, etc) and the dynamometer cards to evaluate the operating performance of the lift system. For this study, it was used the software Total Well Management (TWM), from the Echometer company. From it, was presented the behavior of some parameters and these results show that the sucker rod pumping units evaluated pose problems related to death of fluid, gas interference and paraffins. In this sense, were presented the causes and possible solutions to reverse them.

Keywords: artificial lift, sucker rod pumping, dynamometer card.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
1.1. Objetivos	5
2. ASPECTOS TEÓRICOS.....	6
2.1. Elevação Natural.....	6
2.2. Elevação Artificial.....	6
2.2.1. Bombeio Mecânico.....	7
2.2.1.1. Componentes do Bombeio Mecânico.....	7
2.2.1.2. Ciclo de bombeio.....	10
2.2.1.3. Carta dinamométrica.....	12
3. METODOLOGIA	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	16
4.1. Interferência de gás	16
4.2. Pancada de fluido	20
4.3. Vazamento na coluna de produção	24
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	27
6. REFERÊNCIAS	28

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Distribuição de poços por método de elevação.....	4
Figura 2: Equipamentos de superfície.	8
Figura 3: Equipamento de subsuperfície	8
Figura 4: Curso ascendente.....	11
Figura 5: Curso descendente.....	11
Figura 6: Carta dinamométrica	12
Figura 7: Cartas dinamométricas de fundo típicas	13
Figura 8: Ambiente de trabalho do <i>software</i> TWM	14
Figura 9: Esquema simplificado da metodologia realizada.....	15
Figura 10: (a) Carta dinamométrica da carga (klbs) <i>versus</i> curso da haste polida (in) para o poço A e (b) Carta dinamométrica da carga (klbs) <i>versus</i> curso do <i>plunger</i> para (in).....	17
Figura 11: Curva de potência (kW) e velocidade do <i>plunger</i> (in/s) em função do tempo (s) para o poço A.....	18
Figura 12: Curva de torque da haste (kin-lb) e PD (<i>pump displacement</i>) da bomba (bbl/d) em função do tempo (s) para o poço A	19
Figura 13: Testes das válvulas de pé e de passeio para o poço A	19
Figura 14: (a) Carta dinamométrica da carga (klbs) <i>versus</i> curso da haste polida (in) para o poço B e (b) Carta dinamométrica da carga (klbs) <i>versus</i> curso do <i>plunger</i> (in) para o poço....	21
Figura 15: Curva de torque da haste (kin-lb) e PD (<i>pump displacement</i>) da bomba (bbl/d) em função do tempo (s) para o poço B.....	22
Figura 16: Curva de velocidade da haste polida (in/s) e velocidade do <i>plunger</i> (in/s) em função do tempo para o poço B	23
Figura 17: Testes das válvulas de pé e passeio para o poço B	23
Figura 18: (a) Carta dinamométrica da carga (klbs) <i>versus</i> curso da haste polida (in) para o poço C e (b) Carta dinamométrica da carga (klbs) <i>versus</i> curso do <i>plunger</i> (in) para o poço....	24
Figura 19: Curvas de PD (<i>pump displacement</i>) da bomba (bbl/d) e de carga na haste polida (KLbs) em função do tempo (s) para o poço C	25
Figura 20: Testes das válvulas de passeio e de pé para o poço C.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Informações dos poços estudados.....15

Tabela 2: Parâmetros dos poços estudados.....16

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, vivencia-se na indústria petrolífera, a descoberta de novas jazidas repletas de hidrocarbonetos leves, pesados e ultra pesados. Esses hidrocarbonetos precisam ser elevados até a superfície para serem comercializados.

A pressão no reservatório é gerada pelo peso das camadas de rochas sobrepostas. A pressão exercida pelas camadas de rocha gera uma tendência natural do hidrocarboneto, presente na jazida, se deslocar de regiões de maior pressão, que é o interior do reservatório, para regiões de menor pressão, que é o interior da coluna de produção, e se a pressão superar a hidrostática do poço o hidrocarboneto vai se deslocar pela coluna de produção até a superfície (SOUZA, 2013).

Quando a pressão do reservatório é suficientemente elevada, os fluidos nele contidos alcançam livremente a superfície, dizendo-se que são produzidos por elevação natural. Os poços que produzem desta forma são denominados de poços surgentes. Quando a pressão do reservatório é relativamente baixa, os fluidos não alcançam a superfície sem que sejam utilizados meios artificiais para elevá-los. O mesmo ocorre no final da vida produtiva por surgência ou quando a vazão do poço está muito abaixo do que poderia produzir, necessitando de uma suplementação de energia natural através de elevação artificial. Utilizando equipamentos específicos, reduz-se a pressão de fluxo no fundo do poço, com o consequente aumento do diferencial de pressão sobre o reservatório, resultando em um aumento de vazão (THOMAS et al., 2004).

Os métodos de elevação artificial tradicionais, e mais amplamente empregados, são o bombeio mecânico (BM), o bombeio por cavidades progressivas (BCP), o bombeio centrífugo submerso (BCS) e o *gas lift* (COSTA, 2008).

Dentre os métodos de elevação artificial, o mais usado no mundo inteiro é o bombeio mecânico. Estevam (2006) afirma que 94 % de todos os poços de petróleo do mundo são equipados com algum método de elevação artificial. Destes, 71 % são equipados com bombeio mecânico (Figura 1). Na Petrobras, cerca de 70 % dos poços produtores são equipados com bombeio mecânico alternativo. Em relação aos outros métodos, sua popularidade está associada ao baixo custo de investimento e manutenção, grande flexibilidade de vazão e profundidade, alta eficiência energética, possibilidade de operação

com fluidos de diferentes composições e viscosidades, e aplicabilidade em larga faixa de temperaturas (COSTA, 2008).

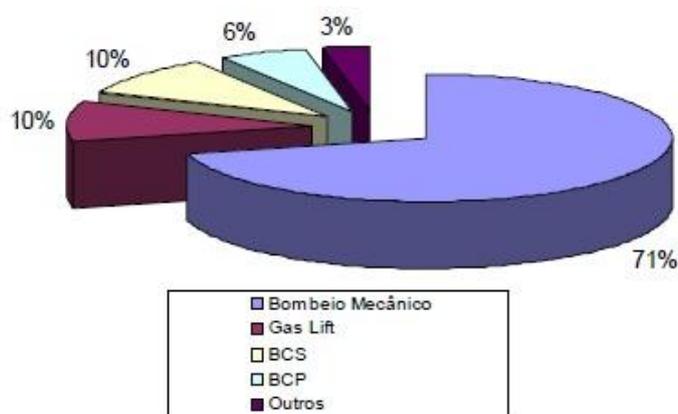


Figura 1 - Distribuição de poços por método de elevação (COSTA, 2008).

As cartas dinamométricas estão entre as principais ferramentas de análise e avaliação das condições do bombeio mecânico. É possível observar diversas condições de bombeio através da carta dinamométrica. As mais importantes informações extraídas da análise de cartas dinamométricas são: a determinação das cargas que atuam na unidade de bombeio e na haste polida, a determinação da potência requerida para a unidade de bombeio, o ajuste do contrabalanceio da unidade de bombeio, a verificação das condições de bombeio da bomba e válvulas e a detecção de condições de falha.

Sendo assim, as cartas dinamométricas são úteis no diagnóstico de problemas, dentre eles: desgaste de válvula, baixo desempenho do pistão, haste partida, interferência de gás, pancada de fluido, vazamento na coluna de produção. Os três últimos problemas citados são abordados com bastante enfoque nesse trabalho.

Nesse trabalho foi realizada uma avaliação técnica em poços de petróleo equipados com bombeio mecânico através dos principais parâmetros - peso de fluido, MPRL (carga mínima medida na haste polida), PPRL (carga máxima medida na haste polida), curso do pistão, PD da bomba (deslocamento volumétrico da bomba), potência do motor, torque, etc - e das cartas dinamométricas com o intuito de avaliar o desempenho operacional do sistema de elevação. Para o estudo, foi utilizado o software Total Well Management (TWM), da empresa Echometer.

1.1. Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo a realização de uma avaliação técnica em poços equipados com bombeio mecânico através da determinação dos principais parâmetros (peso de fluido, MPRL, PPRL, curso do pistão, PD da bomba, potência do motor, torque, etc) e das cartas dinamométricas com o intuito de avaliar o desempenho operacional do sistema de elevação e diagnosticar eventuais anormalidades operacionais.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

Nesta seção, será abordado o aporte teórico indispensável para o entendimento e o desenvolvimento dos procedimentos realizados para evolução e efetivação do trabalho.

2.1. Elevação Natural

Na elevação natural de petróleo, o fluxo de fluidos desde o reservatório até a superfície ocorre unicamente através da energia do reservatório. Normalmente, ocorre no início da vida produtiva das jazidas. Porém, com o passar do tempo e o aumento da produção acumulada, a pressão do reservatório declina, tornando-se insuficiente para deslocar os fluidos até a superfície numa vazão econômica ou conveniente (THOMAS et al., 2004).

Esse método de elevação é o mais vantajoso, pois há menos problemas operacionais. Conseqüentemente, há menores custos unitários de produção, além de, na maioria das vezes, possuírem altas vazões de líquido no início da produção.

O principal fator que auxilia essa elevação é a própria pressão do reservatório. Além disso, existem outros fatores como: a propriedade dos fluidos, o índice de produtividade do poço, o mecanismo de produção, o dano causado durante a perfuração, dentre outros.

2.2. Elevação artificial

Um poço pode ser surgente no início de sua vida produtiva, mas com o tempo necessitar de energia suplementar para produzir, devido à queda de pressão no reservatório. Essa situação pode ocorrer em poços recentemente perfurados, porém é bem mais comum em poços que se encontram já no final da sua vida produtiva.

Neste caso, utilizam-se os métodos de elevação artificial que, fazendo uso de equipamentos específicos, reduzem expressivamente a pressão no fluxo no fundo do poço, aumentando o diferencial de pressão sobre o reservatório, o que vai resultar no aumento da vazão do poço.

Os principais métodos de elevação artificial que são utilizados atualmente na indústria são:

- Gas-lift Contínuo e Intermitente (GLC e GLI). O Gas-Lift é um método de elevação artificial que utiliza a energia contida em gás comprimido para elevar fluidos (óleo

e/ou água) até a superfície. O gas-lift contínuo é similar à elevação natural e baseia-se na injeção contínua de gás a alta pressão na coluna de produção, com o objetivo de gaseificar o fluido desde o ponto de injeção até a superfície; O gas-lift intermitente baseia-se no deslocamento de golfadas de fluxo para a superfície, através da injeção de gás a alta pressão na base de golfadas (THOMAS et al., 2004).

- **Bombeio Centrífugo Submerso (BCS).** Neste tipo de bombeio, a energia é transmitida para o fundo do poço através de um cabo elétrico. A energia elétrica é transformada em energia mecânica através de um motor de subsuperfície, o qual está diretamente conectado a uma bomba centrífuga. Esta transmite a energia para o fluido sob forma de pressão, elevando-o para a superfície (THOMAS et al., 2004).

- **Bombeio Mecânico com Hastes (BM).** Acontece pelo movimento rotativo de um motor elétrico ou de combustão interna, que é transformado em movimento alternativo por uma unidade de bombeio localizada próxima à cabeça do poço (THOMAS et al., 2004).

- **Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP).** É um método de elevação artificial em que a transferência de energia ao fluido é feita através de uma bomba de cavidades progressivas. É uma bomba de deslocamento positivo que trabalha imersa em poço de petróleo, constituída de rotor e estator (THOMAS et al., 2004).

A escolha de um método de elevação artificial depende de alguns fatores, tais como o número de poços, a produção de areia, profundidade do reservatório, disponibilidade de energia, equipamento disponível, treinamento do pessoal, custo operacional, entre outros.

2.2.1. Bombeio Mecânico

Dentre todos os métodos de elevação artificial, o Bombeio Mecânico é utilizado em cerca de 71% dos poços produtores do mundo (ESTEVAM, 2006). Isso se deve ao baixo custo de investimento e manutenção, além de grande flexibilidade de vazão e profundidade, possibilidade de operar com fluidos de diferentes componentes e viscosidades, em largas faixas de temperatura.

2.2.1.1. Componentes do Bombeio Mecânico

Os equipamentos necessários para um poço equipado com bombeio mecânico são divididos em: equipamentos de superfície e equipamentos de subsuperfície. Os principais

componentes de superfície são: a unidade de bombeio (cabeça da UB, tripé, contrapesos, manivelas, redutor) e motor, conforme mostra Figura 2.



Figura 2 – Equipamentos de superfície (THOMAS et al, 2004).

E os de subsuperfície são: bomba de fundo (camisa, pistão, válvulas de pé e de passeio) e coluna de produção, conforme mostra a Figura 3.

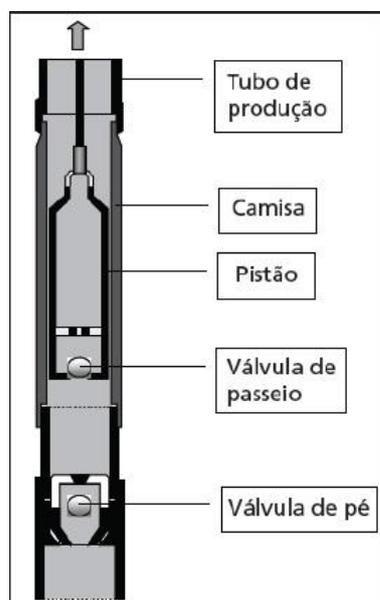


Figura 3 – Equipamentos de subsuperfície (OLIVEIRA, 2010).

A Unidade de bombeio (UB) é responsável pela conversão do movimento de rotação do motor em movimento alternado, transmitido às hastes. A escolha da unidade de bombeio deve atender a três solicitações, de modo a não sofrer danos durante a sua operação. São elas: o torque máximo aplicado, a máxima carga das hastes, e o máximo curso da haste polida (THOMAS, et al., 2004).

Através do movimento de rotação, o motor é responsável por transmitir energia à unidade de bombeio. Os motores podem ser elétricos ou de combustão interna. A disponibilidade de energia elétrica implicará sempre na utilização de um motor elétrico, tendo em vista que são mais eficientes, têm menor custo operacional e apresentam menor ruído em relação aos motores de combustão interna. Estes são utilizados, geralmente, em locais que estão isolados, onde a construção de uma rede para distribuição elétrica seja economicamente inviável (THOMAS, et al., 2004).

A coluna de hastes transmite energia para a bomba de subsuperfície, através do seu movimento alternativo. A primeira haste no topo da coluna é chamada de haste polida, por ter sua superfície externa polida. A haste polida, devido ao movimento alternativo da coluna, entra e sai constantemente do poço e tem a função de proporcionar uma maior vedação à cabeça do poço.

A bomba de subsuperfície (ou bomba de fundo) é o componente que fornece energia ao fluido, através do diferencial de pressão entre sua admissão e descarga. Trata-se de uma bomba de deslocamento positivo, do tipo alternativa e de simples efeito, contendo camisa, pistão válvula de passeio no pistão e válvula de pé na camisa.

As válvulas são consideradas o coração da bomba de fundo, pois uma operação de bombeamento eficiente depende, principalmente, da ação apropriada das válvulas de passeio e de pé. Elas são válvulas que permitem a passagem de fluxo em um único sentido, operando segundo o princípio sede-esfera e funcionando por pressão.

A vazão máxima proporcionada pela bomba de fundo é chamada *pump displacement* ou PD da bomba, que significa o máximo deslocamento volumétrico da bomba, o qual é função do diâmetro do pistão (D_p), do curso efetivo do pistão (S_p) e da velocidade de bombeio imposta ao sistema na superfície (N), em ciclos por minuto. Desta forma, o deslocamento volumétrico da bomba pode ser expresso por:

$$PD = 0,1166 S_p N D_p^2 \quad (1)$$

A vazão de líquido na superfície deve ser inferior ao valor projetado para o deslocamento volumétrico da bomba de fundo, devido ao escorregamento do fluido através da folga entre o pistão e a camisa, à presença de gás livre na bomba, ao encolhimento de óleo e a má vedação das válvulas de pé e passeio.

A eficiência volumétrica representa a razão entre a vazão de líquido na superfície (Q_L) e o deslocamento volumétrico da bomba (PD):

$$E_v = \frac{Q_L}{PD} \quad (2)$$

A eficiência volumétrica depende, principalmente, da profundidade de assentamento da bomba de fundo e da razão gás-óleo (RGO) da admissão da bomba.

É importante destacar que a maioria dos poços que operam por bombeio mecânico produz óleo de reservatórios pelo mecanismo de influxo de água. Desta forma, o índice de produtividade (IP) pode ser determinado por:

$$IP = 14,217 \frac{Q_L}{P_e - P_{wf}} \quad (3)$$

Onde:

IP é o índice de produtividade (m³/d)/(kgf/cm²)

Q_L é a vazão de líquido na superfície (m³/d)

P_e é a pressão estática no reservatório (psi)

P_{wf} é a pressão de fluxo no fundo do poço (psi)

A pressão estática do reservatório pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$P_e = 1,4217(L_F - NF_E)SG_f + P_{REV} \quad (4)$$

Onde:

L_F é a profundidade dos canhoneados (m)

NF_E é o nível estático de fluido no anular (m)

SG_f é a densidade relativa do fluido

P_{REV} é a pressão do revestimento (psi)

A pressão de fluxo no fundo do poço pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$P_{wf} = 1,4217(L_F - NF_D)SG_o + P_{REV} \quad (5)$$

Onde:

L_F é a profundidade dos canhoneados (m);

NF_D é o nível dinâmico de fluido no anular (m);

SG_o é a densidade relativa do óleo;

P_{REV} é a pressão do revestimento (psi).

2.2.1.2. Ciclo de bombeio

O ciclo de bombeio é dividido em curso ascendente e curso descendente, como mostram as Figuras 4 e 5, respectivamente.

No curso ascendente, o peso do fluido que está dentro da coluna de produção mantém a válvula de passeio fechada. A baixa pressão criada na camisa da bomba abaixo do pistão e acima da válvula de pé faz com que esta se abra, permitindo a passagem do fluido que está no anular para o interior da bomba. Todo fluido que está acima do pistão é deslocado em direção a superfície. O fluido que está mais próximo à cabeça do poço entra na linha de produção, e nos ciclos seguintes é deslocado para o vaso separador.

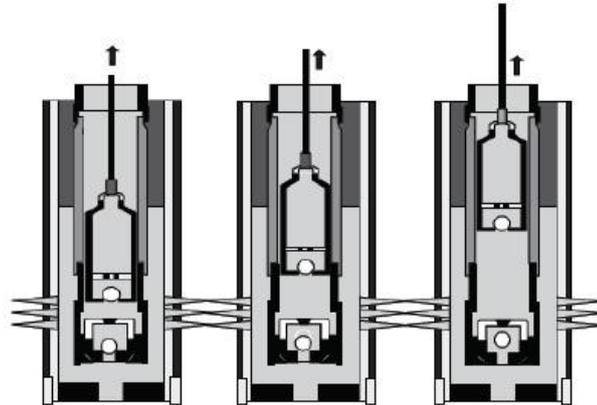


Figura 4 – Curso ascendente (OLIVEIRA, 2010).

No curso descendente, como o pistão continua descendo, a pressão interna na camisa da bomba aumenta devido a incompressibilidade dos fluidos. Quando a pressão interna supera a pressão acima do pistão, a válvula de passeio abre, permitindo a passagem de fluido para cima do pistão. Ao atingir o final do curso descendente e iniciar o curso ascendente, a válvula de passeio fecha e a de pé abre, iniciando um novo ciclo.

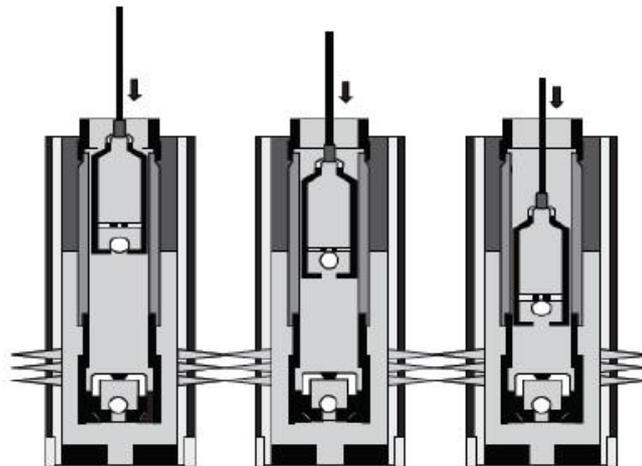


Figura 5 – Curso descendente (OLIVEIRA, 2010).

2.2.1.3. Carta dinamométrica

Para o acompanhamento do funcionamento de um sistema de bombeio mecânico são necessários testes de produção, registros de sonolog (acústico) e cartas dinamométricas. Com o avanço da automação, as cartas se tornaram, dentre os itens acima citados, o de mais fácil aquisição, tornando-se, assim, a principal ferramenta para avaliação das condições de bombeio.

Uma carta dinamométrica é nada mais do que um gráfico representando os efeitos gerados pela carga atuante na bomba, durante um ciclo de bombeio, ou seja, relaciona carga versus posição, conforme apresentado na Figura 6. Existem dois tipos de cartas dinamométricas: a carta de superfície, que mostra as cargas que atuam na haste polida; e a de fundo, que apresenta as cargas exercidas na bomba de fundo. As cargas são registradas na superfície através de dinamômetros e no fundo do poço através de dispositivos especiais ou através de modelos matemáticos (LIMA et al., 2009).

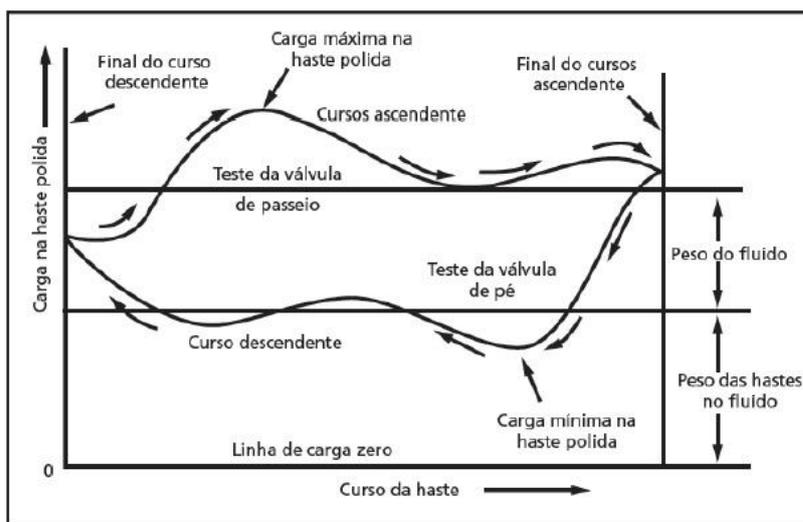


Figura 6 – Carta dinamométrica (COSTA, 2008).

Elas estão entre as principais ferramentas de análise e avaliação das condições de bombeio, registrando as cargas na haste polida ou no fundo em função do curso das hastes (LIMA et al., 2009). É possível observar diversas condições de bombeio através da carta dinamométrica. A partir da dela é possível obter várias informações de funcionamento do poço, tais como: estado da bomba, falhas no pistão e válvulas, rompimento de hastes de bombeio, furos em colunas de tubos, acúmulo de parafina, efeito do gás na bomba, dentre outros (Figura 7).

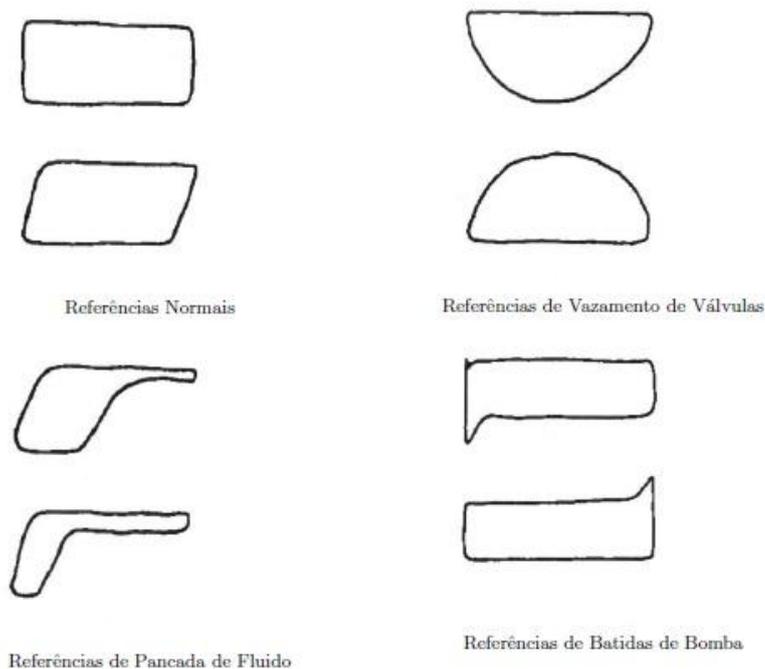


Figura 7 – Cartas dinamométricas de fundo típicas (LIMA et al., 2009).

A carta com Referências de Vazamentos de Válvulas apresenta uma leitura que quando a haste sobe puxando o fluido para a superfície a válvula de passeio ocorre falha, demonstrando irregularidade no processo. Desta forma, a válvula de passeio não veda para que a coluna suba com a produção havendo perda desta.

A carta com Referências de Pancada de Fluido apresenta uma leitura do bombeio em que a vazão do poço é menor do que a vazão da coluna de produção tem capacidade de absorver com isso muitas das vezes o bombeio é paralisado para compensar a perda do fluido e o custo do processo.

A carta com Referências de Batidas da Bomba mostra a falha que ocorre automaticamente quando o nível encontra-se na bomba. Quando a capacidade de elevação da bomba excede a vazão de alimentação do poço e o nível se apresenta na altura da bomba, em tal situação, a camisa da bomba não é preenchida totalmente e, no início do movimento descendente, a válvula de passeio não abre e o pistão permanece com todo o peso do fluido acima dele. Na seqüência do movimento, o pistão entra em contato com o fluido na camisa, porém, em alta velocidade, provocando um grande impacto que é transmitido até a superfície pela coluna de hastes. Esta situação é indesejável e pode causar diversos danos a estrutura do sistema.

3. METODOLOGIA

O acompanhamento da produção de um poço que utiliza o sistema de Bombeio Mecânico se dá, principalmente, pela análise dos resultados registrados nas cartas dinâmométricas. Contudo, utiliza-se um simulador de Bombeio Mecânico, cuja proposta básica é representar a dinâmica deste método de elevação artificial de petróleo, permitindo melhor compreensão das situações observadas em campo.

Nesse trabalho, utilizou-se o Total Well Management (TWM), da empresa Echometer, que é um sistema integrado para a aquisição de dados e diagnósticos para a elevação artificial que permite ao operador maximizar a produção de óleo e gás que, por sua vez, permite minimizar as despesas operacionais. A produtividade do poço, a pressão do reservatório, eficiência, equipamentos e cargas no desempenho do poço, são derivados de uma combinação de medições de pressão de superfície, dos níveis acústicos de fluidos, torque, potência de pressão transiente, etc. A figura 8 apresenta uma das telas do ambiente de trabalho desse software.

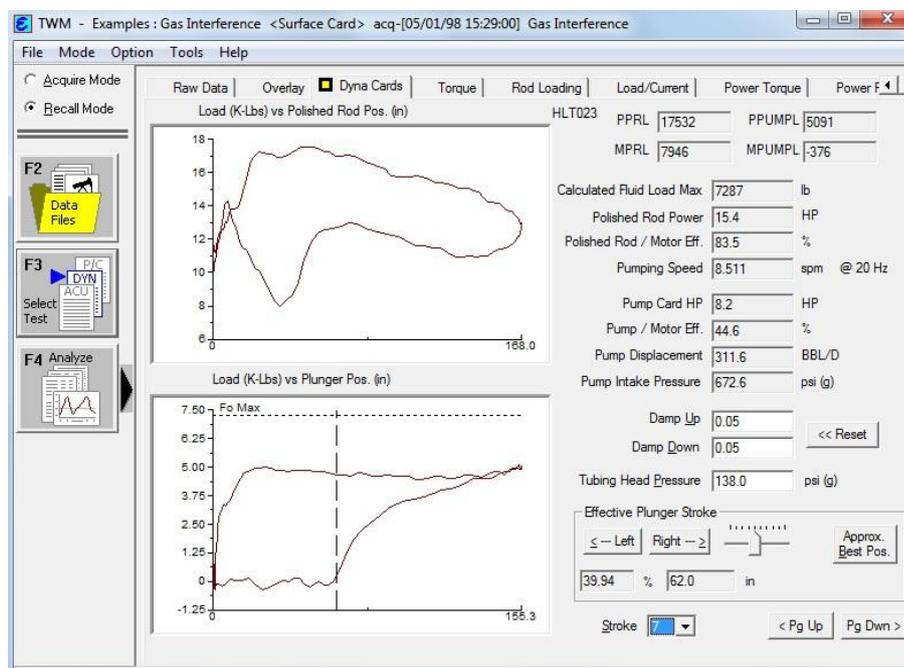


Figura 8 – Ambiente de trabalho do software TWM.

Nesse estudo foram avaliados três poços com características distintas, similares aos instalados nos campos do nordeste brasileiro. A tabela 1 apresenta algumas informações referentes a esses poços, que foram obtidas da biblioteca do software TWM.

Tabela 1 – Informações dos poços estudados.

	Poço A	Poço B	Poço C
Tipo da unidade de bombeio	Mark II M-640D-305-168	Convencional C-80DB-42-11.6	Convencional C-320-100-32
Vazão de produção de óleo (bbl/dia)	133	18	15
Vazão de produção de água (bbl/dia)	241	38	1
Vazão de produção de gás (Mscf/dia)	442	1,5	1
Temperatura de superfície (°F)	70	67	70
Temperatura de fundo (°F)	105	97	140
Grau API	34	35	40
Densidade da água	1,01	1,1	1,05
Densidade do gás	1,4241	0,5531	0,5531
Profundidade da formação (ft)	5390	3425	7110

A metodologia utilizada nesse trabalho está representada no esquema simplificado, o qual é ilustrado na Figura 9.

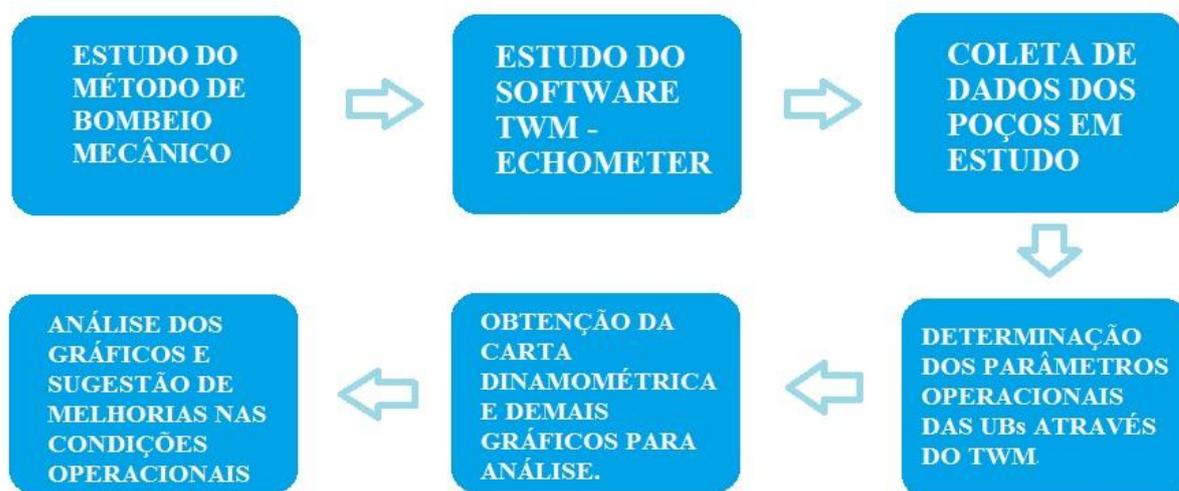


Figura 9 – Esquema simplificado da metodologia realizada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, os poços avaliados apresentam problemas. Através da utilização do TWM foi possível determinar alguns parâmetros relevantes para a operação das unidades de bombeio mecânico, conforme apresento na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros dos poços estudados.

	Poço A	Poço B	Poço C
PPRL (lbs)	17532	10423	14223
MPRL (lbs)	7946	4665	9340
PD da bomba (bbl/dia)	311,6	59,3	98,0
Potência (HP)	8,2	1,6	2,5

4.1. Interferência de gás

A interferência de gás significa um valor alto para a razão gás óleo (RGO) do poço. Geralmente, este fenômeno está associado à presença excessiva de gás na bomba e está intimamente ligado a uma ineficiência de separação de gás na entrada da bomba. O bloqueio de gás é considerado um dos principais problemas encontrados em sistemas de Bombeio Mecânico. Este problema resulta em uma produção ineficiente e em possíveis danos a estrutura mecânica do sistema. A análise das cartas dinamométricas é de fundamental importância na descoberta deste problema.

A Figura 10 apresenta as cartas dinamométricas obtidas para o poço A, sendo a primeira carta da carga (klbs) em função da posição da haste polida (in) e a segunda em função da posição do *plunger* (pistão) (in).

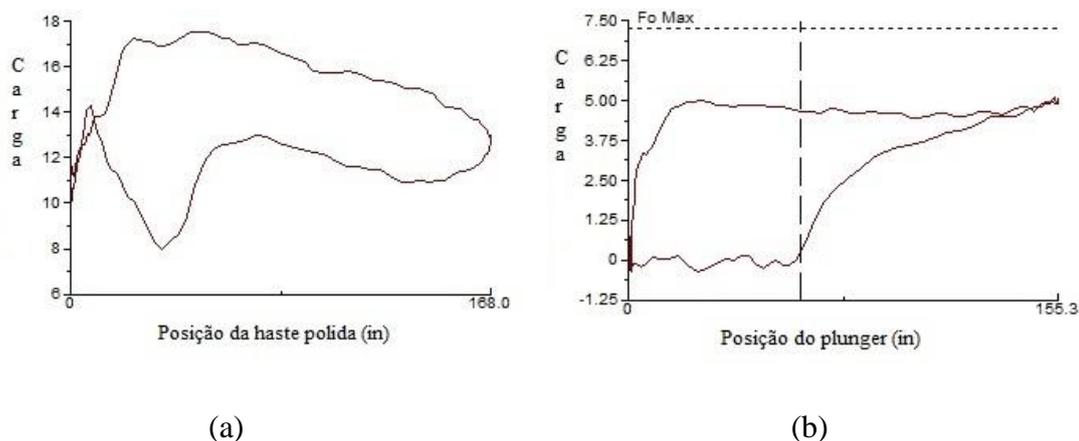


Figura 10 - (a) Carta dinamométrica da Carga (klbs) versus curso da haste polida (in) para o poço A e (b) Carta dinamométrica da Carga (klbs) versus curso do *plunger* (in) para o poço A.

Através das cartas dinamométricas do poço A, foi possível detectar o efeito do gás durante um ciclo de bombeio. Na subida do pistão, o óleo e o gás passaram para o interior da camisa. Na descida do pistão, o gás foi comprimido e a válvula de passeio abriu quando a pressão do gás atingiu a pressão da coluna de fluido acima do pistão. A carta apresenta um aspecto parecido com a de pancada de fluido, porém com uma curva mais suave no curso descendente, devido à compressibilidade do gás.

Por sua vez, a Figura 11 apresenta as curvas de Potência e Velocidade do *Plunger* em função do tempo. A partir dessas curvas, pode-se concluir que, quando o *plunger* está descendo, ou seja, quando sua velocidade está diminuindo, ele encontra o gás livre na camisa da bomba, aliviando assim a potência requerida pelo motor.

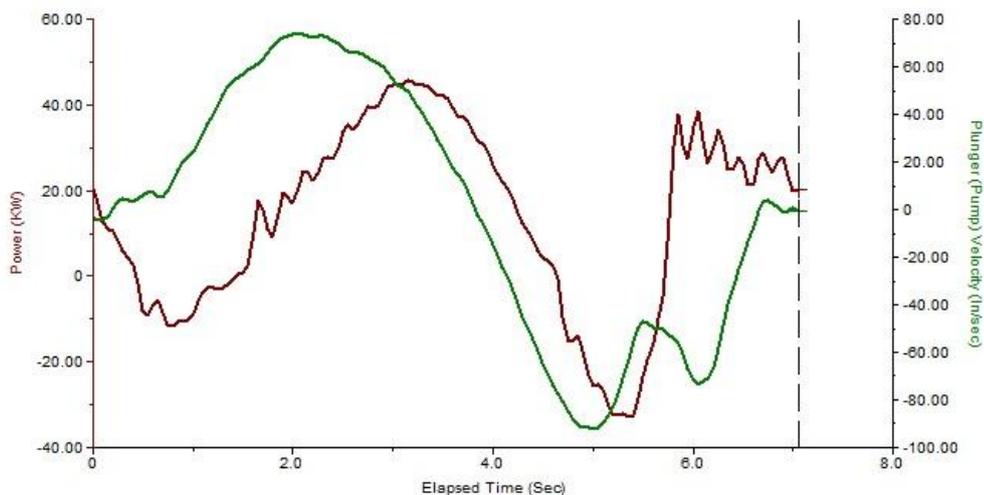


Figura 11 - Curvas de Potência (kW) e Velocidade do Plunger (in/s) em função do tempo (s) para o poço A.

Na Figura 12 são mostradas as curvas de torque da haste e PD (*pump displacement*) da bomba em função do tempo para o poço A, as quais indicam a interferência de gás. No tempo igual à 3,5 segundos, o ciclo de descida do *plunger* é iniciado. Neste momento, a válvula de passeio deveria abrir pela pressão da coluna hidrostática que se encontra abaixo dela, transferindo a carga da coluna de hastes para a válvula de pé. Porém, como a válvula encontra uma região de baixa pressão, ela não consegue abrir, e parte do ciclo de descida é feito com a válvula de passeio fechada, já que a pressão exercida pelo gás dentro da câmara não é suficiente para abri-la. Quando a válvula de passeio encontra a coluna de fluido, ela abre provocando um aumento da pressão (transferência de carga da válvula de passeio para a válvula de pé), entretanto neste momento o pistão já sofreu um deslocamento.

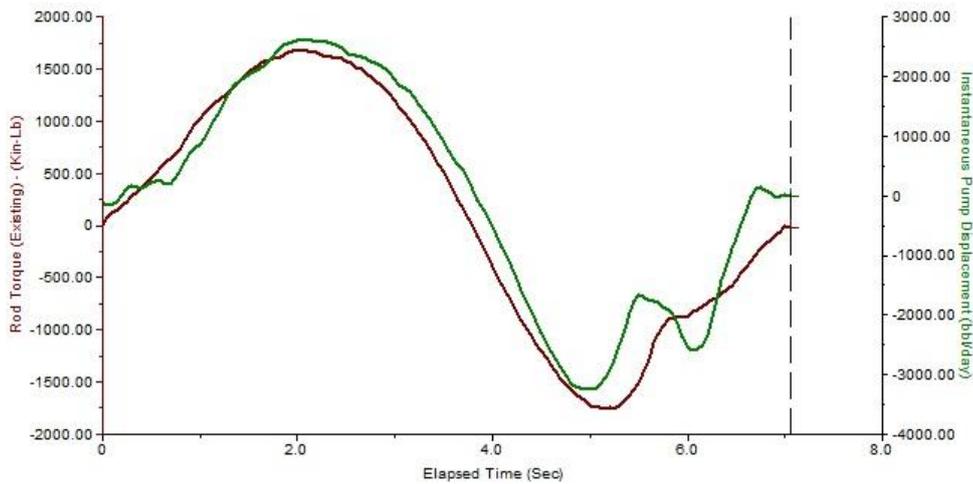


Figura 12 - Curvas de Torque da haste (kin-lb) e PD (*pump displacement*) da bomba (bbl/dia) em função do tempo (s) para o poço A.

Neste sentido, a Figura 12 nos permite concluir que a presença de gás na camisa da bomba provoca um prejuízo na produção de óleo, já que este fenômeno diminui o curso efetivo do pistão, comprometendo o enchimento da bomba, uma vez que a partir do tempo de 3,5 segundos o PD da bomba é negativo, quando deveria ser positivo. Sendo assim, quanto menor for o enchimento da bomba, o percurso do pistão sem encontrar o fluido será maior. Quanto ao torque, nesse período de tempo, pode-se observar que há uma queda devido ao movimento de descida do pistão (*plunger*), no qual sua velocidade diminui e ele encontra o gás livre na camisa da bomba provocando uma redução no torque na haste.

Dos testes com dinamômetro realizados, dois foram para testar as válvulas de pé e de passeio. A Figura 13 ilustra o referido teste para o poço A.

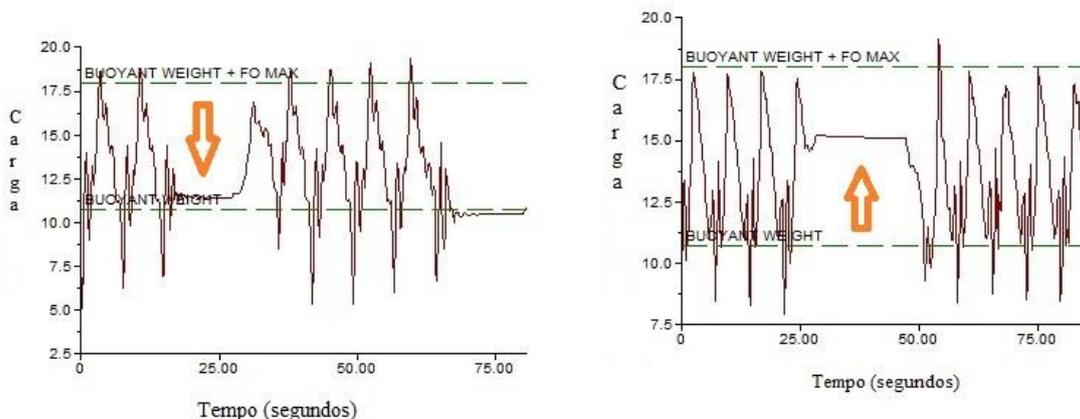


Figura 13 - Teste das válvulas de pé e de passeio para o poço A.

Caso existisse um decréscimo da carga registrada no teste da válvula de pé e de passeio, significaria que está ocorrendo vazamento. Todavia, nota-se na Figura 13 que a carga ao se realizar o teste, manteve estável (indicado em laranja). Desta forma, comprova-se a não existência de vazamento na válvula de pé e de passeio do poço A e exclui-se a possibilidade da mesma estar contribuindo para a baixa eficiência de produção.

Deve-se buscar uma solução para reduzir o percentual de gás livre na entrada da bomba, visando evitar a perda de eficiência e o bloqueio de gás. Sempre que possível é recomendável instalar a admissão da bomba abaixo dos canhoneados, aproveitando a separação natural do gás ou, ainda, instalar um separador de gás.

4.2. Pancada de fluido

A pancada de fluido ou *fluid Pound* ocorre quando o nível de fluido encontra-se no nível da bomba. Quando a capacidade de elevação da bomba excede a vazão de alimentação do poço e o nível se apresenta na altura da bomba, em tal situação, a camisa da bomba não é preenchida totalmente e, no início do movimento descendente, a válvula de passeio não abre e o pistão permanece com todo o peso do fluido acima dele. Na seqüência do movimento, o pistão entra em contato com o fluido na camisa, porém, em alta velocidade, provocando um grande impacto que é transmitido até a superfície pela coluna de hastes. Esta situação é indesejável e pode causar diversos danos à estrutura do sistema.

A Figura 14 apresenta as cartas dinamométricas obtidas para o poço B, sendo a primeira carta da carga (klbs) em função da posição da haste polida (in) e a segunda em função da posição do plunger (in).

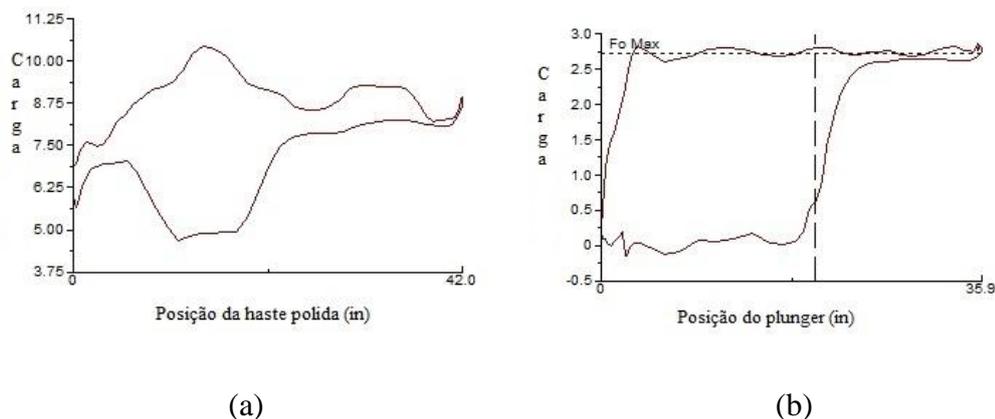


Figura 14 - (a) Carta dinamométrica da Carga (klbs) versus curso da haste polida (in) para o poço B e (b) Carta dinamométrica da Carga (klbs) versus curso do plunger (in) para o poço B.

Nas cartas dinamométricas do poço B, percebe-se claramente o efeito da Pancada de fluido, que ocorre quando o pistão se choca com o fluido no interior da camisa, decorrente do enchimento incompleto da mesma no curso ascendente. No movimento descendente, a coluna de hastes sofre uma violenta compressão e durante o choque com o fluido no interior da camisa, a válvula de passeio se abre, fazendo com que a coluna de hastes seja tracionada em um curto espaço de tempo. Essas tensões anormais causadas pela pancada de fluido se propagam por todo o equipamento, de tubulações e hastes até a unidade de bombeio.

Na figura 15 são mostradas as curvas de Toque da haste e PD (*pump displacement*) da bomba em função do tempo para o poço B, as quais caracterizam a pancada de fluido. No tempo igual a 2,5 segundos, o ciclo de descida é iniciado. Neste momento, a válvula de passeio deveria abrir pela pressão da coluna hidrostática que se encontra abaixo dela, transferindo a carga da coluna de hastes para a válvula de pé. Porém, como a válvula encontra uma região de baixa pressão, ela não consegue abrir, e parte do ciclo de descida é feito com a válvula de passeio fechada, já que a pressão exercida pelo ar dentro da câmara não é suficiente para abri-la. Quando a válvula de passeio encontra a coluna de fluido, ela abre provocando um aumento da pressão (transferência de carga da válvula de passeio para a válvula de pé), entretanto, neste momento, o pistão já sofreu um deslocamento.

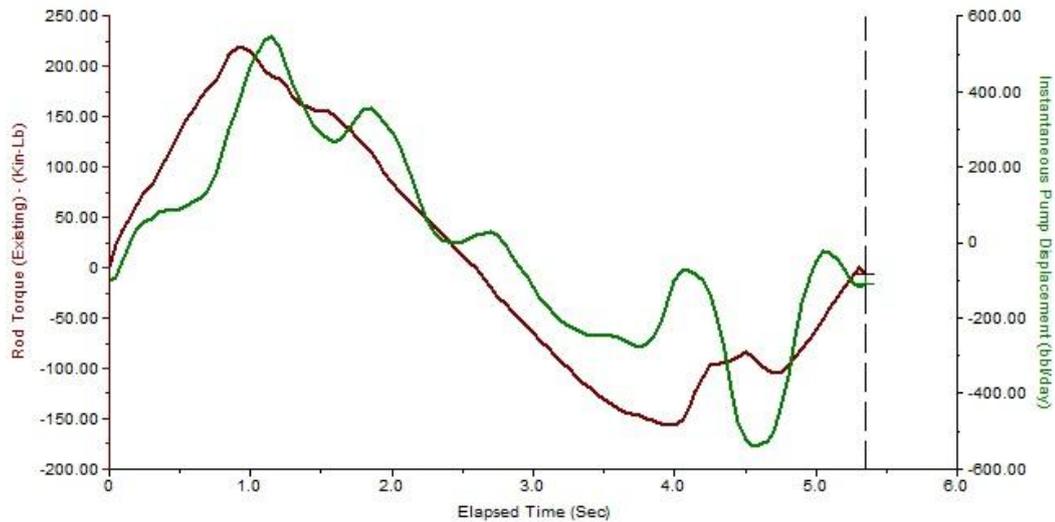


Figura 15 - Curvas de Torque da haste (kin-lb) e PD (*pump displacement*) da bomba (bbl/dia) em função do tempo (s) para o poço B.

Com o auxílio da Figura 15 conclui-se que a pancada de fluido provoca naturalmente um prejuízo na produção de óleo, já que existe uma relação indireta entre intensidade da pancada e enchimento da bomba, pois a partir do tempo igual a 2,5 segundos o PD da bomba é negativo, quando deveria ser positivo. Fica claro, portanto, que quanto menor for o enchimento da bomba, o percurso do pistão sem encontrar o fluido será maior, e conseqüentemente a aceleração do pistão no instante do impacto com o fluido no interior da câmara será maior, o que ocasionará certamente um maior desgaste dos componentes da bomba de fundo. Em relação ao parâmetro torque, nesse período de tempo, pode-se observar que há uma queda devido ao movimento de descida do *plunger*, no qual sua velocidade diminui e ele encontra o ar que ocupa o lugar do fluido na camisa da bomba, provocando uma redução no torque na haste.

A Figura 16 apresenta as curvas de velocidade da haste polida e do *plunger* em função do tempo, para o poço B. Em uma situação normal de bombeio, as curvas estariam sobrepostas, porém, devido à presença de ar na camisa da bomba, ocupando o lugar do fluido, a velocidade do *plunger* oscila em torno da velocidade da haste polida.

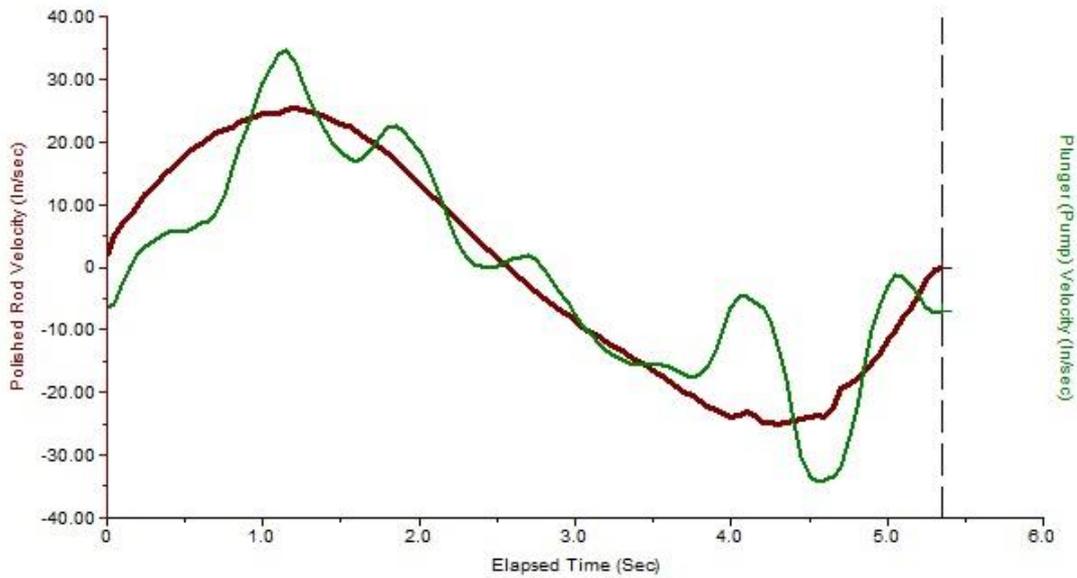


Figura 16 - Curvas de Velocidade da Haste Polida (in/s) e Velocidade do *Plunger* (in/s) em função do tempo (s) para o poço B.

Dos testes com dinamômetro realizados, dois foram para testar as válvulas de pé e passeio. A Figura 17 ilustra o referido teste para o poço B.

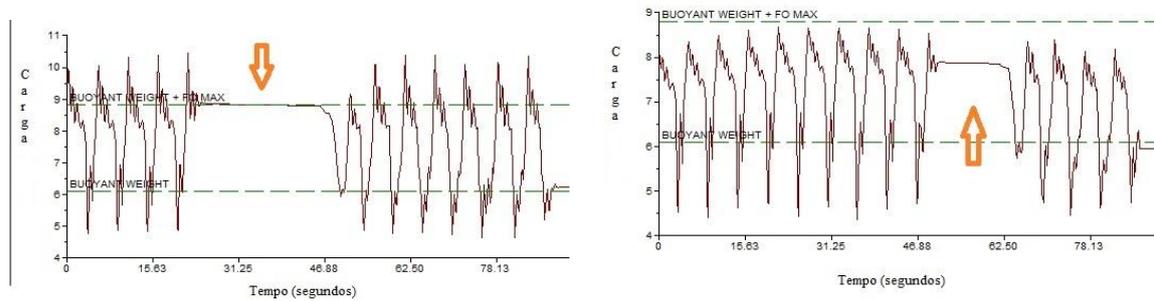


Figura 17 - Teste das válvulas de pé e de passeio para o poço B.

Caso existisse um decréscimo da carga registrada no teste da válvula de pé e de passeio, significaria que está ocorrendo vazamento. Todavia, nota-se na Figura 17 que a carga ao se realizar o teste, se manteve estável (indicado em laranja). Desta forma, comprova-se a não existência de vazamento na válvula de pé e de passeio do poço B, excluindo a possibilidade da mesma estar contribuindo para a baixa eficiência de produção.

As soluções mais prováveis para reverter essa situação são: posicionar a bomba abaixo dos canhoneados (âncora natural); trabalhar com bombas de pequeno curso, com menor espaço morto entre as válvulas de pé e de passeio, sem *niple* de extensão inferior;

preferir bombas de menores diâmetros; instalar separador de gás; e direcionar coleta de gás do revestimento para um sistema de baixa pressão.

Deve-se buscar uma solução para reduzir o espaço morto entre as válvulas de pé e de passeio, e isso pode ser alcançado trabalhando com bombas de pequeno curso.

4.3. Vazamento na coluna de produção

A Figura 18 apresenta as cartas dinamométricas obtidas para o poço C, sendo a primeira carta da carga (klbs) em função da posição da haste polida (in) e a segunda em função da posição do plunger (in).

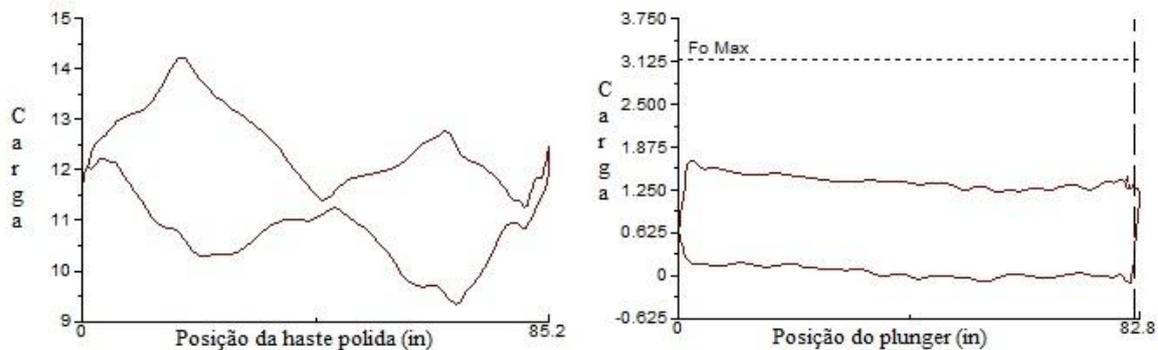


Figura 18 - (a) Carta dinamométrica da Carga (klbs) versus curso da haste polida (in) para o poço A e (b) Carta dinamométrica da Carga (klbs) versus curso do *plunger* (in) para o poço C.

Através das cartas dinamométricas do poço C, detecta-se vazamento na coluna de produção. No curso ascendente, o fluido entra na camisa da bomba. Porém, observa-se na carta da haste polida que há queda acentuada na carga logo após o início desse curso. Isso indica presença de vazamento.

A Figura 19 nos permite concluir que o vazamento na coluna de produção provoca um prejuízo na produção de óleo, já que isso diminui a quantidade de óleo produzido. Isso pode ser observado a partir do tempo igual a 4 segundos, em que o PD da bomba é negativo, quando deveria ser positivo. Quanto à carga na haste polida, nesse período de tempo, pode-se observar que há uma queda devido ao vazamento.

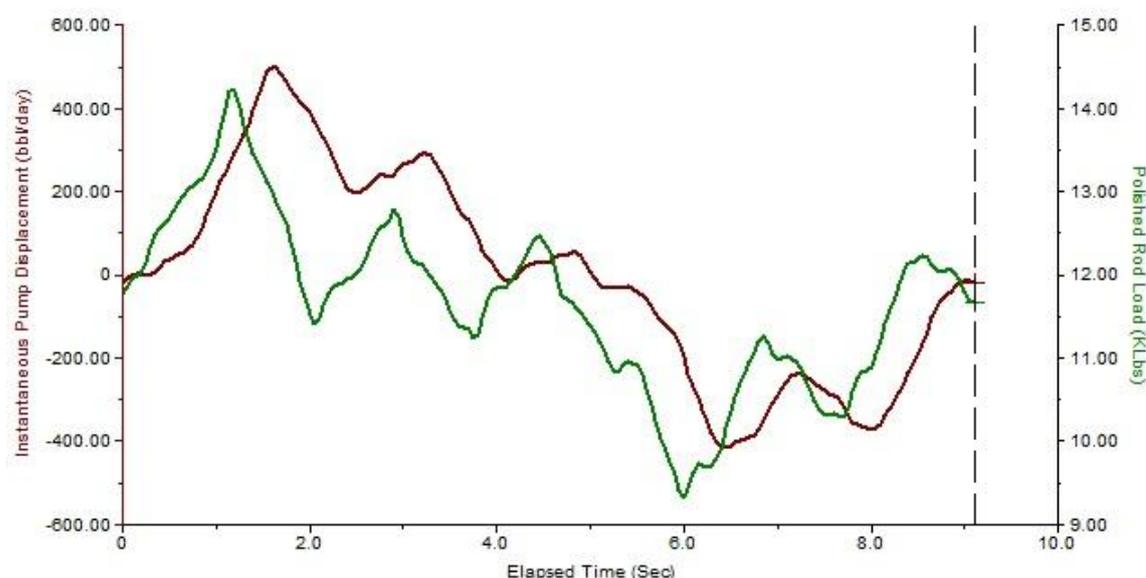


Figura 19 - Curvas de PD (pump displacement) da bomba (bbl/dia) e de Carga na haste polida (KLbs) em função do tempo (s) para o poço.

Dos testes realizados com dinamômetro, dois foram para testar as válvulas de pé e passeio. A Figura 20 ilustra o referido teste para o poço C.

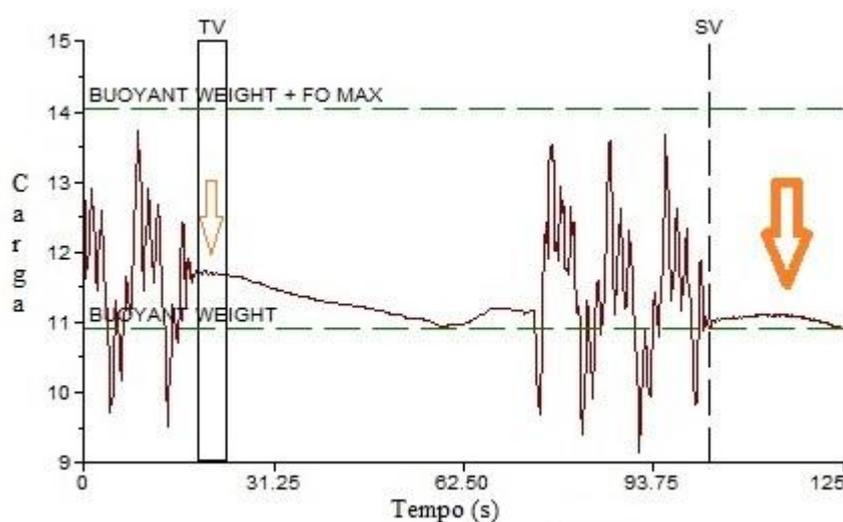


Figura 20 - Teste das válvulas de passeio e de pé para o poço C.

Caso existisse um decréscimo da carga registrada no teste da válvula de pé e de passeio, significaria que está ocorrendo vazamento nas válvulas. Todavia, nota-se na Figura 20 que a carga, ao se realizar o teste, se manteve estável (indicado em laranja). Desta forma, comprova-se a não existência de vazamento na válvula de pé e de passeio do poço C, excluindo a possibilidade da mesma estar contribuindo para a baixa eficiência de produção.

Deve-se buscar uma solução para cessar esse vazamento, visando evitar a perda de eficiência. Suspeitando de um provável vazamento na coluna de produção ou no revestimento, a água produzida deve ser analisada e comparada com a água da formação, confirmando, ou não, a hipótese de furo na coluna de produção ou revestimento. A localização do vazamento pode ser feita com: perfis de fluxo, perfis de temperatura ou testes seletivos de pressão usando obturador e tampão mecânico recuperável.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar problemas nos três poços analisados.

No poço A, detectou-se o efeito do gás no bombeio mecânico, o qual é bastante prejudicial, pois produz dois efeitos: ocupa o espaço dentro da bomba, reduzindo o espaço para o óleo, e interfere no funcionamento das válvulas de pé e de passeio.

No poço B, detectou-se o efeito da pancada de fluido que ocorre por consequência do incompleto enchimento da camisa no curso ascendente, provocando choque entre o pistão e o fluido contido na camisa da bomba.

No poço C, detectou-se o vazamento na coluna de produção que ocorre por consequência de furo na coluna, provocando perda de vazão de produção e eficiência. Portanto, comprova-se a importância da carta dinamométrica e das demais curvas estudadas para a análise do desempenho de unidades de Bombeio Mecânico.

Portanto, para a solução do problema detectado no poço A, pode-se posicionar a bomba abaixo dos canhoneados, direcionar coleta de gás do revestimento para um sistema de baixa pressão, ou pode-se instalar separador de gás. Já para o poço B, pode-se trabalhar com bombas de longo curso (com menor espaço morto entre as válvulas de pé e de passeio). E para o poço C, deve-se buscar a localização do vazamento que pode ser feita com: perfis de fluxo, perfis de temperatura ou testes seletivos de pressão usando obturador e tampão mecânico recuperável; e conseqüentemente, a substituição ou reparo da completação.

6. REFERÊNCIAS

- API RP 11L – Recommended Practice For Design Calculations for Sucker Rod Pumping Systems – American Petroleum Institute (4th Ed.), Dallas, 1988, reaffirmed in 2000.
- COSTA, R.O. O Curso de Bombeio Mecânico. Petrobras, 2008.
- ESTEVAM, V. Panorama das Atividades de Bombeio Mecânico. V Encontro de Bombeio Mecânico e Cavidades Progressivas. Natal, RN: Petrobras, 2006.
- LAKE, Larry W., CLEGG, Joe D., et al. Petroleum Engineering Handbook. SPE, 2007.
- LIMA, et al. Detecção de falhas no sistema de Bombeio Mecânico utilizando descritores de Fourier e ferramentas estatísticas. Aracaju, SE: Petrobras, 2009.
- NASCIMENTO, João M. Araújo. Simulador Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico. Dissertação (Mestrado), UFRN, Natal, RN, 2005.
- OLIVEIRA, R. C. Elevação Artificial de Petróleo – Bombeio Mecânico com Haste (BMH). Apostila, Aracaju, 2010.
- SOUZA, et al. Aplicação do Bombeio Mecânico com hastes na Elevação de Petróleo. Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas. Sergipe, 2013.
- THOMAS, José E. et al. Fundamentos da Engenharia de Petróleo. 2ª Ed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2004.
- <http://www.echometer.com>