



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE - UFRN

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO DA MEDIÇÃO DA VAZÃO DE LÍQUIDO A PARTIR DA CARTA
DINAMOMÉTRICA DE FUNDO**

Natália Nóbrega

Orientador: Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa

NATAL-RN
NOVEMBRO/2014

NATÁLIA NÓBREGA

**ESTUDO DA MEDIÇÃO DA VAZÃO DE LÍQUIDO A PARTIR DA CARTA
DINAMOMÉTRICA DE FUNDO**

Trabalho de Conclusão de Curso
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.

Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa
Orientador- UFRN

Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
Membro Examinador- UFRN

Dr. Benno Waldemar Assmann
Membro Examinador- Petrobras

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais,
Ilka e William, ao meu irmão, Tezeus,
e a minha avó, Luiza.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela dádiva da vida e por estar sempre iluminando o meu caminho;

Aos meus pais William e Ilka e meu irmão Tezeus, por exemplo de força e determinação e estarem sempre ao meu lado para tudo;

A todos meus familiares (avós, tios, tias, primos e primas), pelas palavras positivas, apoio incondicional e sempre acreditarem em mim;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa, por todos os ensinamentos, orientações, incentivo e confiança;

Ao Eng. Antônio Júnior, pela dedicação, paciência e contribuição para esse trabalho;

Aos meus professores de Engenharia do Petróleo, por todo conhecimento transmitido;

Aos meus amigos, pelo apoio, incentivo e carinho;

À Petrobras, pelos dados disponibilizados.

RESUMO

A elevação artificial é necessária uma vez que a pressão do reservatório é consideravelmente baixa e os fluidos não conseguem escoar livremente até a superfície ou ainda quando a vazão de operação está inferior à vazão comercial esperada no projeto, requerendo assim uma energia suplementar. Dentre os métodos de elevação artificial existentes, o bombeio mecânico merece destaque, pois apresenta boa eficiência energética, baixos custos com investimento e manutenção e grande aplicabilidade no mundo inteiro. Para análise desse método, a carta dinamométrica é a ferramenta mais importante a ser utilizada, pois fornece informações qualitativas e quantitativas das condições de bombeio. Dessa maneira, o presente trabalho realizou estudo para a determinação da vazão de líquido a partir da carta dinamométrica de fundo. Para tanto, foi implementado algoritmo numérico para geração da carta de fundo através de programação em VBA (Visual Basic Advanced), seguido de cálculos da vazão de líquido na superfície. A estimativa da vazão bruta em conjunto com outros parâmetros é extremamente importante, pois permite o controle da produção e conseqüente retorno dos investimentos.

Palavras-chave: elevação artificial, bombeio mecânico, carta dinamométrica, vazão de líquido.

ABSTRACT

The artificial lift is required when the reservoir pressure is considerably low and the fluids can not flow freely to the surface or when the flow rate of operation is lower than expected in commercial flow rate of design, thereby requiring additional energy. Among the existing methods of artificial lift, the sucker rod pumping is relevant, because it offers good energy efficiency, low investment and maintenance low costs and great applicability worldwide. For analysis of this method, the dynamometer card is the most important tool to be used because it provides qualitative and quantitative information of the pumping conditions. Thus, this work developed study to determine the flow rate of liquid from the downhole dynamometer card. Therefore, it was implemented numerical algorithm for generating the downhole dynamometer card programmatically in VBA (Visual Basic Advanced), followed by calculations of flow rate of liquid on the surface. The estimated of flow rate of fluid in conjunction with other parameters is extremely important, because it allows the control of production and consequent return on investment.

Keywords: artificial lift, sucker rod pumping, dynamometer card, flow rate of liquid.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos específicos	17
2 ASPECTOS TEÓRICOS	19
2.1 Propriedades dos Fluidos.....	19
2.1.1 Fração de água.....	19
2.1.2 °API.....	19
2.1.3 Razão de Solubilidade	20
2.1.4 Razão Gás-Óleo	20
2.1.5 Fator de compressibilidade	21
2.1.6 Fator volume de formação	22
2.2 Elevação de petróleo	23
2.3 Bombeio Mecânico.....	24
2.3.1 Bomba de fundo ou de subsuperfície	25
2.3.1.1 Deslocamento volumétrico	26
2.3.1.2 Eficiência volumétrica	27
2.3.2 Descrição do ciclo de bombeio	29
2.3.3 Coluna de hastes	30
2.3.4 Unidade de Bombeio	31
2.3.5 Carta dinamométrica.....	33
2.3.5.1 Cartas dinamométricas de fundo de referências	34
2.3.6 Algoritmo da carta de fundo.....	35
3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO PARA OBTENÇÃO DA CARTA DE FUNDO.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5 CONCLUSÕES	52
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
7 ANEXO	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Sistema de Bombeio Mecânico

Figura 2- Bomba de fundo

Figura 3- Funcionamento da bomba de fundo

Figura 4- Componentes da Unidade de Bombeio

Figura 5- Carta dinamométrica de superfície

Figura 6- Cartas dinamométricas de fundo de referências

Figura 7- Fluxograma do algoritmo da carta de fundo

Figura 8- Tela inicial

Figura 9- Dados de entrada

Figura 10- Carta dinamométrica de fundo

Figura 11- Comparação de carta de fundo

Figura 12- Cartas dinamométricas

Figura 13- Dados de saída

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação do óleo em função do seu ⁰API

Tabela 2- Peso linear das hastes no ar

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - Área transversal da haste (pol²)

A_{an} - área do anular (pés²)

ANP - Agência Nacional de Petróleo

API- *American Petroleum Institute*

A_p - área do pistão (pol²)

BSW- *Basic Sediments and Water*

B - fator volume de formação

B_g - fator volume de formação do gás (pés³/scf)

$B_G(P_{suc}, T)$ - fator volume do gás na pressão de sucção e temperatura da bomba (m³/m³ std)

B_o - fator volume de formação do óleo (bbl/stb)

$B_o(P_{suc}, T)$ - fator volume do óleo na pressão de sucção e temperatura da bomba (m³/m³ std)

B_w - fator volume de formação da água (bbl/stb)

$B_w(P_{suc}, T)$ - fator volume da água produzida, na pressão de sucção e temperatura da bomba (m³/m³ std)

c - coeficiente de amortecimento (s⁻¹)

CPM- frequência de bombeio (ciclos por minuto)

d_f - densidade do fluido (adimensional)

d_g - densidade relativa do gás (adimensional)

d_o - densidade relativa do óleo (adimensional)

d_w - densidade relativa da água (adimensional)

d_p - diâmetro do pistão (pol)

E - Módulo de elasticidade de Young (lbf/ pol²)

E_s - eficiência de separação de gás no fundo

E_v - eficiência volumétrica (adimensional)

F- Carga da haste polida (lbf)

F_{PR} - Carga dinâmica da haste polida (lbf)

f_w - fração de água (adimensional)

g - aceleração da gravidade (pés/s²)

g_c - fator de conversão unitário (lbf·pés) / (lbf·s²)

h_d - nível dinâmico (m)

I_{dc} - diâmetro interno do revestimento (pol)

L_b - Assentamento da bomba (pés)

L_{bm} - Assentamento da bomba (m)

L_{ph} - comprimento parcial das hastes (pés)

L_h - comprimento das hastes (pés)

N- frequência de bombeio (CPM)

O_{dt} - diâmetro externo da coluna de produção (pol)

p - pressão (psia)

PD- deslocamento volumétrico (pol³/dia ou m³/dia)

p_{pc} - pressão pseudocrítica (psia)

p_{pr} - pressão pseudoreduzida (adimensional)

p_s - pressão de sucção (psi)

p_{rev} - pressão no revestimento (psi)

Q_b - vazão bruta de líquidos a ser obtida na superfície (pol³/dia ou m³/dia)

q_l - vazão de líquidos (stb/d)

q_{wsc} - vazão de água medida em condição padrão de pressão e temperatura

q_{osc} - vazão de óleo medida em condição padrão de pressão e temperatura

R_s – razão de solubilidade (scf/stb)

$R_s(P_{suc}, T)$ - razão de solubilidade do gás no óleo na pressão de sucção e temperatura da bomba (m^3/m^3 std)

RAO - Razão Água-Óleo (adimensional)

RGO - Razão Gás-Óleo (scf/stb)

RGO_b - Razão Gás-Óleo de produção (m^3/m^3 std)

S_p - curso do pistão (pol)

T - temperatura ($^{\circ}F$)

T_t - período (s)

T_{pc} - temperatura pseudocrítica ($^{\circ}R$)

T_{pr} - temperatura pseudoreduzida (adimensional)

T_r - temperatura ($^{\circ}R$)

u - Elongação da haste (pés)

UB- Unidade de Bombeio

v - Velocidade de propagação da força nas hastes (pés/s)

$V(p, T)$ - volume de um fluido a uma dada pressão e temperatura

v_b - velocidade terminal da bolha ascendente (pés/s)

V_c - volume deslocado em um ciclo (pol³)

$V_{g\ dissolvido}$ - volume de gás dissolvido em uma dada pressão e temperatura

$V_{g\ sc}$ - volume de gás livre em condição padrão de pressão e temperatura

$V_{o\ sc}$ - volume de óleo em condição padrão de pressão e temperatura

V_{sc} - volume em condição padrão

v_{sl} - velocidade superficial do líquido (pés/s)

W - peso da coluna de hastes no ar (lbf)

W_p - peso da coluna no fluido (lbf)

W_r - peso linear da coluna de hastes no ar (lbf/ pés)

Z - fator de compressibilidade (adimensional)

Δt - intervalo do tempo (s)

Δx - elemento de discretização das seções das hastes no sentido axial (pés)

$\overline{\Delta x}$ - elemento de discretização da coluna de hastes (pés)

σ - tensão interfacial (lb/s²)

ρ - massa específica das hastes (lbm/ pés³)

ρ_g - massa específica do gás (lbm/ pés³)

ρ_l - massa específica do líquido (lbm/ pés³)

Sobrescritos + refere-se ao elemento abaixo do elemento de interesse

Sobrescritos - refere-se ao elemento acima do elemento de interesse

Subescritos i está relacionado com a distância axial

Subescritos j está relacionado com o tempo

Capítulo 1

Introdução

1 INTRODUÇÃO

A elevação artificial é uma atividade da área de exploração e produção de petróleo que reúne tecnologias responsáveis por proporcionar a energia exigida pelo escoamento dos fluidos produzidos desde fundo do poço até o sistema de produção na superfície; além de reduzir a pressão de fluxo no fundo do poço, maximizando a vazão de produção. Essa atividade é necessária uma vez que a pressão do reservatório é consideravelmente baixa e os fluidos não conseguem escoar livremente até a superfície ou ainda quando a vazão de operação está inferior à vazão comercial esperada no projeto, requerendo assim uma energia suplementar.

Os variados métodos de elevação artificial desenvolvidos até os dias atuais são aplicados levando em consideração as características particulares dos poços. Além do mais, a designação específica de um método de elevação artificial para um poço ou campo de petróleo é complexa e envolve uma série de fatores, tais como: diâmetro do revestimento, produção de areia, razão gás-líquido, viscosidade dos fluidos, profundidade do reservatório, vazão de produção, mecanismo de produção do reservatório, disponibilidade de energia, acesso aos poços, equipamento disponível, custo operacional, investimento, segurança, entre outros fatores (TAKÁCS, 2003).

É válido ressaltar que cada método de elevação artificial em si apresenta suas vantagens e desvantagens. Portanto, uma análise técnica preliminar é essencial para determinar os métodos tecnicamente viáveis conforme o cenário de aplicação. Atrelada a isso, deve ser realizado ainda um estudo econômico para selecionar a melhor alternativa.

Dentre os métodos de elevação artificial existentes, o bombeio mecânico merece destaque, pois apresenta boa eficiência energética, baixos custos com investimento e manutenção e grande aplicabilidade no mundo inteiro. Estima-se que 71% da elevação artificial de hidrocarbonetos líquidos no mundo utilize o sistema de bombeio mecânico. No Brasil, 73,5% dos poços produtores de petróleo são equipados com o bombeio mecânico (PETROBRAS, citado por LIMA, 2014). Esse método fornece energia para escoamento do fluido através

de uma bomba de deslocamento positivo, do tipo alternativa, localizada no fundo do poço e acionada por um motor elétrico ou de combustão interna na superfície. O movimento alternativo é resultado da conversão do movimento de rotação do motor através de uma unidade de bombeio e transmitido ao pistão da bomba de fundo por meio de uma coluna de hastes.

Outras vantagens ligadas ao bombeio mecânico reforçam sua importância, tais como: aplicabilidade numa grande faixa de vazão (até 300 m³/d) e larga faixa de temperatura, capacidade de operação com fluidos de diferentes composições e viscosidades, facilidade de diagnóstico de problemas e robustez tecnológica, baixo custo de equipamentos de fundo e a longa vida da unidade de bombeio (componente mais caro do sistema de bombeio mecânico).

A carta dinamométrica é um instrumento valioso na análise de desempenho operacional do bombeio mecânico. Tais cartas são obtidas na superfície através de registro dos esforços axiais atuantes na haste polida durante um ciclo de bombeio pelo equipamento denominado dinamômetro. Atualmente, são ainda calculadas cartas de fundo do poço a partir de informações da superfície e do esquema mecânico do poço, pois as cartas de superfície apresentam algumas distorções em relação à carta de fundo, o que as tornam inadequadas para análise. A carta dinamométrica de fundo é o registro das cargas exercidas na bomba de fundo à medida que ocorre o seu deslocamento. Muitas informações qualitativas e quantitativas podem ser adquiridas a partir da interpretação dessa carta de fundo. As informações qualitativas referem-se às condições de operacionalidade do sistema, tais como: falhas no pistão, vazamento das válvulas, estado da bomba, furos na coluna de tubos, rompimento de haste de bombeio, presença de parafina, efeito de gás na bomba, entre outros. Já as informações quantitativas são a vazão bruta na superfície e nível dinâmico.

O escopo do presente trabalho é a implementação do cálculo da carta de fundo a partir da carta dinamométrica de superfície para posteriormente ser determinada a vazão de líquido na superfície. A obtenção dessa vazão por esse modelo pode vir a reduzir o número de testes de produção convencionais,

que muitas vezes não atendem uma demanda grande de poços. Isso porque não é viável em termos logísticos, isto é, número de tanques limitados, equipamentos insuficientes, entre outros.

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro refere-se à introdução e objetivos, o segundo apresenta os aspectos teóricos essenciais para a elaboração do trabalho. Em seguida, é abordada a metodologia e o desenvolvimento do algoritmo da carta dinamométrica de fundo. Posteriormente, são apresentados os resultados e discussões, seguidos da conclusão. Por fim, são expostas as referências bibliográficas.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo realizar o estudo para a determinação da vazão de líquido a partir da carta dinamométrica obtida de sistema supervisor de automação de poços. Para tanto, foi implementado algoritmo numérico para geração da carta de fundo através de programação em VBA (Visual Basic Advanced).

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Implementação de algoritmo para geração da carta dinamométrica de fundo;
- Determinação da vazão de líquido a partir de carta dinamométrica de fundo, características de fluidos, esquema mecânico do poço e condições operacionais;

Capítulo 2
Aspectos teóricos

2 ASPECTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, foram apresentados os aspectos teóricos fundamentais para o entendimento e desenvolvimento do que foi realizado nesse trabalho.

2.1 Propriedades dos Fluidos

Neste tópico, foram apresentadas as principais propriedades de fluidos bem como algumas correlações empíricas que são de extrema relevância para esse trabalho.

Tais propriedades auxiliaram diretamente na determinação da vazão bruta do sistema de bombeio mecânico, como será visto nas seções subsequentes.

2.1.1 Fração de água

A fração de água, f_w , é a relação entre a vazão de água e a vazão total de líquidos (água e óleo) medidas em condição padrão de pressão e temperatura. A fração de água também é conhecida como BSW e pode ser expressa como:

$$f_w = \frac{q_{wsc}}{q_{wsc} + q_{osc}} \quad (1)$$

2.1.2 °API

Na indústria petrolífera, é muito comum o uso do termo grau API, que serve como base de classificação do óleo. Assim, o °API pode ser obtido através de:

$$°API = \frac{141,5}{d_o} - 131,5 \quad (2)$$

A Agência Nacional de Petróleo (2000) ainda classifica o óleo de acordo com seu $^{\circ}\text{API}$, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Classificação do óleo em função do seu $^{\circ}\text{API}$

$^{\circ}\text{API}$	Densidade (20 °C/ 20 °C)	Tipo do óleo
≥ 31	$\leq 0,87$	Leve
$22 \leq ^{\circ}\text{API} < 31$	$0,87 < d_o \leq 0,92$	Mediano
$10 \leq ^{\circ}\text{API} < 22$	$0,92 < d_o \leq 1$	Pesado
< 10	> 1	Extrapesado

Fonte: Adaptado de ANP, 2000.

2.1.3 Razão de Solubilidade

Por definição, razão de solubilidade de uma mistura líquida de hidrocarbonetos (R_s), a uma certa condição de pressão e temperatura, é a relação entre o volume de gás que está dissolvido (expresso em condições de superfície) e o volume de óleo que será obtido da mistura (THOMAS, 2001).

A razão de solubilidade pode ser definida por:

$$R_s = \frac{V_g \text{ dissolvido}}{V_o \text{ sc}} \quad (3)$$

A correlação de Standing é capaz de estimar a razão de solubilidade através da seguinte expressão:

$$R_s = d_g \left[\frac{p}{18} \cdot 10^{(0,0125\text{API} - 0,00091T)} \right]^{1,204819} \quad (4)$$

2.1.4 Razão Gás-Óleo

A Razão Gás-Óleo, RGO , é a relação entre o volume de gás livre e o volume de óleo, ambos em condição padrão. A Razão Gás-Óleo é definida como:

$$RGO = \frac{V_{g\ sc}}{V_{o\ sc}} \quad (5)$$

2.1.5 Fator de compressibilidade

O fator de compressibilidade, Z , representa o desvio de comportamento de um gás real em relação ao de um gás ideal. Esse fator pode ser expresso em função da correlação de Papay, sendo:

$$Z = 1 - \frac{3,52p_{pr}}{10^{0,9813T_{pr}}} + \frac{0,274p_{pr}^2}{10^{0,8157T_{pr}}} \quad (6)$$

Onde:

$$p_{pr} = \frac{p}{p_{pc}} \quad (7)$$

$$T_{pr} = \frac{T_r}{T_{pc}} \quad (8)$$

Das Equações 7 e 8, p e T_r são valores fornecidos. Já a pressão e temperatura pseudocríticas podem ser estipuladas aplicando a correlação de Brown et al, como segue:

$$p_{pc} = 708,75 - 57,5d_g \quad (9)$$

$$T_{pc} = 169 + 314d_g \quad (10)$$

2.1.6 Fator volume de formação

O fator volume de formação de um fluido (água, óleo ou gás) é a razão entre o volume do fluido a uma dada pressão e temperatura e o volume em condição padrão. A Equação 11 expressa o fator volume de formação:

$$B = \frac{V(p,T)}{V_{sc}} \quad (11)$$

Para água, óleo e gás os fatores volume formação são referenciados respectivamente por B_w , B_o e B_g .

A correlação de Gould pode estipular o fator volume formação da água, como segue:

$$B_w = 1 + 1,21 \cdot 10^{-4} T_x + 10^{-6} T_x^2 - 3,33 \cdot 10^{-6} p \quad (12)$$

Onde:

$$T_x = T - 60 \quad (13)$$

O fator volume de formação do óleo também pode ser obtido utilizando a correlação de Standing:

$$B_o = 0,972 + 0,000147 F^{1,175} \quad (14)$$

Em que:

$$F = R_s \sqrt{\frac{d_g}{d_o}} + 1,25T \quad (15)$$

Essa correlação para o fator volume de formação do óleo é válida para pressões inferiores a pressão de bolha, visto que, nos casos em que a pressão for superior a pressão de bolha, o comportamento de B_o é basicamente linear, em função da compressibilidade do fluido, já que não existe liberação de gás.

Por fim, o fator volume formação do gás é obtido a partir da equação de estado para o gás real, levando em consideração a condição padrão de 60 °F e 14,7 psia. Assim:

$$B_g = 0,0283 \frac{ZT_r}{p} \quad (16)$$

2.2 Elevação de petróleo

A elevação é um dos segmentos mais importantes da área de petróleo, caracterizado por propiciar o escoamento dos fluidos contido em um reservatório até a superfície. Esse segmento subdivide-se em elevação natural e elevação artificial.

A elevação natural ocorre quando o reservatório apresenta energia suficiente para deslocar os fluidos até a superfície, sendo portanto denominado poço surgente.

Com o passar do tempo, a pressão do reservatório decai até atingir um ponto em que os fluidos não alcançam mais a superfície, isto é, não é possível vencer a perda de pressão ao longo de todo o caminho. A suplementação de energia é então proporcionada pela introdução da elevação artificial, que provoca a redução da pressão de fluxo no fundo do poço, maximizando assim a vazão de produção.

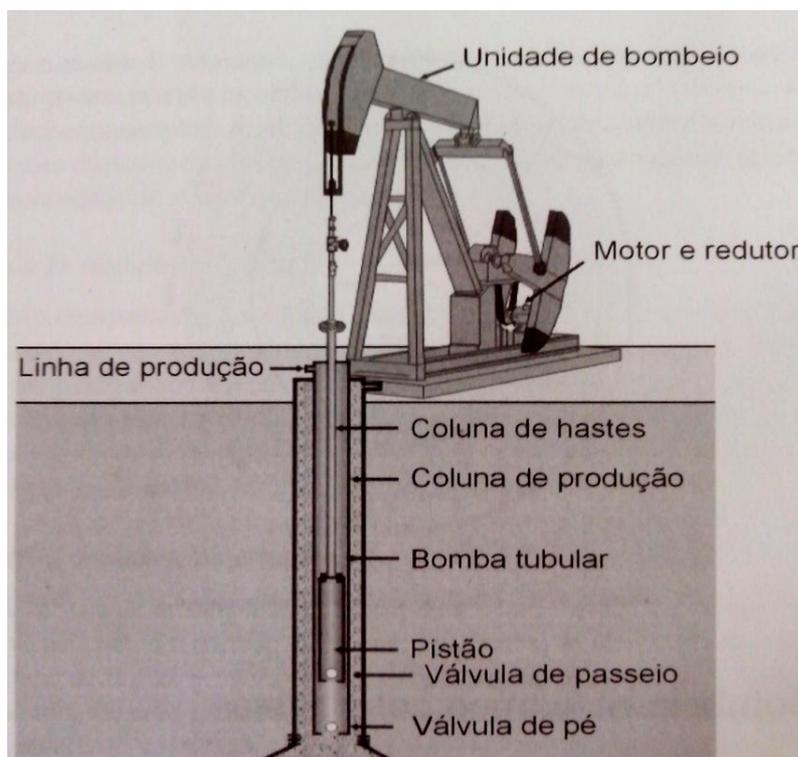
Os métodos de elevação artificial mais usuais na indústria petrolífera são: *gas lift*, bombeio centrífugo submerso, bombeio mecânico e bombeio por cavidades progressivas.

Vale destacar que cada método de elevação artificial apresenta suas vantagens e desvantagens. Portanto, a aplicação de qualquer um deles deve estar de acordo com o cenário técnico e estudo econômico viável. Isso porque a escolha inapropriada do método ou dimensionamento incorreto pode acarretar em perda de produção e prejuízos operacionais indesejáveis.

2.3 Bombeio Mecânico

Dentre os métodos de elevação artificial existentes, o bombeio mecânico merece destaque, pois apresenta boa eficiência energética, baixos custos com investimento e manutenção e grande aplicabilidade no mundo inteiro. Esse método fornece energia para escoamento do fluido através de uma bomba de deslocamento positivo, do tipo alternativa, localizada no fundo do poço e acionada por um motor elétrico ou de combustão interna na superfície. O movimento alternativo é resultado da conversão do movimento de rotação do motor através de uma UB e transmitido ao pistão da bomba de fundo por meio de uma coluna de hastes. Os principais componentes desse método são: bomba de fundo ou de subsuperfície, coluna de hastes, unidade de bombeio e motor, conforme ilustrados na Figura 1.

Figura 1: Sistema de Bombeio Mecânico



Fonte: Thomas (2001).

Outras vantagens ligadas ao bombeio mecânico reforçam sua importância, tais como: aplicabilidade numa grande faixa de vazão (até 300

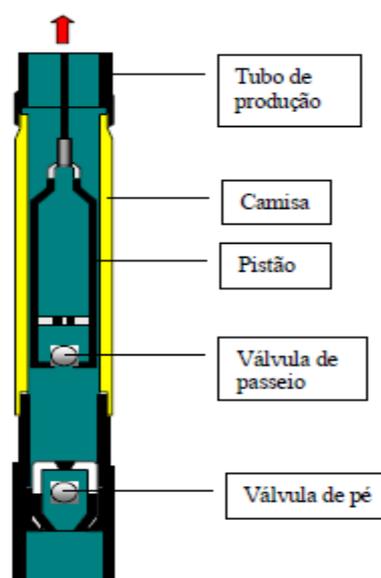
m³/d) e larga faixa de temperatura, capacidade de operação com fluidos de diferentes composições e viscosidades, facilidade de diagnóstico de problemas e robustez tecnológica.

Algumas desvantagens são observadas para esse método, tais como: profundidade de bombeio limitada, problemática em poços de areia devido ao desgaste dos componentes por meio da abrasividade, presença de gás na bomba provoca redução da eficiência volumétrica e aplicação em poços desviados pode gerar elevado atrito entre componentes de subsuperfície resultando em falhas mecânicas.

2.3.1 Bomba de fundo ou de subsuperfície

A bomba de fundo ou de subsuperfície do bombeio mecânico é do tipo deslocamento positivo e tem a função de produzir um diferencial de pressão, a partir do movimento alternativo da coluna de hastes, para o escoamento dos fluidos do fundo do poço até a superfície. Os componentes da bomba de fundo são basicamente camisa, pistão e válvulas de pé e de passeio, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2: Bomba de fundo



Fonte: Costa (2008).

As bombas de fundo podem ser de dois tipos: tubulares ou insertáveis. A principal diferença entre esses tipos de bombas está relacionada à instalação destas no poço. Nos casos de bombas tubulares, a camisa da bomba é solidária à coluna de produção. Isso confere uma maior capacidade de bombeio dos fluidos, porém apresenta como desvantagem a retirada de toda a coluna de produção, caso haja necessidade de operações de limpeza ou recompletação. Já para bombas insertáveis, a camisa é instalada internamente na coluna de produção, sendo solidária à coluna de hastes. Dessa maneira, tem a vantagem de ser substituída através de uma simples manobra de coluna de hastes. Entretanto, quando comparadas com as bomba tubulares, possuem uma menor capacidade de bombeio para um dado diâmetro.

Os componentes camisa e pistão da bomba de fundo são tubos com diâmetros muito próximos (diâmetro interno da camisa e externo do pistão), sendo diferenciados apenas por uma pequena folga da ordem de milésimos de polegadas.

Já as válvulas são do tipo sede-esfera e devem proporcionar uma perfeita vedação para que se alcancem condições ideais de bom funcionamento da bomba. Porém, pequenas imperfeições iniciais nas superfícies de selagem ou danos posteriores devido à abrasão ou corrosão podem causar um vazamento crescente de líquido e uma rápida deterioração da ação da válvula (Costa, 2008). Isso acarreta perda de eficiência do bombeio, o que não é desejado. Para diminuir danos relacionados ao impacto mecânico de assentamento da esfera na sede, é empregado o uso de gaiolas para guiar e restringir o movimento da esfera para o orifício central da sede.

2.3.1.1 Deslocamento volumétrico

Uma vez detalhadas as características da bomba de fundo, esse item contempla o deslocamento volumétrico (PD) propiciado pela mesma. Tal deslocamento é função do diâmetro do pistão (d_p) e do curso do pistão (S_p).

Assim, a área do pistão da bomba de fundo é definida como:

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (17)$$

O volume deslocado em cada ciclo será então:

$$V_c = \frac{\pi d_p^2}{4} S_p \quad (18)$$

Dessa maneira, o deslocamento volumétrico, em pol^3/dia , é dado por:

$$PD = 1440 \frac{\pi d_p^2}{4} S_p N \quad (19)$$

Ou ainda, em m^3/dia :

$$PD = 0,01853 d_p^2 S_p N \quad (20)$$

2.3.1.2 Eficiência volumétrica

A eficiência volumétrica de uma bomba de fundo (E_v) pode ser definida como a relação entre a vazão bruta de líquidos a ser obtida na superfície (Q_b) e o deslocamento volumétrico (PD):

$$E_v = \frac{Q_b}{PD} \quad (21)$$

Considerando que a eficiência volumétrica de uma bomba é sempre inferior a 1, a vazão de líquido a ser obtida na superfície será menor do que o deslocamento volumétrico. A diferença decorre do vazamento de líquido em volta do pistão no curso ascendente, da compressibilidade do fluido e do incompleto enchimento da camisa com líquido vindo do espaço anular (THOMAS, 2001).

Existem duas maneiras possíveis de obtenção do valor da eficiência volumétrica: a primeira delas é através da Equação 21, conhecendo a vazão de

líquido por meio de um teste de produção e estipulando o deslocamento volumétrico a partir da Equação 20. A segunda leva em consideração o bom funcionamento da bomba, sem vazamento e escorregamento, e é dada por:

$$E_v = \frac{1}{B_o(P_{suc}, T)(1-f_w) + B_w(P_{suc}, T)f_w + [RGO_b - R_S(P_{suc}, T)]B_G(P_{suc}, T)(1-f_w)(1-E_s)} \quad (22)$$

A eficiência de separação de gás no fundo (E_s) é a razão entre a vazão de gás livre que escoava através do anular e a vazão de gás livre total (anular + bomba), em condições de pressão e temperatura de sucção da bomba.

O valor da eficiência de separação pode ser obtido através de correlação poço a poço ou ainda através de alguns modelos desenvolvidos na literatura por Prado *et al.* (2000, 2001 e 2003) e Alhanati (citado por Takács, 2009).

A modelagem da separação de gás no fundo do poço adotada para esse trabalho foi o modelo proposto por Alhanati, baseadas na velocidade superficial do líquido (v_{sl}) e na velocidade terminal da bolha ascendente (v_b). Essa modelagem é aplicada para o método bombeio centrífugo submerso. Entretanto, por se tratar de uma separação natural de gás e apresentar resultados pessimistas de eficiência de separação foi aplicado também ao bombeio mecânico.

Dessa maneira, a equação para estimar a eficiência de separação natural do gás (E_s) foi admitida como:

$$E_s = \frac{v_b}{v_b + v_{sl}} \quad (23)$$

A velocidade superficial do líquido pode ser calculada através de:

$$v_{sl} = 6.5 \cdot 10^{-5} \frac{q_l}{A_{an}} \left[\frac{B_o}{1+RAO} + B_w \frac{RAO}{1+RAO} \right] \quad (24)$$

Onde:

$$Aan = 0.0055 (Idc^2 - Odt^2) \quad (25)$$

E a velocidade terminal da bolha é dada por:

$$v_b = \sqrt{2}^4 \sqrt{\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2}} \quad (26)$$

As massas específicas do gás (ρ_g) e do líquido (ρ_l) ainda são determinadas por:

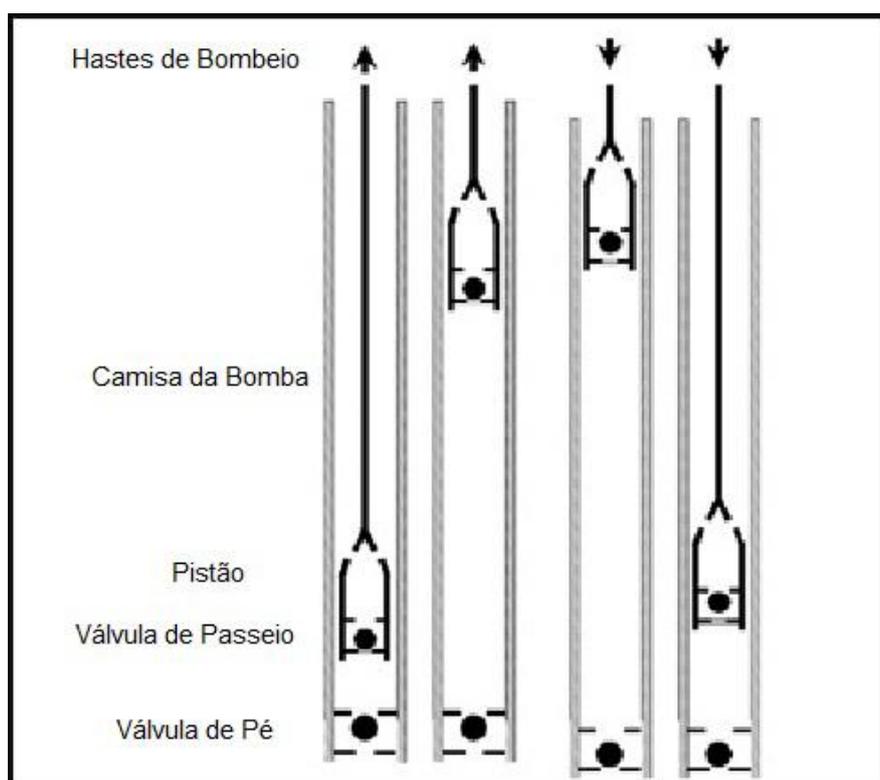
$$\rho_g = \frac{0.0764 d_g}{B_g} \quad (27)$$

$$\rho_l = \left[\frac{d_o}{B_o} \frac{1}{1+RAO} + \frac{d_w}{B_w} \frac{RAO}{1+RAO} \right] \quad (28)$$

2.3.2 Descrição do ciclo de bombeio

O ciclo de bombeio é dividido em duas etapas: curso ascendente (*upstroke*) e descendente (*downstroke*). A Figura 3 mostra o funcionamento da bomba de fundo durante o ciclo de bombeio, destacando as posições do pistão em relação à camisa bem como a operação das válvulas de pé e de passeio.

Figura 3: Funcionamento da bomba de fundo



Fonte: Lima, 2014.

No curso ascendente, a válvula de pé se abre devido à baixa pressão criada e possibilita que o fluido alimente a camisa da bomba. Enquanto isso, a válvula de passeio permanece fechada, suportando todo o peso do fluido que está se deslocando para a superfície. No curso descendente, a válvula de passeio se encontra aberta, permitindo que o fluido dentro da camisa da bomba se desloque para cima do pistão. Já a válvula de pé permanece fechada, impedindo que o fluido retorne para o anular e sustentando o peso do fluido presente na coluna de produção.

2.3.3 Coluna de hastes

A coluna de hastes, componente crítico do bombeio mecânico, interliga a bomba de fundo e a unidade de bombeio de modo que seja possível ocorrer a transferência do movimento alternativo da unidade de bombeio até a bomba.

Sua composição trata-se de um conjunto de hastes ligadas umas as outras por meio de luvas. Nos casos em que todas as hastes apresentam o mesmo diâmetro, é chamada de coluna simples. Já quando ocorre variação no diâmetro das hastes (diâmetro decrescente até a bomba), denomina-se coluna combinada.

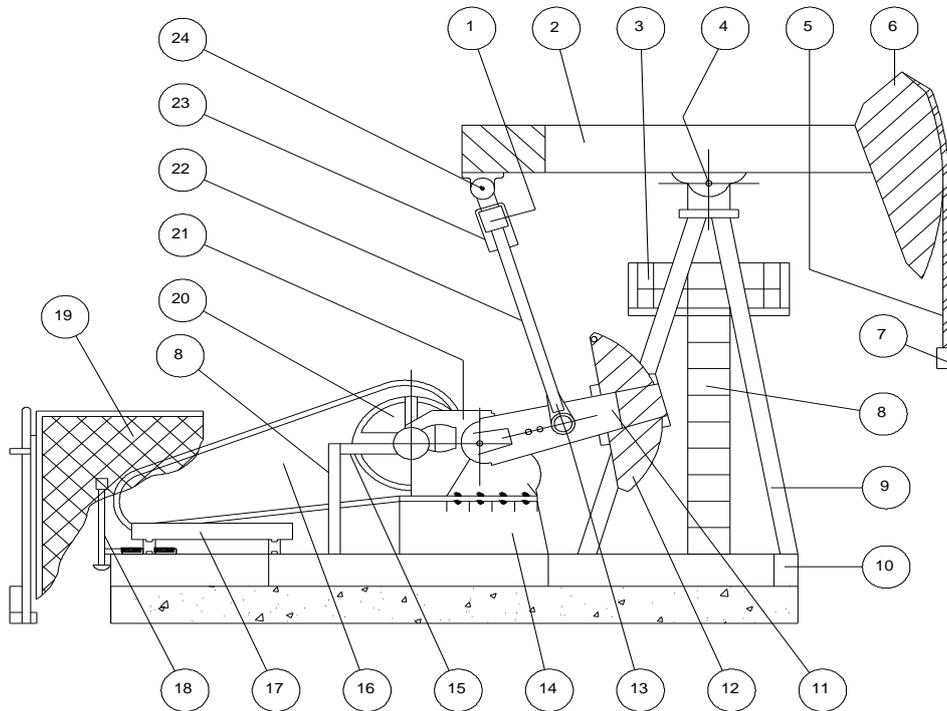
A haste superior da coluna denomina-se haste polida em função da sua superfície externa e nela são concentradas as cargas do peso das hastes de bombeio, peso do fluido e cargas dinâmicas geradas pela unidade de bombeio. Além do mais, a haste polida é responsável por prover uma melhor vedação na cabeça do poço em conjunto com o *stuffing box* (caixa de gaxetas).

Em relação ao tipo de material, as hastes ainda podem ser de aço ou de fibra de vidro, sendo esta última de custo elevado e, portanto, aplicada a poços de elevadas cargas e alta corrosão. A classificação das hastes é feita em função do diâmetro nominal e a composição química (grau do aço) para hastes de aço; e diâmetro nominal, temperatura admissível de trabalho e composição química das extremidades (metálicas) para hastes de fibra (THOMAS, 2001).

2.3.4 Unidade de Bombeio

A unidade de bombeio é responsável por converter o movimento de rotação do motor que a aciona em um movimento alternativo das hastes. Seus principais componentes são: base, tripé, viga, cabeça da unidade, biela, manivela, contrapesos, cabresto e motor. Esses e outros componentes são ilustrados na Figura 4.

Figura 4: Componentes da Unidade de Bombeio



1	VIGA EQUALIZADORA	13	MANCAL MANIVELA OU PROPULSOR
2	VIGA PRINCIPAL	14	BASE DO REDUTOR
3	PLATAFORMA DE ACESSO AO MANCAL CENTRAL	15	PLATAFORMA DE ACESSO AO REDUTOR
4	MANCAL CENTRAL	16	PROTETOR DE CORREIAS
5	CABRESTO	17	BASE DO ACIONADOR
6	CABEÇA DA UB	18	ALAVANCA DE FREIO
7	MESA DO CABRESTO	19	GRADE DE PROTEÇÃO
8	ESCADA	20	POLIA DO REDUTOR
9	TRIPÉ	21	REDUTOR
10	BASE METÁLICA ("SKID")	22	BIELA OU BRAÇO
11	MANIVELA	23	MANCAL LATERAL VIGA EQUALIZADORA
12	CONTRAPESO	24	MANCAL EQUALIZADOR

Fonte: Costa, 2008.

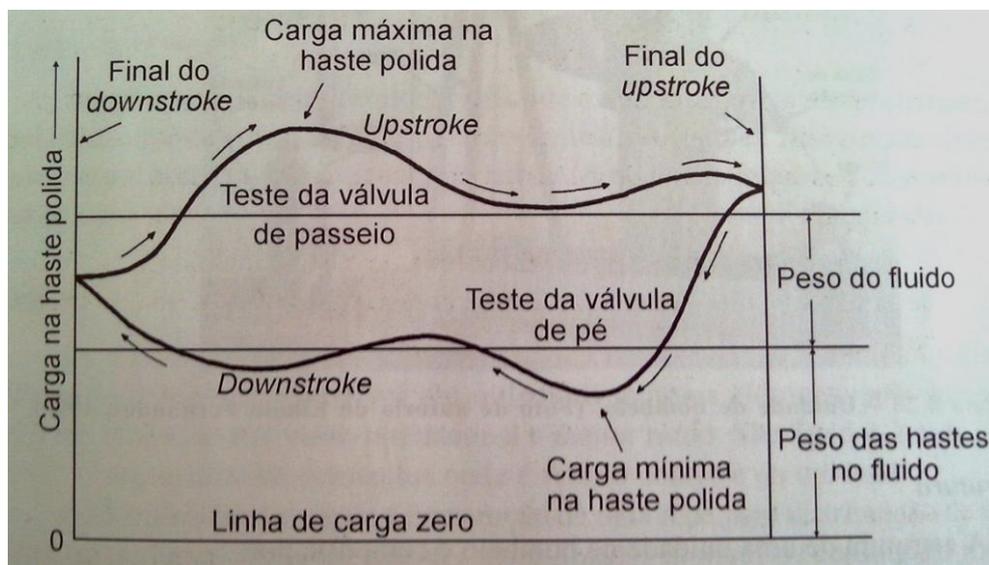
A seleção de uma unidade de bombeio para um determinado poço deve considerar suas limitações no que se diz respeito à carga máxima a ser erguida pela UB; torque máximo exigido no eixo de saída do redutor; curso máximo da haste polida; frequência de bombeio máxima, capaz de ser suportada pelo equipamento; e frequência de bombeio mínima a fim de assegurar boa lubrificação interna do redutor.

2.3.5 Carta dinamométrica

A carta dinamométrica é um instrumento valioso na análise de desempenho operacional do bombeio mecânico. Existem dois tipos de cartas dinamométricas: a de superfície e a de fundo. A carta de superfície é obtida na superfície através de registro dos esforços atuantes na haste polida durante um ciclo de bombeio pelo equipamento denominado dinamômetro. Desse tipo de carta, podem ser extraídas informações quantitativas e qualitativas, tais como: obtenção do PPRL, o MPRL e peak torque; avaliação da condição de operação das válvulas; possibilidade do cálculo da curva de torque no eixo de saída do redutor da UB e a previsão da posição dos contrapesos nas manivelas que fornece o melhor balanceamento.

A Figura 5 mostra uma carta dinamométrica de superfície teórica, com destaque a carga máxima na haste polida (PPRL), a carga mínima na haste polida (MPRL), as linhas de teste da válvula de passeio e teste da válvula de pé, sendo também apresentados o peso das hastes no fluido, o peso do fluido e as cargas dinâmicas no curso ascendente e descendente.

Figura 5: Carta dinamométrica de superfície



Fonte: Thomas, 2001.

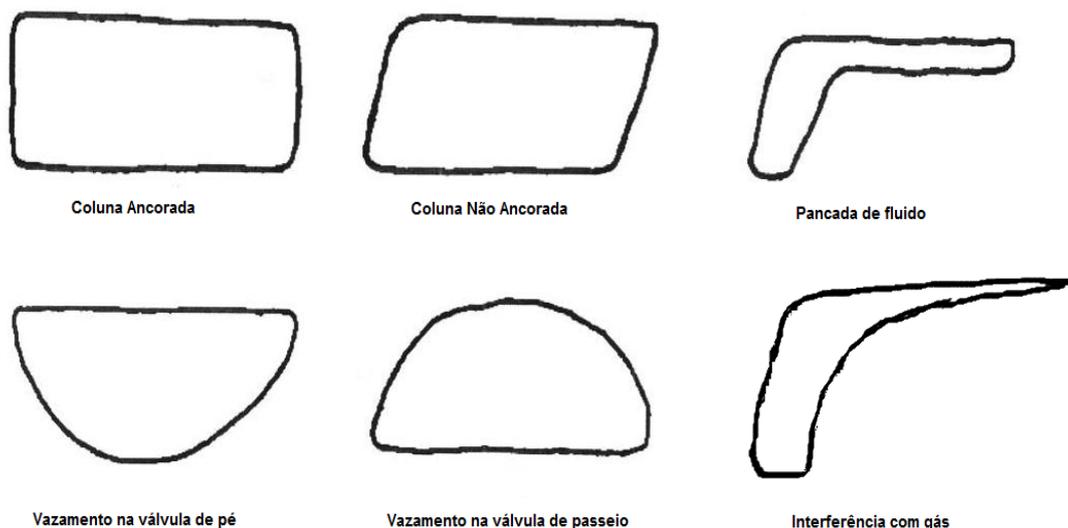
Por apresentarem algumas distorções e ser inadequada, a carta dinamométrica de superfície é ainda dado de entrada para a obtenção da carta

dinamométrica de fundo. A carta de fundo é uma ferramenta caracterizada por reunir a variação de um conjunto de cargas exercidas na bomba de fundo à medida que ocorre o seu deslocamento. Muitas informações qualitativas podem ser adquiridas a partir da interpretação dessa carta de fundo, tais como: falhas no pistão, vazamento das válvulas, estado da bomba, furos na coluna de tubos, rompimento de haste de bombeio, presença de parafina, efeito de gás na bomba, entre outros. Ainda são extraídas informações quantitativas relacionadas aos cálculos da vazão e do nível dinâmico.

2.3.5.1 Cartas dinamométricas de fundo de referências

Neste tópico, são apresentadas algumas formas de cartas de fundo de referências para os modos de operação mais comuns do bombeio mecânico. São elas: coluna ancorada ou não, pancada de fluido, vazamentos na válvula de pé e de passeio e interferência com gás, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6: Cartas dinamométricas de fundo de referências



2.3.6 Algoritmo da carta de fundo

A carta dinamométrica de fundo originou-se em 1936 quando Walton E. Gilbert publicou a descrição da utilização de cartas dinamométricas de fundo no diagnóstico do BM. Após isso, vários trabalhos foram desenvolvidos nessa área.

Snyder (1963) foi o primeiro a desenvolver um modelo para o cálculo de forças e deslocamentos ao longo da coluna de hastes, a partir da resolução da equação da onda para oscilações não amortecidas.

Nos anos de 1966, Gibbs e Neely desenvolveram modelo matemático e técnicas computacionais para obtenção da carta de fundo com base em medições da superfície e resolvendo a equação da onda com o termo de amortecimento através de aproximações em série de Fourier truncadas.

Em 1981, Pavlik, a partir do trabalho de Gibbs e Neely (1966), incluiu na solução a influência gravitacional e estendeu o modelo ao uso de hastes de fibra de vidro. Ele propôs método alternativo para geração da carta dinamométrica de fundo com o coeficiente de amortecimento calculado através das interações haste e fluido e da coluna de produção e fluido.

Em 1992, Everitt inseriu método numérico para resolução da equação da onda amortecida e conseqüente geração da carta dinamométrica de fundo.

O algoritmo desenvolvido nesse trabalho para geração da carta de fundo foi baseado no artigo de Everitt (1992). O artigo em questão utiliza a solução por diferenças finitas da equação de onda para a resolução do problema.

A equação da onda simplificada pode ser escrita da seguinte forma para uma haste de diâmetro constante:

$$v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (29)$$

Onde: $g_c = 32,2 \text{ (lbm}\cdot\text{pés)} / \text{(lbf}\cdot\text{s}^2)$;

$$v = \sqrt{144Eg_c/\rho} \quad (30)$$

Para os casos de haste de diâmetro variável, a Equação 29 foi multiplicada por $(\rho A/144g_c)$. Assim, tem-se:

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho A}{144g_c} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\rho A}{144g_c} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (31)$$

Essa é a forma da equação de onda usada para desenvolver a solução por diferença finita proposta por Everit. Além do mais, a solução desejada necessitaria de duas condições de contorno e duas condições iniciais em função das derivadas de segunda ordem no tempo e espaço. Porém, as condições iniciais não são requeridas, pois apenas soluções periódicas são desejadas, ou seja, de regime permanente. Assim, somente duas condições de contorno são requeridas: o histórico de deslocamento e de carga na haste polida obtidas a partir da carta dinamométrica de superfície.

Aplicando-se a solução por diferenças finitas através de aproximações de séries de Taylor, a Equação 31 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$u_{i+1,j} = \frac{\left\{ \alpha(1+c\Delta t)u_{i,j+1} - \left[\alpha(2+c\Delta t) - \left(\frac{EA}{\Delta x}\right)^+ - \left(\frac{EA}{\Delta x}\right)^- \right] u_{i,j} + \alpha u_{i,j-1} - \left(\frac{EA}{\Delta x}\right)^- u_{i-1,j} \right\}}{\left(\frac{EA}{\Delta x}\right)^+} \quad (32)$$

$$\text{Onde: } \alpha = \frac{\Delta x}{\Delta t^2} \left[\frac{(\rho A/144g_c)^+ + (\rho A/144g_c)^-}{2} \right] \quad (33)$$

A Equação 32 é, portanto, a fórmula utilizada para definir o deslocamento da coluna de hastes da superfície transmitida ao fundo do poço até imediatamente acima da bomba.

Para a resolução da Equação 32, faz-se necessário o conhecimento do deslocamento da haste em dois pontos anteriores, $u_{i,j}$ e $u_{i-1,j}$, em relação ao deslocamento a ser calculado, $u_{i+1,j}$. O deslocamento em $u_{0,j}$ é obtido a partir

da carta dinamométrica de superfície. Já o deslocamento em $u_{1,j}$ é obtido através da lei de Hooke, conforme mostra as seguintes equações:

$$F = EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (34)$$

Substituindo a carga da haste polida F para F_{PR} e utilizando a expansão de $\frac{\partial u}{\partial x}$ de primeira ordem, tem-se:

$$F_{PR,j} = \left(\frac{EA}{\Delta x} \right) (u_{1,j} - u_{0,j}) \quad (35)$$

Ou ainda:

$$u_{1,j} = \left(\frac{\Delta x F_{PR,j}}{EA} \right) + u_{0,j} \quad (36)$$

Vale ressaltar que F_{PR} é a carga dinâmica da haste polida (a carga gravada na superfície menos o peso das hastes imerso em fluido).

Outro aspecto relevante da Equação 32 é que a determinação $u_{i+1,j}$ exige saber os deslocamentos de $u_{i,j-1}$ e $u_{i,j+1}$. Na extremidade inferior da escala de tempo, (quando $j = 0$), $u_{i,j-1}$ não existe. Na extremidade superior da escala de tempo (quando $j = n$), $u_{i,j+1}$ também não existe. Portanto, as duas extremidades de cada nó não podem ser calculadas. Para resolver este problema, os pontos da carta de superfície (cargas e posições) devem ser repetidos antes dos cálculos começarem para que assim possam ser realizados os cálculos no fundo do poço, representando um ciclo completo da bomba.

Como mencionado antes, a Equação 32 transmite deslocamentos de fundo de poço para o ponto imediatamente acima da bomba. Para obter o deslocamento da bomba ($u_{pump,j}$), uma equação diferente deve ser usada porque $(EA)^+$ e $(\rho A/144g_c)^+$ não existem na bomba. A equação utilizada é a forma simplificada da Equação 32 para o material e diâmetro da haste constante:

$$u_{pump,j} = (1 + c\Delta t)u_{m-1,j+1} - c\Delta t u_{m-1,j} + u_{m-1,j-1} - u_{m-2,j} \quad (37)$$

Agora que o deslocamento da bomba é conhecido, a carga da bomba ($F_{pump,j}$) pode ser calculada através da Lei de Hooke (Equação 34) e substituindo $\frac{\partial u}{\partial x}$ por uma expansão de segunda ordem:

$$F_{pump,j} = \left(\frac{EA}{2\Delta x}\right)(3u_{m,j} - 4u_{m-1,j} + u_{m-2,j}) \quad (38)$$

Um último aspecto a ser considerado é o critério de estabilidade para esse modelo. Como tal, Everitt atribuiu o seguinte critério:

$$\frac{\Delta x}{v\Delta t} \leq 1 \quad (39)$$

Capítulo 3

Metodologia e desenvolvimento do algoritmo para obtenção da carta de fundo

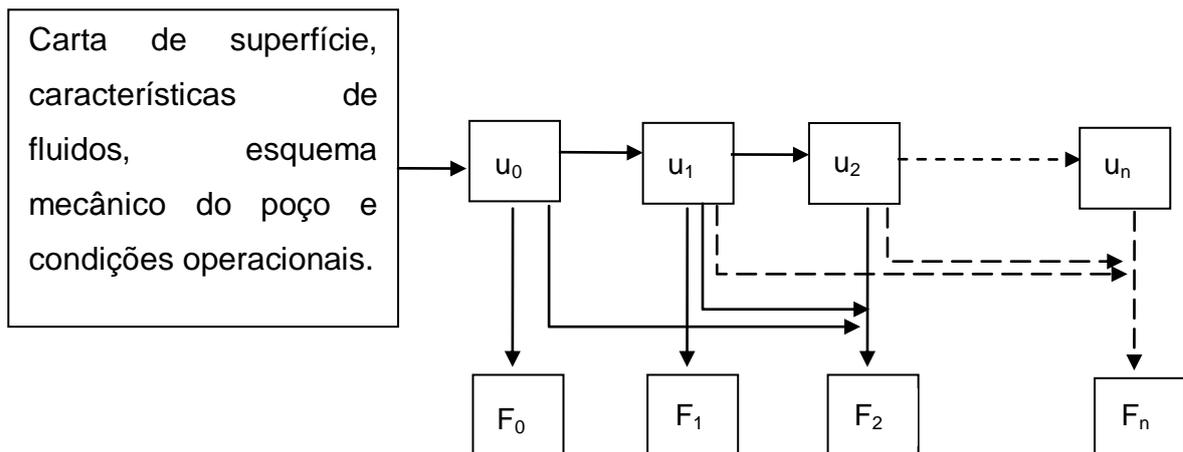
3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO PARA OBTENÇÃO DA CARTA DE FUNDO

A carta dinamométrica de fundo permite a obtenção da vazão de produção e do nível dinâmico bem como informações qualitativas da condição de bombeio, sendo portanto um instrumento de grande valia no sistema de bombeio mecânico. Dada a importância da carta dinamométrica de fundo, foi desenvolvida ferramenta computacional para obtenção dessa carta com base no artigo de Everitt, já detalhado no capítulo anterior.

O algoritmo para geração da carta de fundo em questão foi implementado sobre a plataforma *Microsoft Office Excel* usando a linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA). Todos os procedimentos para cálculo levaram em conta o histórico da carta de superfície, esquema mecânico do poço e algumas propriedades dos fluidos.

O algoritmo comentado e suas respectivas funções estão apresentados no Anexo. Uma melhor visualização do mesmo está representada pelo fluxograma na Figura 7.

Figura 7: Fluxograma do algoritmo da carta de fundo



Na Figura 7, é mostrado o cálculo do deslocamento (u) e das cargas (F) a partir da carta de superfície, características de fluidos, esquema mecânico do poço e condições operacionais. O deslocamento u_0 representa a carta de superfície, enquanto o deslocamento u_1 representa o deslocamento calculado na posição $i+1$ a partir do deslocamento u_0 . Dessa maneira, os deslocamentos subsequentes são calculados em função do deslocamento anterior. No que diz respeito às cargas, F_0 pode ser obtida com base no deslocamento u_0 , F_1 pode ser obtida a partir de u_1 e todas as outras cargas subsequentes são obtidas através do seu deslocamento respectivo e dois anteriores.

Uma vez revisadas as equações do modelo e elaboração do algoritmo utilizado nas gerações de cartas de fundo, o passo seguinte foi selecionar os poços aleatoriamente em um sistema supervisório cujas características se assemelham com os poços da Bacia Potiguar. Para tanto, foram atribuídos alguns critérios durante essa seleção: poços verticais, de características variadas ($^{\circ}$ API, BSW, localização, entre outras) e condição de bombeio normal (sem peak torque excedido, por exemplo).

As informações necessárias de cada poço para a utilização do algoritmo são mostradas na Figura 8.

Figura 8: Tela inicial

Tela inicial:		
Diâmetro da haste 1 (pol)	0,75	F
Número de hastes 1	44,00	F
Comprimento da haste 1 (pés)	25,00	F
Comprimento parcial dessa coluna de hastes 1 (pés)	1100,00	C
Diâmetro da haste 2 (pol)	0,75	F
Número de hastes 2	45,00	F
Comprimento da haste 2 (pés)	25,00	F
Comprimento parcial dessa coluna de hastes 2 (pés)	1125,00	C
Assentamento da bomba (m)	693,40	F
Assentamento da bomba (pés)	2274,93	C
CPM	8,80	F
Número de pontos da carta de superfície	138,00	F
E (psi)	30500000,00	F
ρ (lbm/pés ³)	490,00	F
Coefficiente de amortecimento-c (1/s)	0,05	A
T (s)	6,82	C
Δt (s)	0,05	C
Δx (pés)	845,49	C
$\Delta x_{\text{adotado 1}}$ (pés)	110,00	A
$\Delta x_{\text{adotado 2}}$ (pés)	112,50	A
Peso no ar (lbf)	3635,65	C
Densidade do fluido	1,00	C
Densidade do óleo	0,89	F
Densidade da água	1,01	F
fw	0,96	F
Peso da coluna no fluido (lbf)	3170,81	C

Na Figura 8, os campos preenchidos com a coloração azul e identificados com a letra “F” representam as informações obtidas através do esquema mecânico do poço e também no sistema supervisor de automação de poços. Já a informação na coloração rosa e identificada com a letra “A”, representa um valor atribuído. No caso, tratam-se do coeficiente de amortecimento na faixa de valores empíricos proposto por Gibbs e também os elementos de discretização no sentido axial das duas seções de hastes, respeitando o critério de estabilidade da Equação 39. Por fim, os campos de coloração amarelada e identificados com a letra “C” são os valores calculados. São eles:

- Comprimento parcial das hastes

O comprimento parcial das hastes (L_{ph}) é dado por:

$$L_{ph} = \text{Número de hastes} * L_h \quad (40)$$

- Assentamento da bomba

O assentamento da bomba (L_b), em pés, é:

$$L_b = \frac{L_{bm}}{0,3048} \quad (41)$$

- Período

O período (T_t) é dado por:

$$T_t = \frac{60}{CPM} \quad (42)$$

- Intervalo de tempo

O intervalo de tempo, Δt , pode ser obtido por:

$$\Delta t = \frac{T_t}{\text{Número de pontos da carta de superfície}-1} \quad (43)$$

- Elemento de discretização das seções das hastes no sentido axial

A partir da Equação 43, o elemento de discretização das seções das hastes no sentido axial (Δx) é obtido aplicando a Equação 39.

- Peso da coluna de hastes no ar

O peso no ar, W , é obtido em função do comprimento de cada seção da coluna de hastes (L_{ph}) e do seu respectivo peso linear das hastes (W_r).

$$W = \sum W_r L_{ph} \quad (44)$$

O peso linear das hastes no ar podem ser obtidos na norma API RP 11L. A Tabela 2 ilustra alguns desses valores para um dado diâmetro de haste.

Tabela 2: Peso linear das hastes no ar

Haste	Peso no ar (lbf/pés)
5/8"	1,135
3/4"	1,634
7/8"	2,224
1"	2,904
1 1/8"	3,676

Fonte: Adaptada da Norma API RP 11L, 2000.

- Densidade do fluido

A densidade do fluido, d_f , é dada de maneira simplificada por:

$$d_f = d_o \cdot (1 - f_w) + d_w \cdot f_w \quad (45)$$

- Peso da coluna no fluido

O peso da coluna no fluido, W_p , é obtido como:

$$W_p = W(1 - 0,128d_f) \quad (46)$$

Ainda como parâmetro de entrada foi extraída carta de superfície diretamente do sistema supervisor, com os dados de carga na haste polida e curso respectivo. Em conjunto com a tela anterior, foram todas as informações necessárias para obtenção da carta de fundo.

De posse da carta de fundo, foi possível auferir o curso líquido do pistão que será importante no cálculo do deslocamento volumétrico da bomba através da aplicação da Equação 20.

De fato, a determinação da vazão bruta de líquidos na superfície (Q_b) é função tanto do deslocamento volumétrico da bomba (PD) quanto da eficiência volumétrica.

Uma vez calculado o deslocamento volumétrico, o passo seguinte é o cálculo da eficiência volumétrica por meio da Equação 22, estimando as propriedades de fluidos necessárias apresentadas no item 2.1 e a eficiência de separação pelo modelo proposto por Alhanati (citado por Takács, 2009) no item 2.3.

Dessa maneira, foram implementadas as funções necessárias em VBA para o cálculo da vazão bruta na superfície. Para tal fim, são necessárias as informações representadas na Figura 9.

Figura 9: Dados de entrada

Dados de entrada		
Diâmetro do pistão (pol)	2,75	F
Curso do pistão da carta de fundo(pol)	35,74	F
CPM (ciclos por minuto)	8,8	F
°API	28,41	F
Densidade do gás	0,7	F
Pressão no revestimento (psi)	6	F
Assentamento da bomba (m)	693	F
Nível dinâmico (m)	693	F
Pressão de sucção (psi)	6	C
Temperatura de sucção (°F)	142	C
RGO (m ³ /m ³)	1	F
ID do revestimento (pol)	6,336	F
OD do tubo (pol)	3,5	F
Tensão interfacial (lb/s ²)	0,04	A
fw	0,96	F
Densidade relativa da água	1,01	F

Na Figura 9, os campos preenchidos com a coloração azul e identificados com a letra “F” representam as informações obtidas através do esquema mecânico do poço e também no sistema supervisorio de automação de poços. Vale destacar que nesse trabalho foi considerada a densidade do gás total igual a do gás livre para fins de simplificações, o que comumente é aplicável à maioria de programas computacionais comerciais. Entretanto, a literatura prevê a determinação da densidade do gás livre através de equações, conforme proposto por Brill (1999).

A informação na coloração rosa e sinalizada pela letra “A”, representa um valor atribuído. No caso, trata-se da tensão interfacial, que é um valor empírico. Por fim, os campos de coloração amarelada e identificados com a letra “C” são os valores calculados. São eles:

- Pressão de sucção

A pressão de sucção, p_s , é dada por:

$$p_s = p_{rev} + 1,422d_f(L_{bm} - h_d) \quad (47)$$

- Temperatura de sucção

A temperatura de sucção é a soma da temperatura na superfície e a temperatura até o fundo do poço com base no gradiente geotérmico da terra, que equivale cerca de 3 °C/100 m.

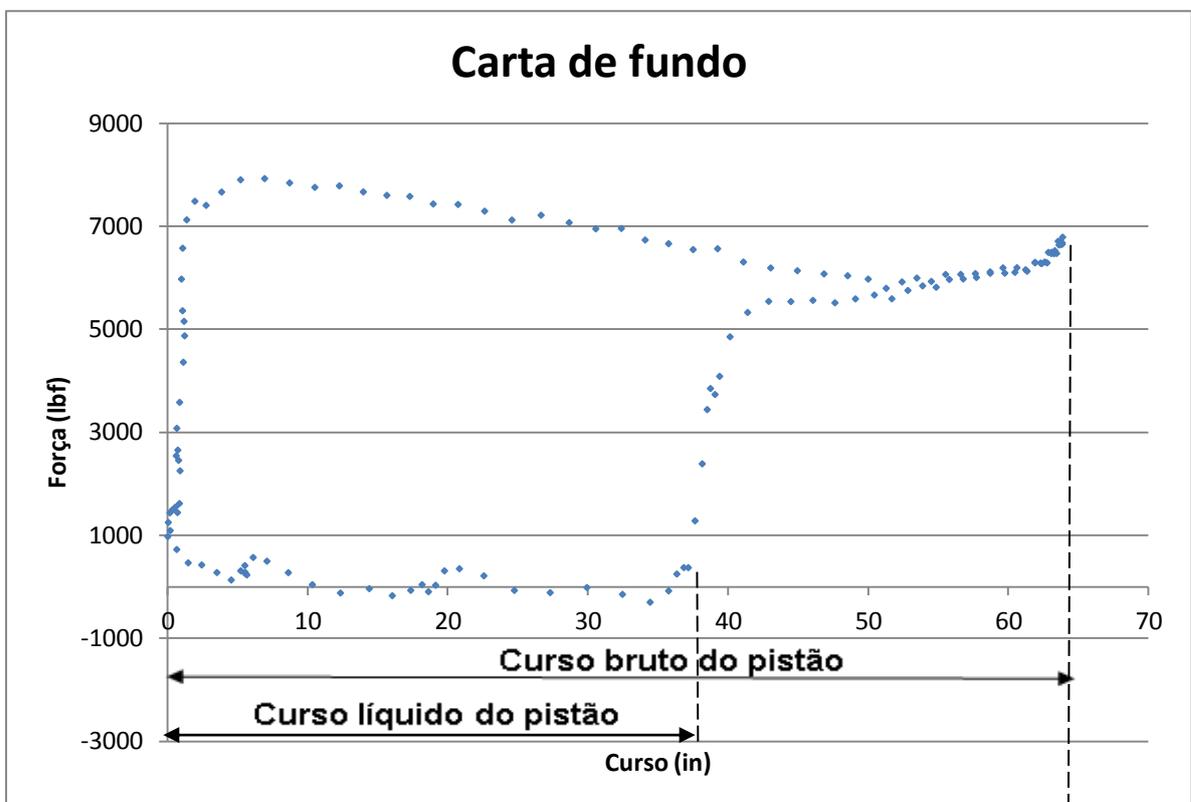
Capítulo 4
Resultados e discussões

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento do algoritmo da carta de fundo foi o primeiro passo para o objetivo deste trabalho que é a determinação da vazão bruta na superfície, visto que foi possível auferir da carta o curso líquido do pistão.

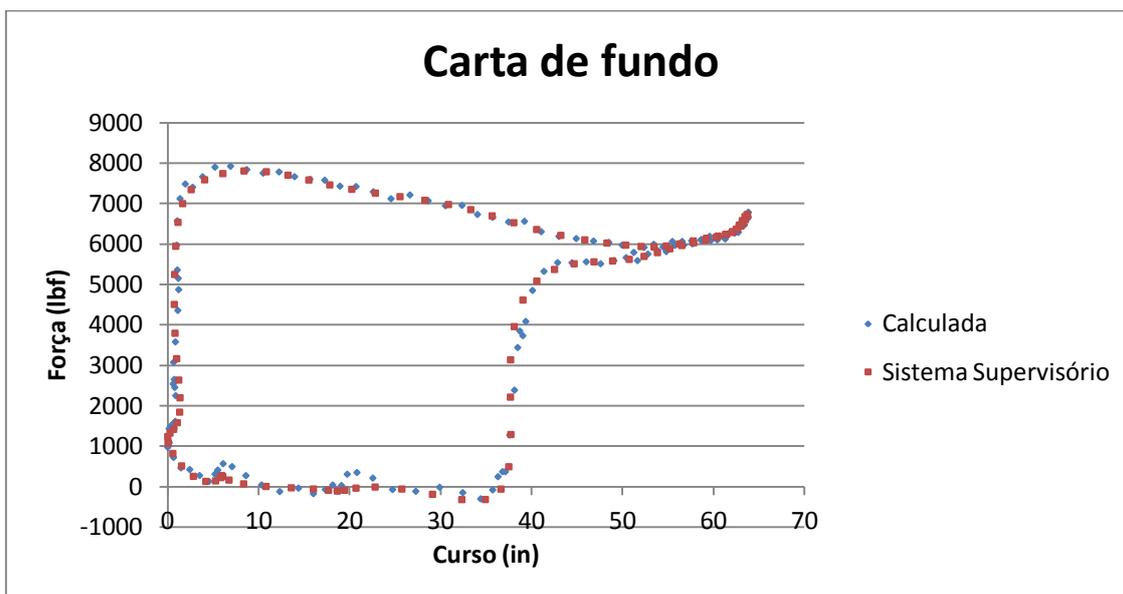
Desse modo, para os dados explicitados no capítulo anterior, a carta dinamométrica de fundo obtida pode ser visualizada na Figura 10, com destaque para o curso bruto e líquido do pistão.

Figura 10: Carta dinamométrica de fundo



Foi realizada ainda comparação com a carta de fundo fornecida pelo sistema supervisor, plotando ambas as cartas num mesmo gráfico, conforme mostra Figura 11.

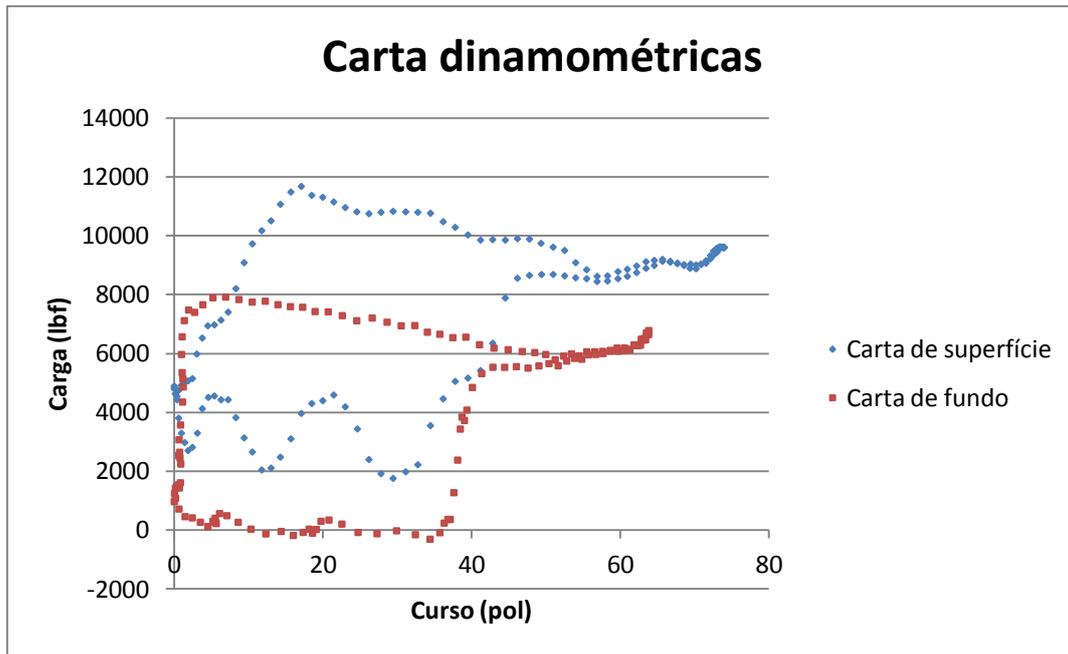
Figura 11: Comparação de carta de fundo



Como pode ser observado através da Figura 11, as cartas dinamométricas de fundo tanto do sistema supervisório quanto a calculada apresentam grande semelhança, sendo praticamente uma sobreposta a outra. Isso implica em uma validação do algoritmo, que poderia ser mais detalhada a partir de estudos estatísticos.

Como resultado final da implementação do algoritmo, as cartas dinamométricas de fundo e de superfície que a originou em conjunto com outros parâmetros são mostradas na Figura 12.

Figura 12: Cartas dinamométricas



Dando continuidade ao objetivo principal, foi possível a obtenção da vazão bruta na superfície de posse do curso líquido do pistão e preenchidos todos os parâmetros mostrados na figura 9. A Figura 13 ilustra os valores obtidos de deslocamento volumétrico, eficiência volumétrica e vazão de líquidos na superfície.

Figura 13: Dados de saída

Dados de saída	
PD (m ³ /dia)	44,07
Eficiência volumétrica	0,998
Vazão bruta (m ³ /dia)	43,97

De maneira similar, foi comparado o valor da vazão bruta na superfície calculado com o valor de teste disponível no sistema supervisorio (45,28 m³/dia) e foi constatada praticamente uma equivalência dos mesmos.

Capítulo 5
Conclusões

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado cálculo para obtenção da vazão bruta na superfície a partir de carta dinamométrica de fundo. A obtenção dessa vazão por esse modelo pode vir a reduzir o número de testes de produção convencionais, que muitas vezes não atendem uma demanda grande de poços. Isso porque não é viável em termos logísticos, isto é, número de tanques limitados, equipamentos insuficientes, entre outros. Além do mais, a estimativa da vazão bruta em conjunto com outros parâmetros é extremamente importante, pois permite o controle da produção e conseqüente retorno dos investimentos.

Para tanto, foi necessário o cálculo da eficiência volumétrica e do deslocamento volumétrico da bomba de fundo. A eficiência pode ser obtida a partir de propriedades dos fluidos e da eficiência de separação do gás livre. Enquanto o deslocamento volumétrico foi possível pelo aferimento do curso líquido do pistão da carta dinamométrica de fundo.

Nesse sentido, foi desenvolvido algoritmo para a geração da carta de fundo em linguagem VBA. A carta de fundo é uma ferramenta vital no sistema de bombeio mecânico, pois permite serem adquiridas informações qualitativas da condição de bombeio e informações quantitativas relacionadas aos cálculos da vazão e do nível dinâmico.

Foi apresentado um exemplo de aplicação onde foram comparadas cartas e vazões brutas com os valores calculados e os encontrados no sistema supervisor. Dessa maneira, constataram-se proximidades dos cálculos. Entretanto, apenas uma análise estatística aprofundada pode, de fato, validar o algoritmo e serve como base para um trabalho futuro. Outra sugestão de trabalho futuro seria avaliar o mesmo estudo com a aplicação de outras correlações empíricas para as propriedades dos fluidos.

Capítulo 6
Referências bibliográficas

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. Portaria N^o 009 de 21 de Janeiro de 2000.

API RP 11L – Recommended Practice For Design Calculations for Sucker Rod Pumping Systems – American Petroleum Institute (4th Ed.), Dallas, 1988, reaffirmed in 2000.

BARRETO FILHO, M. A. Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico do bombeio mecânico em poços de petróleo. Dissertação de Mestrado- Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1993.

BRILL, J. P; MUKHERJEE, H. Multiphase Flow in Wells, 1^a ed. Richardson, Texas:1999.

COSTA, Rutácio de Oliveira. Bombeamento mecânico alternativo em poços direcionais. Dissertação de Mestrado- Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1995.

COSTA, Rutácio de Oliveira. Curso de Bombeio Mecânico. Apostila da Petrobras. Natal, 2008.

EVERITT, T. A.; JENNINGS, J. W. An Improved Finite- Difference Calculation of Downhole Dynamometer Cards for Sucker-Rod Pumps. Society of Petroleum Engineers (SPE 18189), 1992.

GIBBS, S. G. Predicting the Behavior of Sucker-Rod Pumping Systems. Society of Petroleum Engineers (SPE 588), 1963.

Gibbs, S. G. e Neely, A. B. (1966). Computer Diagnosis of Down-Hole Conditions in Sucker Rod Pumping Wells, Journal of Petroleum Technology, 1966, pp 91-97.

Gilbert, W. E. An Oil-Well Pump Dynagraph. Production Practice, Shell oil Co., pp 94-115, 1936.

GOMES, H. P. Desenvolvimento de um Sistema Inteligente para a Análise de Cartas Dinamométricas no Método de Elevação por Bombeio Mecânico. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, 2009.

LIMA, F. S.; GUEDES, L. A. H.; SILVA, D. R. Detecção de falhas no sistema de bombeio mecânico utilizando descritores de Fourier e ferramentas estatísticas. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2009.

LIMA, F. S.; GUEDES. Detecção e Classificação de Modos de Operação do Bombeio Mecânico Via Cartas Dinamométricas. Tese de Doutorado- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, 2014.

NASCIMENTO, João M. Araújo. Simulador Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico. Dissertação (Mestrado), UFRN, Natal, RN, 2005.

PAVLIK, N. Schwingungsmodelle fuer die gestage bewegung in forderden erdol sandin und ihre Anwendung auf die analyse von dyn diagrammen. Clausthal, Universidade Técnica de Claus thal. Tese de Doutorado, 1981.

Prado, M. G., Harun, A. F., Serrano, J. C., & Doty, D. R. A Simple Model To Predict Natural Gas Separation Efficiency in Pumped Wells. Society of Petroleum Engineers (SPE 63045), 2000.

Prado, M. G., Harun, A. F., Serrano, J. C., & Doty, D. R. A Mechanistic Model To Predict Natural Gas Separation Efficiency in Inclined Pumping Wells. Society of Petroleum Engineers (SPE 67184), 2001.

Prado, M. G., Harun, A. F., Serrano, J. C., & Doty, D. R. A Simple Model To Predict Natural Gas Separation Efficiency in Pumped Wells. Society of Petroleum Engineers. 2003.

Prado, M. G., Marquez, R. A. A New Robust Model For Natural Separation Efficiency. Society of Petroleum Engineers (SPE 80922), 2003.

SCHMIDT, Z. and DOTY, D.R. System Analysis for Sucker Rod Pumping. Society of Petroleum Engineers (SPEPE), 1989.

SNYDER, W. E. A Method for Computing Downhole Forces and Displacements in Oil Wells Pumped With Sucker Rods. Spring Meeting of the API Mid-Continent District Division of Production, Texas, 1963.

TAKÁCS, Gábor. Sucker-rod pumping manual / by Gábor Takács, 2003.

THOMAS, J.E. et al. Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

Capítulo 7

Anexo

7 ANEXO

' Algoritmo da Carta de fundo

'Função da primeira posição

Function u_prim(u_sup)

'u_prim é a primeira posição em ft

'u_sup é a posição na superfície em in

$u_prim = u_sup * (-1 / 12)$

End Function

'Função da segunda posição

Function u_seg(u_p, F, E, dx, dh)

'u_seg é a segunda posição em ft

'u_p é a primeira posição em ft

' F é a carga da superfície em lbf

' E é o módulo de Elasticidade Young em psi

' dx é o delta x em ft

'dh é o diâmetro da haste em in

'Cálculo da área em in²

$a = 3.14159265359 * (dh ^ 2) / 4$

'Cálculo da posição em ft

$u_seg = (F * dx / (E * a)) + u_p$

End Function

'Função das outras posições

Function u_x(uf, ut, utt, uxx, dt, dx1, dx2, E, dh1, dh2, P, c, no)

' u_x é a posição em i+1,j em ft

' uf é a posição em i,j+1 em ft

' ut é a posição em i,j em ft

' utt é a posição em i,j-1 em ft

' uxx é a posição em i-1,j em ft

' dt é o intervalo de tempo em s

' dx1 é o delta x da primeira seção em ft

' dx2 é o delta x da segunda seção em ft

' E é o módulo de Elasticidade Young em psi

' dh1 é o diâmetro da haste da primeira seção em in

' dh2 é o diâmetro da haste da segunda seção em in

' P é a massa específica do aço em lbf/ft³

' c é o coeficiente de atrito em s⁻¹

' no é o indicativo da seção

'Cálculo da área das hastes das duas seções em in²

$$a = 3.14159265359 * (dh1 ^ 2) / 4$$

$$b = 3.14159265359 * (dh2 ^ 2) / 4$$

If no = 1 Then

$$k = (P * a) / (144 * 32.2)$$

Else

$$k = (P * b) / (144 * 32.2)$$

End If

'Cálculo da posição em ft

$$\text{velc} = (u_f - u_t) / dt$$

$$\text{acel} = (u_f - (2 * u_t) + u_{tt}) / (dt ^ 2)$$

$$\text{dx_medio} = (dx_1 + dx_2) / 2$$

$$\text{eaxmais} = E * a / dx_1$$

$$\text{eaxmenos} = E * b / dx_2$$

$$u_x = (((k * (\text{acel} + (c * \text{velc}))) + (\text{eaxmenos} * (u_t - u_{xx}) / \text{dx_medio})) * \text{dx_medio} / \text{eaxmais}) + u_t$$

End Function

'Função da Carga

Function f_x(E, dh1, dh2, dx, ux, uxx, uxxx, no)

' f_x é a carga em lbf

' E é o módulo de Elasticidade Young em psi

' dh1 é o diâmetro da haste da primeira seção em in

' dh2 é o diâmetro da haste da segunda seção em in

' dx é o delta x da seção em ft

' ux é a posição em i,j em ft

' uxx é a posição em i-1,j em ft

' uxx é a posição em i-2, j em ft

' no é o indicativo da seção

'Cálculo da área das hastes das duas seções em in2

$$A1 = 3.14159265359 * (dh1 ^ 2) / 4$$

$$A2 = 3.14159265359 * (dh2 ^ 2) / 4$$

If no = 1 Then

a = A1

Else

a = A2

End If

'Cálculo da carga em lbf

$$f_x = ((E * a) / (2 * dx)) * ((3 * ux) - (4 * uxx) + uxxx)$$

End Function