



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MODELOS DE COMPORTAMENTO DINÂMICO E ANÁLISE NODAL PARA  
BOMBEIO MECÂNICO**

Raphael Eliedson da Silva

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr. Rutacio de Oliveira Costa

Maio de 2015.

---

**RAPHAEL ELIEDSON DA SILVA**

**MODELOS DE COMPORTAMENTO DINÂMICO E ANÁLISE NODAL PARA  
BOMBEIO MECÂNICO**

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 2015.

---

Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa  
Orientador – UFRN

---

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

---

Prof. MSc. Sergio José Gonçalves e Silva  
Membro Examinador – UFRN

**DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho a minha avó e a meu amigo, **Odete Maria da Silva** e **Eduardo Leandro Peres Nogueira**, que estiveram sempre presentes me dando apoio e confiança nos momentos em que mais necessitei.*

## AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial a minha mãe e avó, que sempre me deram carinho, educação e me conduziram para o caminho certo. Obrigado por sempre acreditarem em mim durante toda minha vida acadêmica e por estarem sempre dispostos a me auxiliar, vocês são as melhores.

Ao meu amigo, Eduardo, por sempre tentar me alegrar e por todo o carinho e preocupação demonstrado.

Ao meu orientador, Prof<sup>o</sup>. Dr. Rutácio de Oliveira Costa, pela atenção, apoio, orientação e sugestões, estando sempre disponível para tirar dúvidas e ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas, pelos momentos de descontração durante todo o curso e durante a elaboração deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Petróleo e aos professores da Escola de Ciências e Tecnologia, por todo o conhecimento passado.

**SILVA, Raphael Eliedson** – “Modelos de comportamento dinâmico e análise nodal para 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. Rutácio de Oliveira Costa.

### Resumo

Quando há pressão disponível no reservatório para o escoamento dos fluidos produzidos até a superfície, os poços produzem por elevação natural, o que ocorre geralmente no início da vida produtiva do reservatório ou campo. Porém à medida que o fluido é produzido, a pressão cai e quando o reservatório não possui energia suficiente para elevar naturalmente o óleo, então ele "morre", isto é, a pressão disponibilizada pelo reservatório não supera a perda de carga ao longo do poço. Com o objetivo de adicionar energia para o reservatório e superar a perda de carga existente foram desenvolvidos os métodos de elevação artificial. O bombeio mecânico é o método de elevação artificial estudado neste trabalho. O estudo foi feito através do *Visual Basics for Applications* (VBA) presente no Excel e nele foi desenvolvido um programa capaz de estimar parâmetros de operação importantes para uma unidade de bombeio. A determinação desses parâmetros foi feita seguindo o procedimento descrito na “Norma API TR-11L”. Também está incluída no trabalho a análise nodal aplicada ao bombeio mecânico e os efeitos causados no resultado da análise nodal devido mudanças na frequência de bombeamento e no curso do pistão.

**Palavras-chave:** Métodos de elevação artificial, bombeio mecânico, análise nodal.

**SILVA, Raphael Eliedson** – “Modelos de comportamento dinâmico e análise nodal para 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. Rutácio de Oliveira Costa.

#### Abstract

When there is pressure available in the reservoir for the flow of the produced fluids to the surface, wells produce by natural (lift), which usually occurs at the beginning of the productive life of the reservoir or field. However, as the fluid is produced, the pressure drops and when a reservoir doesn't have enough energy to naturally raise the oil, then it "dies", that is, the pressure provided by the reservoir doesn't overcome the pressure drop along the well. In order to add energy to the reservoir and to overcome the existing pressure drop, methods of artificial lift have been developed. The sucker-rod pumping was the artificial lift method studied in this work. The study was done by Visual Basic for Applications (VBA) present in Excel and in it, a program was built that is able to estimate important operating parameters for a pumping unit. The determination of these parameters was performed following the developed described in the "API TR-11L standard". It's also included in the work nodal analysis applied to sucker-rod pumping and the effects on the result of the nodal analysis due to changes in the frequency of pumping and in the plunger stroke.

**Keywords:** Methods of artificial lift, sucker-rod pumping, nodal analysis.

**Sumário**

1.	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Métodos Pneumáticos .....	14
1.2	Bombeio Mecânico (BM) .....	15
1.3	Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) .....	18
1.4	Bombeio de Cavidades Progressivas (BCP) .....	18
2.	OBJETIVOS .....	19
2.1	Etapas do trabalho .....	20
3.	ASPECTOS TEÓRICOS.....	20
3.1	Propriedades dos fluidos .....	21
3.1.1	Densidade .....	21
3.1.2	Pressão de saturação ou pressão do ponto de bolha .....	21
3.1.3	Razão de solubilidade .....	22
3.1.4	Fator volume de formação do óleo .....	23
3.1.5	Fator volume de formação do gás .....	25
3.1.6	Fator de compressibilidade.....	25
3.2	Eficiência Volumétrica .....	28
3.3	Eficiência Natural de Separação de Gás .....	32
3.4	Perdas por Escorregamento.....	34
4.	METODOLOGIA .....	35
4.1	Modelos de Comportamento Dinâmico .....	35
4.1.1	Método Convencional .....	35
4.1.2	Método API TR 11L .....	36
4.2	Análise Nodal aplicada ao bombeio mecânico.....	54
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	57
5.1	Análise do programa de cálculo (Planilha Excel).....	57
5.2	Resultados da análise nodal .....	61
5.2.1	Curva IPR do reservatório .....	61
5.2.2	Análise Nodal aplicada ao exemplo da Norma API TR 11L.....	63
5.2.3	Influência da frequência de bombeamento sobre a análise nodal .....	64
5.2.4	Influência do curso do pistão sobre a análise nodal .....	66
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	67
6.1	Conclusões .....	67

6.2	Recomendações .....	68
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	68

---

### Lista de Figuras

Figura 1.1 - Poço equipado para surgência .....	13
Figura 1.2 - Poço equipado com <i>gas lift</i> .....	15
Figura 1.3 - Sistema de bombeio mecânico .....	16
Figura 1.4 - Poço equipado com bombeio mecânico .....	16
Figura 1.5 - Curso ascendente .....	17
Figura 1.6 - Curso descendente .....	17
Figura 1.7 - Poço equipado com bomba centrífuga submersa .....	18
Figura 1.8 - Poço equipado com bomba de cavidades progressivas.....	19
Figura 3.1- Gráfico típico de razão de solubilidade versus pressão .....	22
Figura 3.2 - Gráfico típico de fator volume de formação versus pressão .....	24
Figura 3.3 - Fator de Compressibilidade para gases reais.....	27
Figura 4.1 - Fator curso do pistão ( $S_p/S$ ) .....	42
Figura 4.2 - Fator de carga máxima na haste polida ( $F_1/(Sk_r)$ ).....	43
Figura 4.3 - Fator de carga mínima na haste polida ( $F_2/(Sk_r)$ ).....	45
Figura 4.4 - Fator de torque máximo ( $2T/(S^2kr)$ ).....	46
Figura 4.5 - Fator de potência na haste polida ( $F_3/(Sk_r)$ ).....	48
Figura 4.6 - Ajuste do fator de torque máximo para valores de $W_{rf}/(Sk_r)$ diferentes de 0,3 ( $T_a$ ).....	49
Figura 4.7 - Sequência para obtenção do deslocamento volumétrico.....	56
Figura 5.1 - Exemplo do procedimento presente na Norma API TR 11L .....	58
Figura 5.2 - Curva IPR de Vogel.....	62
Figura 5.3 - Análise nodal aplicada ao exemplo presente na norma API TR 11L. ....	64
Figura 5.4 - Influência da frequência de bombeamento na análise nodal.....	65
Figura 5.5 - Influência do curso do pistão na análise nodal.....	66

## Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Dados da coluna de hastes e da bomba (trecho da tabela 4.1) .....	37
Tabela 4.2 - Dados da coluna de produção.....	38
Tabela 4.3 - Fator curso do pistão ( $S_p/S$ ).....	43
Tabela 4.4 - Fator de carga máxima na haste polida ( $F1Skr$ ).....	44
Tabela 4.5 - Fator de carga mínima na haste polida ( $F2Skr$ ) .....	45
Tabela 4.6 - Fator de torque máximo ( $2TS^2kr$ ).....	47
Tabela 4.7 - Fator de potência na haste polida ( $F3Skr$ ) .....	48
Tabela 4.8 - Ajuste do fator de torque máximo ( $Ta$ ) .....	50
Tabela 5.1 - Dados de entrada .....	59
Tabela 5.2 - Dados da bomba, das hastes e da coluna de produção.....	59
Tabela 5.3 - Variáveis adimensionais, curso do pistão efetivo e eficiência volumétrica da bomba.....	60
Tabela 5.4 - Parâmetros adimensionais.....	61

## Lista de Símbolos e Abreviaturas

$\gamma_l$  é a densidade relativa do líquido.

$\rho_{lsc}$  é a massa específica do líquido medidas em condições padrão, em unidade de massa específica.

$\rho_{wsc}$  é a massa específica da água medida em condições padrão, em unidade de massa específica.

$\gamma_g$  é a densidade relativa do gás.

$\rho_{gsc}$  é a massa específica do gás medida em condições padrão, em unidade de massa específica.

$\rho_{ar\ sc}$  é a massa específica do ar medida em condições padrão, em unidade de massa específica.

$^{\circ}API$  é o grau API do óleo.

$p_b$  é a pressão de saturação ou pressão do ponto de bolha, em psia;

$R_s$  é a razão de solubilidade, em scf/STB;

T é a temperatura, °F;

P é a pressão, psia;

$\gamma_o$  é a densidade relativa do óleo.

$B_o$  é o fator volume de formação do óleo, em bbl/STB;

$p_{pc}$  é a pressão pseudocrítica do gás, em psia.

$T_{pc}$  é a temperatura pseudocrítica do gás, em °R.

$y_i$  é a fração molar do componente i do gás;

$p_{ci}$  é a pressão crítica do componente i do gás, em psia;

$T_{ci}$  é a temperatura crítica do componente i do gás, em °R.

$p_{pr}$  é a pressão pseudorreduzida do gás, em psia;

$T_{pr}$  é a temperatura pseudorreduzida do gás, em °R.

$Z$  é o fator de compressibilidade do gás.

$B_g$  é o fator volume de formação do gás, em ft<sup>3</sup>/scf;

$E_v$  é a eficiência volumétrica da bomba de fundo;

$Q_b$  é a vazão bruta de líquidos na superfície, em unidades de vazão.

$PD$  é o deslocamento volumétrico da bomba de fundo, em unidades de vazão ou mais comumente apresentada em bpd.

$Q_{osc}$  é a vazão de óleo medida nas condições padrão, em unidades de vazão.

$Q_{wsc}$  é a vazão de água medida nas condições padrão, em unidade de vazão.

$Q_o$  é a vazão de óleo medida em condições p e T quaisquer, em unidade de vazão.

$Q_w$  é a vazão de água medida em condições p e T quaisquer, em unidade de vazão.

$Q_{gl}$  é a vazão de gás livre medida em condições p e T quaisquer, em unidade de vazão.

$B_w$  é o fator volume formação da água, em bbl/STB;

$RGO$  é a razão gás-óleo, em scf/STB;

$E_s$  é a eficiência natural de separação de gás.

$RAO$  é a razão água-óleo;

$f_w$  é a fração volumétrica de água ou corte de água.

$f_o$  é a fração volumétrica de óleo ou corte de óleo.

$v_{sl}$  é a velocidade superficial de líquidos;

$v_{\infty}$  é a velocidade terminal de ascensão da bolha.

$\sigma$  é a tensão interfacial, dina/cm;

$\rho_o$  é a massa específica do óleo, em lb/ft<sup>3</sup>.

BSW é a fração entre o volume de água mais sedimentos e o volume total de líquidos acrescidos também dos sedimentos;

$T_a$  é a temperatura absoluta, em °R;

$q_s$  é a vazão de escorregamento, bpd;

$d$  é o diâmetro do pistão, in;

$\Delta p$  é o diferencial de pressão sobre o pistão, psi;

$\Delta d$  folga entre o pistão e a camisa, in;

$\mu$  é a viscosidade do líquido, cp;

$l$  é o comprimento do pistão, in.

H é o nível dinâmico do fluido, em ft.

L é a profundidade de assentamento da bomba, em ft.

G é a densidade relativa do fluido;

S é o curso do pistão, em in.

D é o diâmetro do pistão, em in.

Sp é o curso efetivo do pistão, em in.

PPRL é a carga máxima na haste polida, em lbf.

MPRL é a carga mínima na haste polida, em lbf.

PT é o máximo torque na manivela, em lbf.in.

PRHP é a potência na haste polida, em HP.

CBE é o contrabalaceio requerido, em lbf.

$N_0$  é a velocidade síncrona de bombeio para uma coluna de hastes formada por um único diâmetro, em CPM.

$N_0'$  é a velocidade síncrona de bombeio para uma coluna de hastes combinado, em CPM.

$F_0$  é a carga de fluido sobre o pistão, em lbs.

$K_r$  é a constante elástica da haste polida, em lbf/in.

$W_{rf}$  é o Peso da coluna de hastes no fluido, em lbf.

$v_s$  é a velocidade do som no material da haste, ft/s.

$L$  é o comprimento da coluna de hastes, ft.

$F_c$  é o fator de frequência.

$L_i$  é o comprimento de uma seção uniforme  $i$ , em ft.

$E_{ri}$  é a constante elástica por unidade de comprimento da seção uniforme  $i$ , em in/lbf/ft.

$W_{rf}$  é o peso de coluna de hastes no fluido, em lbf.

$H_i$  é o nível dinâmico associado ao  $p_{wf_i}$ , em ft.

$p_{wf_i}$  é a pressão de fluxo no fundo do poço, em psi.

$q_{L_i}$  é a vazão bruta de líquidos na superfície associada a cada  $p_{wf_i}$ , em bpd.

$E_{v_i}$  é a eficiência volumétrica da bomba associada a cada  $p_{wf_i}$ .

$PD_i$  é o deslocamento volumétrico da bomba associado a cada  $p_{wf_i}$ , em bpd.

$q_{m\acute{a}x}$  é a vazão máxima calculado pela equação de Vogel, unidade de vazão.

$p_e$  é a pressão estática do reservatório, em psi.

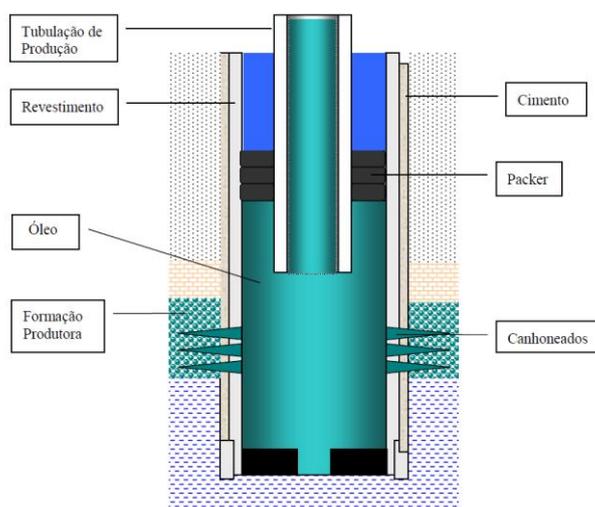
## 1. INTRODUÇÃO

Para ocorrer à produção de petróleo e gás inicialmente é necessário realizar descobertas de uma reserva potencialmente portadora de hidrocarbonetos através de estudos geológico/sísmicos e analisar a viabilidade econômica da produção neste campo. Posteriormente temos a construção de poços com a finalidade de atravessar uma ou mais zonas portadoras de hidrocarboneto, tal operação é denominada de perfuração. Após a perfuração, o poço deve ser revestido e cimentado, garantido a integridade e o isolamento entre poço e formação.

Uma vez o poço devidamente completado e amortecido, realiza-se a operação de canhoneio, que consiste na denotação de uma carga explosiva que atravessa revestimento, cimento e formação, comunicando a formação com o poço. Testes de formação e simulação numérica irão definir a viabilidade de elevar naturalmente o petróleo.

A elevação natural ocorre comumente no início da vida produtiva do campo ou reservatório. Contudo, esta condição de surgência depende, dentre outros fatores, também da Razão Gás-Óleo (RGO). Se a RGO é alta, o poço pode permanecer surgente por muito tempo. Esses poços são caracterizados por possuir pressão no fundo do poço suficiente para superar a perda de carga ao longo do poço. A Figura 1.1 ilustra um poço equipado para surgência.

Figura 1.1 - Poço equipado para surgência



Fonte: COSTA, Rutácio. 2008, p. 2

Quando um reservatório não possui energia suficiente para elevar naturalmente o óleo, então ele "morre", isto é, a pressão disponibilizada pelo reservatório não supera a perda de pressão ao longo do poço. Segundo Gábor Takács (2003, p.1):

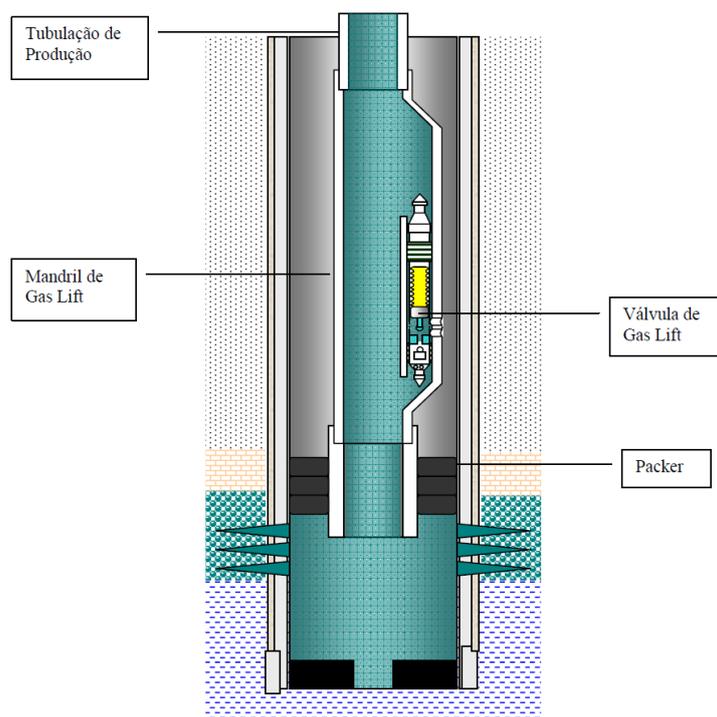
"Existem duas principais causas para a *morte* de um poço: ou a pressão de fundo de poço cai para um nível que já não é suficiente para superar as perdas de pressões no poço, ou as perdas de pressão aumentam acima da pressão de fundo necessária para o poço produzir."

Quando um poço deixa de elevar naturalmente ou é necessário aumentar a vazão de produção torna-se necessário a aplicação de um método de elevação artificial. Vários sistemas de elevação estão disponíveis para escolha, e todos seguem o princípio de suplementação de energia para conduzir o fluido até a superfície. Um mecanismo usado é a utilização de uma bomba próximo aos canhoneados, outro mecanismo utilizado é a injeção de gás comprimido periodicamente ou continuamente ao longo da coluna de produção.

Os métodos de elevação artificiais mais comuns empregados na indústria são bombeio mecânico (BM), bombeio de cavidades progressivas (BCP), bombeio centrífugo submerso (BCS) e *gas lift*.

### 1.1 Métodos Pneumáticos

O *gas lift* pode ser utilizado de três formas: Injeção contínua de *gas lift*, onde o gás comprimido é injetado continuamente na coluna de produção através de válvulas, com objetivo de reduzir o gradiente de pressão ao longo do poço; Injeção intermitente de *gas lift*, onde o gás é injetado periodicamente, com a finalidade de empurrar a coluna de líquido até a superfície; *Plunger lift*, usa um êmbolo livre que separa o líquido do gás e viaja ao longo do tubo deslocado pelo gás injetado. A Figura 1.2 mostra um poço equipado com *gas lift* contínuo.

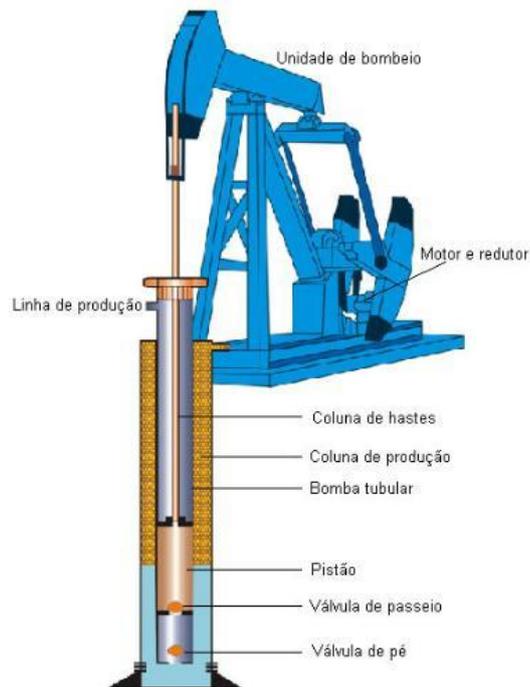
Figura 1.2 - Poço equipado com *gas lift* contínuo

Fonte: COSTA, Rutácio. 2008, p. 6

## 1.2 Bombeio Mecânico (BM)

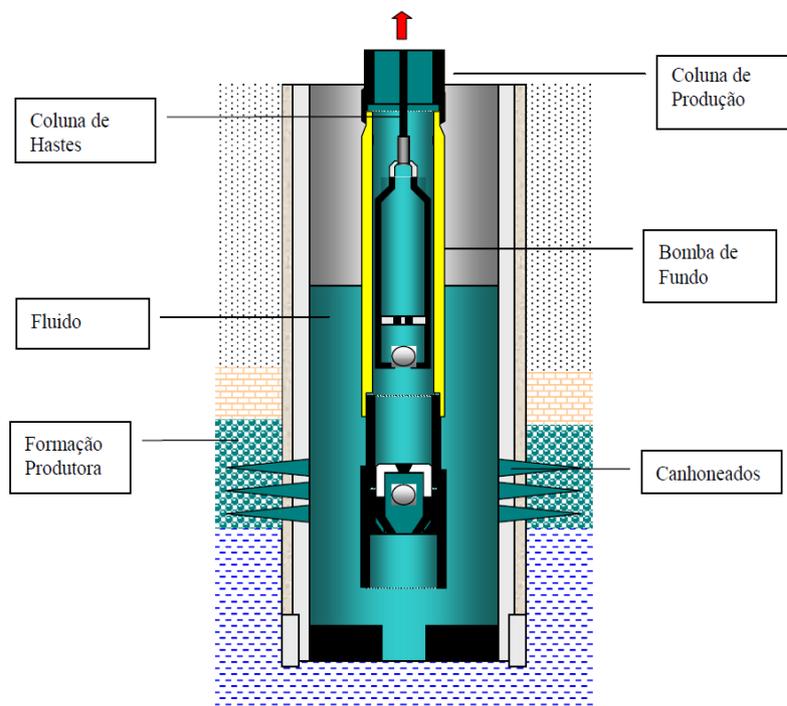
No bombeio mecânico, o movimento rotativo do motor elétrico ou de combustão interna é convertido em movimento alternativo na unidade de bombeio e transmitido à coluna de hastes. A coluna de hastes transmite o movimento alternativo até o fundo do poço e aciona a bomba que eleva os fluidos até a superfície. O movimento alternativo e o trabalho conjunto das válvulas de pé e passeio permitem a transmissão de energia mecânica aos fluidos produzidos e aumento da pressão na descarga. A Figura 1.3 ilustra um sistema de bombeio mecânico e a Figura 1.4 mostra um poço equipado com bombeio mecânico.

Figura 1.3 - Sistema de bombeio mecânico



Fonte: THOMAS, José. 2001, p. 242

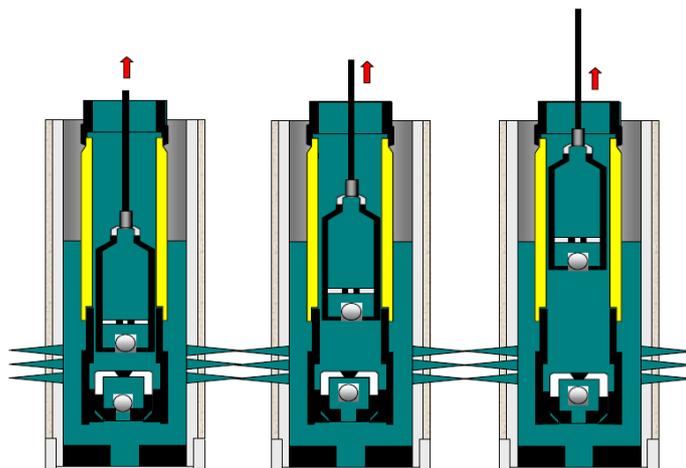
Figura 1.4 - Poço equipado com bombeio mecânico



Fonte: COSTA, Rutácio. 2008, p. 3

No curso ascendente a pressão do fluido presente na coluna de produção acima da válvula de passeio mantém a válvula de passeio fechada. Abaixo do pistão cria-se uma região de baixa pressão que causa a abertura da válvula de pé, permitindo a passagem dos fluidos que estão ocupando o anular para o interior da bomba de fundo, como mostrado na Figura 1.5.

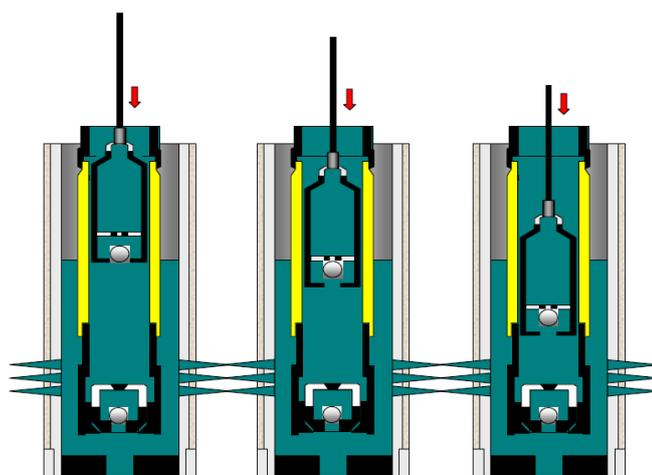
Figura 1.5 - Curso ascendente



Fonte: COSTA, Rutácio. 2008, p. 41

No curso descendente, ocorrerá um aumento de pressão na região entre as duas válvulas que ocasionará o fechamento da válvula de pé e abertura da válvula de passeio, permitindo o acesso do fluido ao interior do pistão. Como mostrado na Figura 1.6.

Figura 1.6 - Curso descendente

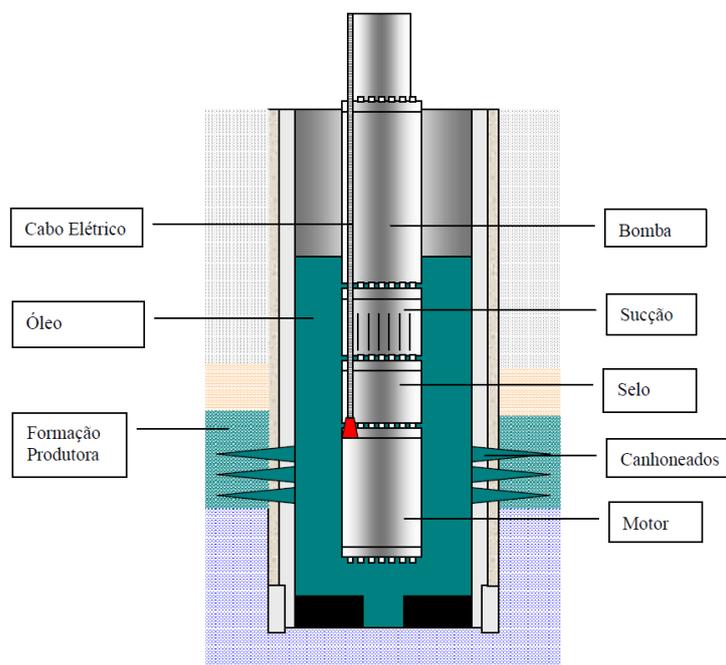


Fonte: COSTA, Rutácio. 2008, p. 42

### 1.3 Bombeio Centrífugo Submerso (BCS)

Neste tipo de bombeio, é usado um motor elétrico submerso que deverá ser alimentado por cabo elétrico a partir da superfície. O motor converte energia elétrica provinda do cabo em energia mecânica e está conectado a uma bomba centrífuga de múltiplos estágios que transmite essa energia em forma de pressão ao fluido, elevando-o à superfície. A figura 1.7 traz uma ilustração de poço equipado com BCS.

Figura 1.7 - Poço equipado com bomba centrífuga submersa

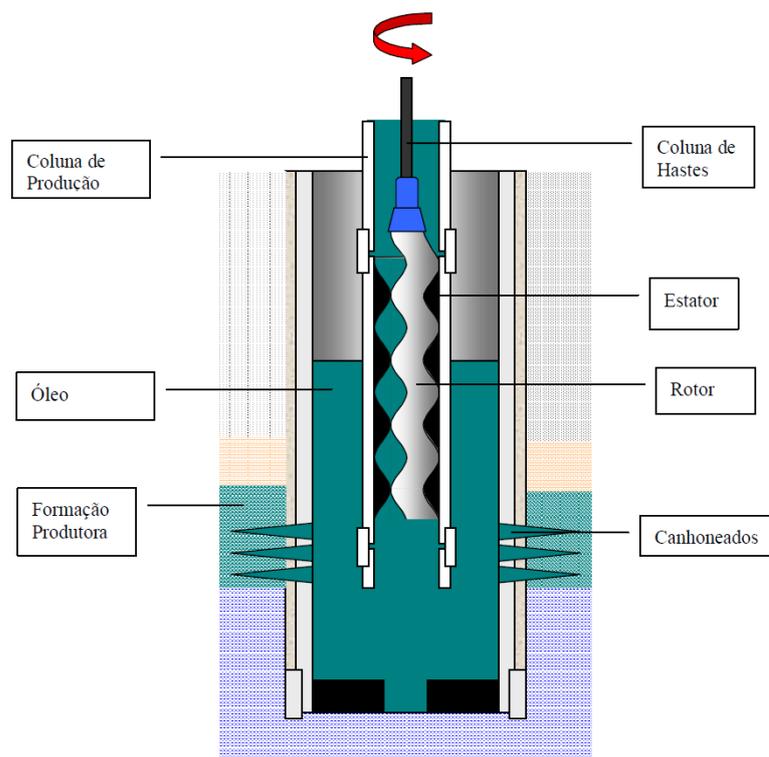


Fonte: COSTA, Rutácio. 2008, p. 5

### 1.4 Bombeio de Cavidades Progressivas (BCP)

Neste tipo de bombeio, a energia complementar é fornecida pelo movimento rotativo da coluna de hastes que aciona um rotor helicoidal que está no interior de um estator, gerando cavidades que progressivamente fazem o fluido deslocar-se do sentido de sucção para a descarga da bomba, realizando a ação de bombeio. Na Figura 1.8 tem-se uma ilustração de poço equipado com BCP.

Figura 1.8 - Poço equipado com bomba de cavidades progressivas



Fonte: COSTA, Rutácio. 2008, p. 4

Dentre os métodos de elevação artificial, o bombeio mecânico é o mais antigo e mais utilizado em todo mundo. Segundo a Petrobras, dos poços que utilizam sistemas de elevação artificial no Brasil aproximadamente 70% são de bombeio mecânico.

## 2. OBJETIVOS

Demonstrar a viabilidade e a utilidade prática da análise nodal em sistemas de bombeio mecânico. Mesmo com a pequena abordagem feita na literatura sobre análise nodal, sendo que foi encontrado somente um artigo publicado no IPTC (*International Petroleum Technology Conference*) intitulada “The Piston Tubing Rod Performance Curve: A New and Useful Concept for Sucker-Rod-Pumping Analysis”. É objetivo também deste trabalho a construção de um algoritmo capaz de reproduzir os resultados apresentados no procedimento descrito na Norma API TR 11L para determinação de parâmetros operacionais de bombeio mecânico, como: Carga máxima na haste polida (PPRL), Carga mínima na haste polida (MPRL), Efeito de contrabalanceio (CBE),

Troque máximo na saída do redutor de velocidade (PT), Potência na haste polida (PRHP), deslocamento volumétrico da bomba (PD) e vazão volumétrica de produção.

## **2.1 Etapas do trabalho**

Inicialmente serão determinadas as propriedades do fluido. Propriedades tais como: razão de solubilidade ( $R_s$ ) pela correlação de Standing, fator volume de formação ( $B_o$ ) pela correlação de Standing, fator de compressibilidade ( $Z$ ) pela correlação proposta por Papay e fator volume de formação do gás ( $B_g$ ). As propriedades listadas acima serão aplicadas as condições de pressão e temperatura de sucção da bomba e serão utilizadas para a determinação da eficiência volumétrica da bomba e eficiência natural de separação de gás.

Em seguida serão determinados os parâmetros básicos de projeto através do procedimento de cálculo descrito na norma API TR-11L. Tais como: carga máxima na haste polida (PPRL), carga mínima na haste polida (MPRL), potência na haste polida (PRHP), torque máximo (PT), efeito de contrabalanço (CBE) e deslocamento volumétrico da bomba (PD). Nesta etapa do trabalho serão digitalizados os gráficos presentes na norma API TR-11L, recolhendo valores e construindo tabelas de valores que possibilitem a interpolação.

Por fim serão construídas e traçadas as curvas de IPR de Vogel e pressão requerida no sistema de elevação, determinando o ponto de operação do projeto. Será investigada também a influência da frequência de bombeamento e do comprimento do curso do pistão sobre a pressão requerida no sistema de elevação e determinada as melhores condições de operação para o poço.

## **3. ASPECTOS TEÓRICOS**

Nos aspectos teóricos serão apresentadas todas as equações que serão necessárias para emprego da análise nodal. Propriedades dos fluidos, eficiência volumétrica, eficiência de separação e perdas por escorregamento serão os tópicos estudados.

### 3.1 Propriedades dos fluidos

#### 3.1.1 Densidade

A densidade relativa dos fluidos é a relação entre a massa específica do fluido e a massa específica da água pura, ambas medidas em condições padrão (*standard conditions* = 14,7 psia @ 60°F). Como mostrado na Equação 3.1.

$$\gamma_l = \frac{\rho_{lsc}}{\rho_{wsc}} \quad (3.1)$$

Para gases, a densidade relativa será a relação entre a massa específica do gás e a massa específica do ar, ambas medidas em condições padrão. Como apresentado na Equação 3.2.

$$\gamma_g = \frac{\rho_{gsc}}{\rho_{ar\ sc}} \quad (3.2)$$

Pode-se expressar também a densidade do óleo através do grau API, usado na indústria de petróleo para classificar o óleo. Como apresentado na Equação 3.3.

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\gamma_l} - 131,5 \quad (3.3)$$

#### 3.1.2 Pressão de saturação ou pressão do ponto de bolha

Pressão de saturação ou pressão do ponto de bolha é a pressão onde ocorre a liberação da primeira bolha de gás da solução de líquido, resultando em mudanças de fase. O cálculo para estimar a pressão de saturação pode ser feito a partir da correlação proposta por Standing, mostrada na Equação 3.4:

$$p_b = 18 \cdot \left( \frac{R_s}{\gamma_g} \right)^{0,83} \cdot 10^y \quad (3.4)$$

$$y = 0,00091 \cdot T - 0,0125 \cdot ^{\circ}API$$

Onde:

$p_b$  é a pressão de saturação, psia;

$R_s$  é a razão de solubilidade a pressões acima da  $p_b$ , scf/STB;

T é a temperatura, °F;

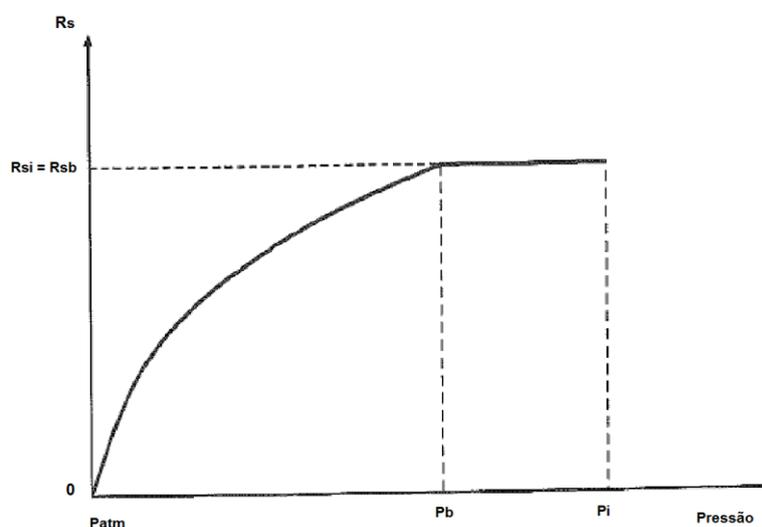
°API é o grau API do óleo;

$\gamma_g$  é a densidade relativa do gás;

### 3.1.3 Razão de solubilidade

Abaixo da pressão de bolha, óleo e gás liberado coexistem em equilíbrio. Isto significa que decréscimos na pressão fazem com que mais gás seja liberado da solução, e para estimar a quantidade de gás dissolvida ao óleo utiliza-se o parâmetro denominado razão de solubilidade ( $R_s$ ). Um típico gráfico de razão de solubilidade versus pressão é apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1- Gráfico típico de razão de solubilidade *versus* pressão



Fonte: ROSA, 2006, p.64

Em que:

$R_{si}$  e  $R_{sb}$  são a razão de solubilidade inicial e a razão de solubilidade do ponto de bolha, respectivamente;

$p_i$  e  $p_b$  são a pressão inicial e a pressão do ponto de bolha, respectivamente.

A razão de solubilidade é definida como a relação entre o volume de gás dissolvido, medido nas condições *standard*, e o volume de óleo também expresso em condições *standard*. Como apresentado na Equação 3.5.

$$R_s = \frac{V_{gás\ dissolvido\ sc}}{V_{o\ sc}} \quad (3.5)$$

A determinação da razão de solubilidade pode ser realizada pela seguinte correlação proposta por Standing, mostrada na Equação 3.6:

$$R_s = \gamma_g \cdot \left[ \frac{p}{18} \cdot 10^{(0,0125 \cdot \text{°API} - 0,00091 \cdot T)} \right]^{1,204819} \quad (3.6)$$

Onde:

$R_s$  é a razão de solubilidade, scf/STB;

$\gamma_g$  é a densidade relativa do gás;

P é a pressão, psia;

T é a temperatura na sucção da bomba, °F;

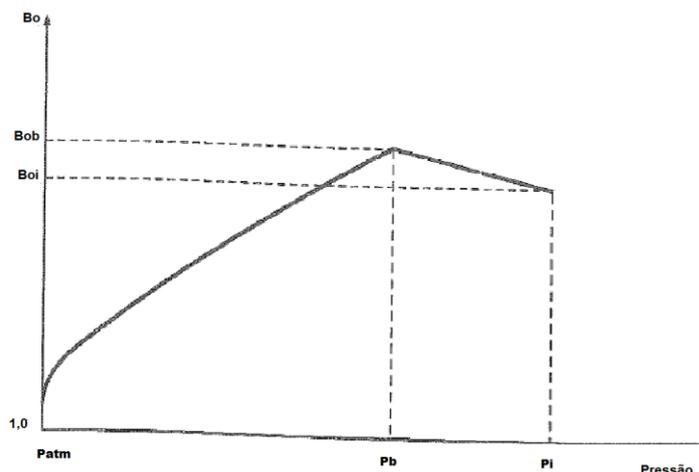
°API é o grau API do óleo.

Para pressões maiores que a pressão do ponto de bolha, a razão de solubilidade é constante e igual à razão gás-óleo (RGO). Nestas condições, o óleo é denominado subsaturado, ou seja, todo o gás está dissolvido no óleo.

#### 3.1.4 Fator volume de formação do óleo

O fator volume de formação representa a variação do volume de uma fase (líquida ou gasosa) como uma resposta à variação nas condições de pressão e temperatura e dissolução do gás no óleo. Um típico gráfico de fator volume de formação versus pressão é apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Gráfico típico de fator volume de formação *versus* pressão



Fonte: ROSA, 2006, p. 63

Em que:

$B_{oi}$  e  $B_{ob}$  são o fator volume de formação do óleo inicial e o fator volume de formação do óleo no ponto de bolha, respectivamente;

$p_i$  e  $p_b$  são a pressão inicial e a pressão do ponto de bolha, respectivamente.

Este parâmetro relaciona o volume de óleo, em determinadas condições de pressão e temperatura, com o volume em condições padrão. Apresentada na Equação 3.7:

$$B_o = \frac{V_o(p,T)}{V_{osc}} \quad (3.7)$$

Standing propôs a expressão a seguir válida para pressões inferiores a pressão do ponto de bolha, ou seja, na região bifásica. Mostrada na Equação 3.8.

$$B_o = 0,972 + 0,000147 \cdot F^{1,125} \quad (3.8)$$

$$F = R_s \cdot \sqrt{\frac{\gamma_g}{\gamma_o}} + 1,25 \cdot T$$

Onde:

$R_s$  é a razão de solubilidade, scf/STB;

T é a temperatura, °F;

$B_o$  é o fator volume de formação, bbl/STB.

### 3.1.5 Fator volume de formação do gás

A obtenção do fator volume de formação do gás ( $B_g$ ) pode ser feita através da equação de estado para gás real, considerando que o número de moles se mantém constante em quaisquer condições de pressão e temperatura, portanto, admite-se a igualdade da Equação 3.9:

$$\frac{P.V}{Z.T} = \left( \frac{P.V}{Z.T} \right)_{sc} \quad (3.9)$$

A partir da equação 3.9 pode-se escrever a Equação 3.10:

$$B_g = \frac{V}{V_{sc}} = \frac{p_{sc} \cdot Z \cdot T}{p \cdot Z_{sc} \cdot T_{sc}} \quad (3.10)$$

Conhecendo as condições standard, podemos substituir  $p_{sc} = 14,7 \text{ psia}$ ,  $T_{sc} = 520 \text{ }^\circ\text{R}$  e  $Z_{sc} = 1$ . Assim a equação 3.10 se reduz a Equação 3.11:

$$B_g = 0,0283 \cdot \frac{Z \cdot T}{p} \quad (3.11)$$

Onde:

$B_g$  é o fator volume de formação do gás, expresso em  $\text{ft}^3/\text{scf}$ .

Z é o fator de compressibilidade;

T é a temperatura na sucção da bomba, expresso em °R;

p é a pressão, expresso em psia.

### 3.1.6 Fator de compressibilidade

Segundo Takács (2005) a equação de estado de engenharia difere da lei dos gases ideais com a inclusão de apenas o fator de desvio de gás, o qual é por vezes referido como fator de compressibilidade. Representa o desvio do volume de gás real a partir do volume de um gás ideal, sob as mesmas condições e é definido como nas Equações 3.12 e 3.13:

$$P.V = Z.n.R.T \quad (3.12)$$

$$Z = \frac{V_{real}}{V_{ideal}} \quad (3.13)$$

Ainda segundo Takács (2005), o problema para descrever o comportamento de um gás real é reduzido à determinação de um fator de desvio do gás ideal. O mais comum é determinar o fator de desvio baseado no teorema de estados correspondentes. Este princípio aproxima o comportamento de gás real (mistura de gases) a parâmetros pseudoreduzidos. Os parâmetros pseudoreduzidos são expressos pelas Equações 3.14 e 3.15.

$$p_{pr} = \frac{p}{p_{pc}} \quad (3.14)$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad (3.15)$$

Onde  $p_{pc}$  e  $T_{pc}$  são pressão e temperatura pseudocríticos do gás, podem ser obtidos conhecendo as frações molares e a pressão e temperatura críticos individuais de cada componente do gás, como mostra as Equações 3.16 e 3.17.

$$p_{pc} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot p_{ci} \quad (3.16)$$

$$T_{pc} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot T_{ci} \quad (3.17)$$

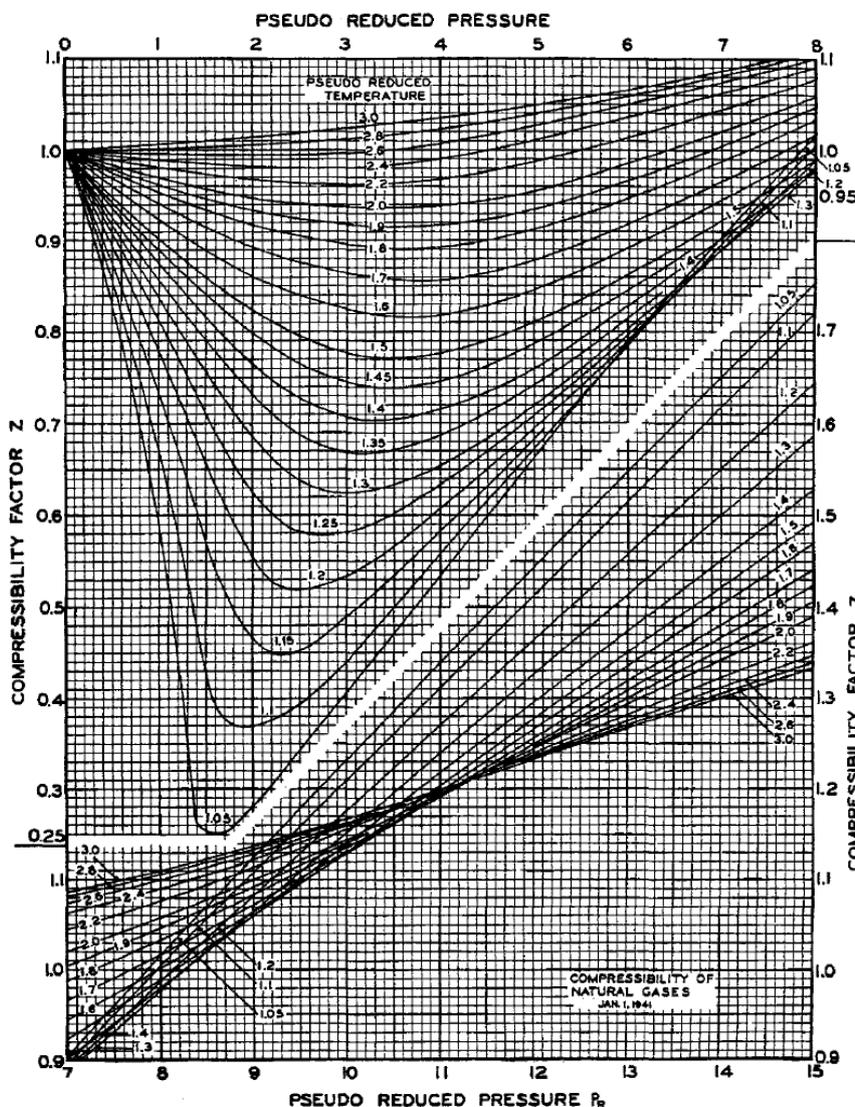
Se a composição do gás não é conhecida, então pode se estimar a pressão e temperatura pseudocrítica do gás através da equação proposta por Hankinson-Thomas-Phillips em função da densidade relativa do gás expressas nas Equações 3.18 e 3.19.

$$p_{pc} = 709,6 - 56,7 \cdot \gamma_g \quad (3.18)$$

$$T_{pc} = 170,5 + 307,3 \cdot \gamma_g \quad (3.19)$$

Standing e Katz elaboraram o gráfico para extração do fator Z em função da pressão e temperatura pseudoreduzidas e está reproduzido na Figura 3.3:

Figura 3.3 - Fator de Compressibilidade para gases reais



Fonte: TAKÁCS, 2005, p. 16

Takacs (2005) sugere o uso da correlação proposta por Papay para determinação do fator de compressibilidade expressa na Equação 3.17:

$$Z = 1 - \frac{3,52 \cdot p_{pr}}{10^{0,9813 \cdot T_{pr}}} + \frac{0,274 \cdot p_{pr}^2}{10^{0,8157 \cdot T_{pr}}} \tag{3.20}$$

### 3.2 Eficiência Volumétrica

A eficiência volumétrica da bomba de fundo pode ser definida como a relação entre a vazão bruta de líquidos na superfície e o volume deslocado pela bomba no fundo, e seu baixo valor pode indicar a presença de gás na sucção da bomba; insuficiência do fluxo de líquido da formação ou presença de restrições na sucção da bomba, vazamento nas válvulas ou entre pistão e camisa.

As propriedades dos fluidos determinadas na sucção da bomba serão importantes para determinação da eficiência volumétrica da bomba. Pode-se definir a eficiência volumétrica ( $E_v$ ) como sendo a razão entre a vazão bruta de líquidos ( $Q_b$ ) e o deslocamento volumétrico (PD), como mostrado na equação 3.21.

$$E_v = \frac{Q_b}{PD} \quad (3.21)$$

A vazão bruta de líquidos representa o fluxo de óleo e água na superfície, em condições padrão, então se pode definir como na Equação 3.22:

$$Q_b = Q_{osc} + Q_{wsc} \quad (3.22)$$

Desprezando-se vazamentos e restrições na sucção da bomba, o deslocamento volumétrico da bomba representa o volume de líquidos e o volume de gás livre deslocados pela bomba, nas condições presentes na sucção da bomba. Então se pode expressar PD como na Equação 3.23:

$$PD = Q_o + Q_w + Q_{gl} \quad (3.23)$$

Podemos reescrever a Equação 3.23 em função dos fatores volumes de formação do óleo, água e gás. A vazão de óleo nas condições de sucção da bomba pode ser escrita pela Equação 3.24:

$$Q_o = Q_{osc} \cdot B_o(p_{suc}, T) \quad (3.24)$$

E para a vazão de água, tem-se a Equação 3.25:

$$Q_w = Q_{wsc} \cdot B_w(p_{suc}, T) \quad (3.25)$$

Será considerado  $B_w = 1$ , pois geralmente a água sofre alterações insignificantes no volume para grandes variações da pressão.

A vazão de gás livre que chega a superfície está expressa na Equação 3.26:

$$Q_{GL_{sc}} = Q_{o_{sc}} \cdot [RGO - R_s(p_{suc}, T)] \quad (3.26)$$

A vazão de gás livre nas condições de sucção da bomba pode ser determinada efetuando o produto do fator volume de formação nas condições da entrada da bomba pela vazão de gás livre que chega a superfície, conforme a Equação 3.27:

$$Q_{GL_{total}} = Q_{GL_{sc}} \cdot B_g(p_{suc}, T) = Q_{o_{sc}} \cdot [RGO - R_s(p_{suc}, T)] \cdot B_g(p_{suc}, T) \quad (3.27)$$

Na Equação 3.27 a vazão de gás livre recebeu a notação de total, tal denotação é adequada, pois se refere à vazão de gás livre total produzida pelo reservatório. Sendo que parte dessa vazão deve seguir pelo anular e outra parte deve seguir pelo interior da bomba (Equação 3.28).

$$Q_{GL_{total}} = Q_{GL_{anular}} + Q_{GL_{bomba}} \quad (3.28)$$

A eficiência natural de separação de gás pode ser definida como a razão entre a vazão de gás livre produzida que segue pelo anular e a vazão de gás livre total produzida, como mostra a Equação 3.29:

$$E_s = \frac{Q_{GL_{anular}}}{Q_{GL_{total}}} \quad (3.29)$$

Finalmente pode-se deduzir a expressão para a vazão de gás livre produzida pela bomba (Equação 3.31). Partindo da Equação 3.28:

$$Q_{GL_{bomba}} = Q_{GL_{total}} - Q_{GL_{anular}}$$

Substituindo a definição de eficiência natural de separação de gás (Equação 3.29):

$$Q_{GL_{bomba}} = Q_{GL_{total}} - E_s \cdot Q_{GL_{total}} = Q_{GL_{total}} \cdot (1 - E_s) \quad (3.30)$$

$$Q_{GL_{bomba}} = Q_{o_{sc}} \cdot [RGO - R_s(p_{suc}, T)] \cdot B_g(p_{suc}, T) \cdot (1 - E_s) \quad (3.31)$$

Substituindo as Equações 3.24, 3.25 e 3.31 na Equação 3.23, tem-se a Equação 3.32:

$$PD = Q_{osc} \cdot B_o(p_{suc}, T) + Q_{wsc} \cdot B_w(p_{suc}, T) + [RGO - R_s(p_{suc}, T)] Q_{osc} \cdot B_g(p_{suc}, T) \cdot (1 - E_s) \quad (3.32)$$

Em termos geométricos, a expressão para deslocamento volumétrico como função do diâmetro do pistão, curso do pistão e frequência de bombeamento está expressa na Equação 3.33:

$$PD = 0,01853 \cdot d_p^2 \cdot S_p \cdot N \quad (3.33)$$

Onde:

PD é o deslocamento volumétrico, em m<sup>3</sup>/dia;

$d_p$  é o diâmetro do pistão, em pol;

$S_p$  é o curso do pistão, em pol.

N é a frequência de bombeamento, em cpm.

Os pressupostos de validade para essa expressão são: desprezam-se vazamentos na folga entre o pistão e a camisa da bomba e vazamentos no conjunto sede-esfera, bem como o espaço morto desprezível em relação ao curso do pistão.

Relembrando também a definição de razão água-óleo. A razão água-óleo (RAO) é a relação entre o volume de água e o volume de óleo, ambas medidas em condições *standard*, como na Equação 3.34:

$$RAO = \frac{Q_{wsc}}{Q_{osc}} \quad (3.34)$$

Definindo também a fração volumétrica de água ou corte de água. O corte de água é a relação entre o volume de água e o volume total de líquidos, ambas medidas em condições *standard*, como na Equação 3.35:

$$f_w = \frac{Q_{wsc}}{Q_{wsc} + Q_{osc}} \quad (3.35)$$

Substituindo a Equação 3.34 na Equação 3.35, tem-se a Equação 3.36:

$$f_w = \frac{RAO \cdot Q_{osc}}{RAO \cdot Q_{osc} + Q_{osc}} = \frac{RAO}{RAO + 1} \quad (3.36)$$

E o corte de óleo será expresso pela Equação 3.37:

$$f_o = 1 - f_w = 1 - \frac{RAO}{RAO+1} \rightarrow f_o = \frac{1}{RAO+1} \quad (3.37)$$

Dotado das equações acima e realizando alguns procedimentos matemáticos, a equação para eficiência volumétrica pode ser expressa como:

Partindo da Equação 3.21, tem-se:

$$E_v = \frac{Q_b}{PD}$$

Substituindo na equação 3.21 as equações 3.22 e 3.32, tem-se a Equação 3.38:

$$E_v = \frac{Q_{osc} + RAO \cdot Q_{osc}}{Q_{osc} \cdot B_o(p_{suc}, T) + RAO \cdot Q_{osc} \cdot B_w(p_{suc}, T) + [RGO - R_s(p_{suc}, T)] \cdot Q_{osc} \cdot B_g(p_{suc}, T) \cdot (1 - E_s)} \quad (3.38)$$

Dividindo a expressão, no numerador e no denominador por  $Q_{osc}$ , a equação se reduz a Equação 3.39:

$$E_v = \frac{1 + RAO}{B_o(p_{suc}, T) + RAO \cdot B_w(p_{suc}, T) + [RGO - R_s(p_{suc}, T)] \cdot B_g(p_{suc}, T) \cdot (1 - E_s)} \quad (3.39)$$

E empregando as definições para corte de água (Equação 3.36) e para corte de óleo (Equação 3.37), pode-se finalmente chegar a expressão para eficiência volumétrica aproximada, mostrada na Equação 3.40:

$$E_v = \frac{1}{B_o(p_{suc}, T) \cdot (1 - f_w) + B_w(p_{suc}, T) \cdot f_w + [RGO - R_s(p_{suc}, T)] \cdot B_g(p_{suc}, T) \cdot (1 - f_w) \cdot (1 - E_s)} \quad (3.40)$$

Ao final do curso ascendente a bomba de fundo contém as fases líquida e gasosa coexistindo, o que afeta na eficiência volumétrica. Portanto, a Equação 3.40 expressa a eficiência volumétrica dependente do fator volume de formação das fases líquida e gasosa, da razão de solubilidade do gás no óleo nas condições de pressão e temperatura de sucção, desde que haja capacidade do reservatório de alimentar a bomba.

A expressão obtida considera um espaço morto desprezível em relação ao curso do pistão, portanto qualquer efeito causado pela abertura da válvula de pé sobre a eficiência volumétrica da bomba é negligenciado.

### 3.3 Eficiência Natural de Separação de Gás

No Subitem 3.2 foi abordada a eficiência volumétrica de um sistema equipado com bombeio mecânico, bem como foi apresentada uma equação que permite a determinação da eficiência volumétrica, e foi comprovada a influência da presença de gás sobre tal parâmetro.

Assim, estimar a quantidade de gás presente na sucção da bomba é de fundamental importância para boa aproximação dos resultados.

A eficiência natural de separação de gás representa a fração de gás livre que não penetra na bomba, mas escapa pelo espaço anular entre a coluna de produção e o revestimento.

Alhanati (1993) propõe um modelo simplificado para prever a eficiência natural de separação de gás expressa na Equação 3.41:

$$E_s = \frac{v_\infty}{v_\infty + v_{sl}} \quad (3.41)$$

Onde:

$v_{sl}$  é a velocidade superficial de líquidos;

$v_\infty$  é a velocidade terminal de ascensão da bolha.

A velocidade terminal de ascensão da bolha expressa por Harmathy (em ft/s) é mostrada na Equação 3.42:

$$v_\infty = \sqrt{2} \cdot \left[ \frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{0,25} \quad (3.42)$$

Onde:

$\sigma$  é a tensão interfacial, lb/s<sup>2</sup>;

$g = 32,2 \text{ ft/s}^2$  é a aceleração gravitacional;

$\rho_l$  é a massa específica do líquido, lb/ft<sup>3</sup>;

$\rho_g$  é a massa específica do gás, lb/ft<sup>3</sup>;

A massa específica do líquido e do gás, que são usadas na expressão de Harmathy, podem ser obtido a partir das expressões nas Equações 3.43, 3.44 e 3.45:

- Massa específica do óleo (em lb/ft<sup>3</sup>):

$$\rho_o = \frac{350,4 \cdot \gamma_o + 0,0764 \cdot \gamma_g \cdot Rs(p,T)}{5,61 \cdot B_o(p,T)} \quad (3.43)$$

Onde:

$\gamma_o$  é a densidade relativa do óleo;

$\gamma_g$  é a densidade relativa do gás;

$Rs(p, T)$  é a razão de solubilidade em condições de pressão e temperatura, em ft<sup>3</sup>/STB;

$B_o(p, T)$  é o fator volume de formação do óleo em condições de pressão e temperatura, em bbl/STB.

- Massa específica do líquido (em lb/ft<sup>3</sup>):

$$\rho_l = \rho_o \cdot (1 - f_w) + \rho_w \cdot f_w \quad (3.44)$$

Onde:

$\rho_o$  é a massa específica do óleo, em lb/ft<sup>3</sup>

$\rho_w$  é a massa específica da água, em lb/ft<sup>3</sup>

$f_w$  é a fração entre o volume de água mais sedimentos e o volume total de líquidos acrescidos também dos sedimentos.

- Massa específica do gás (em lb/ft<sup>3</sup>):

$$\rho_G = 2,7 \cdot \gamma_G \cdot \frac{p}{Z \cdot T_a} \quad (3.45)$$

Onde:

$p$  é a pressão, em psia

$Z$  é o fator de compressibilidade do gás

$T_a$  é a temperatura absoluta, em °R

### 3.4 Perdas por Escorregamento

A perda por escorregamento é definida como o retorno do fluido presente na descarga através da folga existente entre o pistão e a camisa para a sucção da bomba. Isto causa uma indesejada redução na eficiência volumétrica da bomba. Importante informar que a folga existente entre o pistão e a camisa é da ordem de milésimos de polegada.

Para estimar esse vazamento, uma fórmula aproximada foi apresentada por Takács e está apresentada na Equação 3.46:

$$q_s = \frac{1,006 \cdot 10^6 \cdot d \cdot \Delta p \cdot \Delta d^3}{\mu \cdot l} \quad (3.46)$$

Onde:

$q_s$  é a vazão de escorregamento, bpd;

$d$  é o diâmetro do pistão, in;

$\Delta p$  é o diferencial de pressão sobre o pistão, psi;

$\Delta d$  folga entre o pistão e a camisa, in;

$\mu$  é a viscosidade do líquido, cp;

$l$  é o comprimento do pistão, in.

A perda por escorregamento é um efeito indesejável e presente durante o bombeio. Tal efeito pode ser negligenciado, pois causa pouca influência sobre a eficiência volumétrica, mas pode ser incorporada a expressão e dela se obter resultados mais precisos.

O escorregamento reduz a vazão bruta de líquidos. O seu efeito, porém é um pouco mais complicado de se prever, porque o retorno da descarga para a sucção modifica as premissas iniciais de cálculo da eficiência volumétrica.

#### **4. METODOLOGIA**

Neste trabalho será elaborada uma planilha Excel com utilização do *Visual Basics for Applications* (VBA) para determinação de parâmetros de comportamento dinâmico para bombeio mecânico, tais como: carga máxima na haste polida (PPRL), carga mínima na haste polida (MPRL), potência na haste polida (PRHP), torque máximo (PT), efeito de contrabalanço (CBE) e deslocamento volumétrico da bomba (PD). A determinação desses parâmetros será feita utilizando o procedimento apresentado na “Norma API TR-11L”.

A determinação da eficiência volumétrica da bomba será incluída ao trabalho, com o objetivo de possibilitar o cálculo da vazão bruta de líquidos na superfície.

##### **4.1 Modelos de Comportamento Dinâmico**

Neste subcapítulo do trabalho serão apresentados dois diferentes métodos capazes de estimar os mais importantes parâmetros operacionais do bombeio mecânico: o método convencional e o método apresentado na norma API TR 11L.

Com destaque para o modelo descrito na norma API TR 11L que será usado neste trabalho e é o modelo mais empregado para determinação dos parâmetros operacionais.

###### **4.1.1 Método Convencional**

Este método surgiu nos anos 30, através das contribuições de Marsh, Coberly Slonneger e Mills, segundo Lekia, 1989. O modelo conhecido como método convencional é um procedimento semi-empírico que assume várias hipóteses simplificadoras, como: o poço é vertical, os efeitos dinâmicos e o atrito são desprezíveis.

#### 4.1.2 Método API TR 11L

Com a necessidade de métodos mais confiáveis de cálculo de parâmetros operacionais de bombeio mecânico, a sociedade sem fins lucrativos Sucker Rod Pumping Research, Inc., fundada em 1954, desenvolveu depois de algumas tentativas um modelo elétrico-analógico para simular o sistema de bombeio com mais precisão. Além de se mostrar um modelo simples de operar, o seu uso trouxe melhoria na descrição da propagação de ondas de tensão longitudinais que viajam ao longo das hastes durante o bombeio, que passou a ser calculado com muito mais exatidão.

O procedimento de cálculo apresentado na Norma API TR 11L será detalhado a seguir neste trabalho contemplado os dados assumidos ou conhecidos, fatores retirados das tabelas, variáveis adimensionais e parâmetros calculados de forma similar ao apresentado no exemplo da norma.

#### **Dados assumidos ou conhecidos**

Inicialmente alguns dados devem ser conhecidos (ou assumidos) para utilizá-los durante os cálculos. Tais informações devem incluir:

Nível dinâmico do fluido – H, medido em ft;

Profundidade de assentamento da bomba – L, medido em ft;

Frequência de bombeamento – N, medido em ciclos por minuto (CPM ou SPM);

Curso da haste polida – S, medido em in;

Diâmetro do pistão – D, medido em in;

Densidade relativa do fluido – G, adimensional;

Diâmetro nominal da coluna de produção (in) e se está ancorada ou livre;

Composição da coluna de hastes – código API para coluna de hastes.

Com estas informações, o projetista será capaz de determinar as características de operação a seguir:

Curso efetivo do pistão –  $S_p$ , medido em in.

Deslocamento volumétrico da bomba – PD, medido em bpd.

Carga máxima na haste polida – PPRL, medido em lbf.

Carga mínima na haste polida – MPRL, medido em lbf.

Máximo torque na manivela – PT, medido em lbf.in.

Potência na haste polida – PRHP, medido em HP.

Contrabalanceio requerido – CBE, medido em lbf.

#### **Fatores retirados das tabela 4.1 e 4.2 presentes na norma**

A tabela 4.1 está presente na Norma API TR 11L e fornece informações importantes, como: o peso da coluna de hastes por unidade de comprimento ( $W_r$ ), em lbf/ft; constante elástica da coluna de hastes ( $E_r$ ), em in/lbf.ft; fator de frequência ( $F_c$ ), adimensional e a composição da coluna de hastes. Para obtenção de tais dados é necessário conhecer o código da coluna de hastes e o diâmetro do pistão (D), em in.

A tabela 4.2 também presente na Norma API TR 11L fornece a constante elástica da coluna de produção, necessitando somente conhecer o diâmetro da coluna de produção.

As tabelas 4.1 e 4.2 constam na planilha (Excel) para facilitar a aquisição de dados do projetista. Seguem as tabelas:

Tabela 4.1 - Dados da coluna de hastes e da bomba (trecho da tabela 4.1)

Rod No	Plunger Diam (in) D	Rod Weight (lb/ft) Wr	Constante elástica (in/lb-in) Er	Fator de frequência Fc	Coluna de hastes, % de cada tamanho					
					1 1/8"	1"	7/8"	3/4"	5/8"	1/2"
44	All	0,726	1,99E-06	1	—	—	—	—	—	100
54	1,06	0,908	1,67E-06	1,138	—	—	—	—	44,6	55,4
54	1,25	0,929	1,63E-06	1,14	—	—	—	—	49,5	50,5
54	1,5	0,957	1,58E-06	1,137	—	—	—	—	56,4	43,6
54	1,75	0,99	1,53E-06	1,122	—	—	—	—	64,6	35,4
54	2	1,027	1,46E-06	1,095	—	—	—	—	73,7	26,3
54	2,25	1,067	1,39E-06	1,061	—	—	—	—	83,4	16,6
54	2,5	1,108	1,32E-06	1,023	—	—	—	—	93,5	6,5
55	All	1,135	1,27E-06	1	—	—	—	—	100	—
64	1,06	1,164	1,38E-06	1,229	—	—	—	33,3	33,1	33,5
64	1,25	1,211	1,32E-06	1,215	—	—	—	37,2	35,9	26,9
64	1,5	1,275	1,23E-06	1,184	—	—	—	42,3	40,4	17,3
64	1,75	1,341	1,14E-06	1,145	—	—	—	47,4	45,2	7,4
65	1,06	1,307	1,14E-06	1,098	—	—	—	34,4	65,6	—
65	1,25	1,321	1,13E-06	1,104	—	—	—	37,3	62,7	—
65	1,5	1,343	1,11E-06	1,11	—	—	—	41,8	58,2	—
65	1,75	1,369	1,09E-06	1,114	—	—	—	46,9	53,1	—
65	2	1,394	1,07E-06	1,114	—	—	—	52	48	—
65	2,25	1,426	1,05E-06	1,11	—	—	—	58,4	41,6	—
65	2,5	1,46	1,02E-06	1,099	—	—	—	65,2	34,8	—
65	2,75	1,497	9,90E-07	1,082	—	—	—	72,5	27,5	—
65	3,25	1,574	9,30E-07	1,037	—	—	—	88,1	11,9	—
66	All	1,634	8,83E-07	1	—	—	—	100	—	—
75	1,06	1,566	9,97E-07	1,191	—	—	27	27,4	45,6	—
75	1,25	1,604	9,73E-07	1,193	—	—	29,4	29,8	40,8	—
75	1,5	1,664	9,35E-07	1,189	—	—	33,3	33,3	33,3	—
75	1,75	1,732	8,92E-07	1,174	—	—	37,8	37	25,1	—
75	2	1,803	8,47E-07	1,151	—	—	42,4	41,3	16,3	—
75	2,25	1,875	8,01E-07	1,121	—	—	46,9	45,8	7,2	—
76	1,06	1,802	8,16E-07	1,072	—	—	28,5	71,5	—	—
76	1,25	1,814	8,12E-07	1,077	—	—	30,6	69,4	—	—
76	1,5	1,833	8,04E-07	1,082	—	—	33,8	66,2	—	—
76	1,75	1,855	7,95E-07	1,088	—	—	37,5	62,5	—	—
76	2	1,88	7,85E-07	1,093	—	—	41,7	58,3	—	—
76	2,25	1,908	7,74E-07	1,096	—	—	46,5	53,5	—	—
76	2,5	1,934	7,64E-07	1,097	—	—	50,8	49,2	—	—
76	2,75	1,967	7,51E-07	1,094	—	—	56,5	43,5	—	—
76	3,25	2,039	7,22E-07	1,078	—	—	68,7	31,3	—	—
76	3,75	2,119	6,90E-07	1,047	—	—	82,3	17,7	—	—
77	All	2,224	6,49E-07	1	—	—	100	—	—	—

Fonte: Norma API TR 11L. 2004, p. 8-10

Tabela 4.2 - Dados da coluna de produção

Tubing	ID (in)	Área metal (in <sup>2</sup> )	Et (in/lb-ft)
1,9	1,61	0,799	5,00E-07
2,375	1,995	1,304	3,07E-07
2,875	2,441	1,812	2,21E-07
3,5	2,992	2,590	1,54E-07
4	3,476	3,077	1,30E-07

Fonte: Norma API TR 11L. 2004, p. 11

**Variáveis adimensionais**

Como foram mencionados, os resultados obtidos do modelo elétrico-analógico foram relacionados através de parâmetros adimensionais. A norma API TR 11L propõe:

Velocidade de bombeamento adimensional para hastes simples –  $N/N_0$ .

Velocidade de bombeamento adimensional para hastes combinadas –  $N/N_0'$ .

Elongação da haste devido peso do fluido adimensional -  $F_0/S \cdot k_r$

Elongação devido peso da coluna de hastes no fluido adimensional -  $W_{rf}/S \cdot k_r$

Onde:

$N$  é a velocidade de bombeio, em CPM.

$N_0$  é a velocidade síncrona de bombeio para uma coluna de hastes formada por um único diâmetro, em CPM.

$N_0'$  é a velocidade síncrona de bombeio para uma coluna de hastes combinado, em CPM.

$F_0$  é a carga de fluido sobre o pistão, em lbs.

$S$  é o curso da haste polida, em in.

$K_r$  é a constante elástica da haste polida, em lbf/in.

$W_{rf}$  é o peso da coluna de hastes no fluido, em lbf.

Para uma coluna de hastes com um único diâmetro, a frequência natural não amortecida, expressa em ciclos/minuto, é encontrada a partir da Equação 4.1:

$$N_0 = \frac{v_s}{4.L} \cdot 60 = \frac{15.v_s}{L} \quad (4.1)$$

Onde:

$N_0$  é a frequência natural não amortecida, CPM.

$v_s$  é a velocidade do som no material da haste, ft/s.

L é o comprimento da coluna de hastes, ft.

De acordo com Takács, Uma velocidade do som típica para o aço que é usado para colunas de hastes é aproximadamente de 16300 ft/s (4970 m/s). Esse valor leva em conta a atenuação de velocidade do som causada pelas conexões entre as hastes. Substituindo este valor de velocidade na Equação 4.1, se obtém a Equação 4.2:

$$N_o = \frac{15 \cdot 16300}{L} \cong \frac{245000}{L} \quad (4.2)$$

Ainda segundo Takács, Como se pode ver a frequência natural não amortecida para hastes de diâmetro uniforme é função apenas do comprimento da coluna de hastes e não depende do diâmetro das hastes usadas. Entretanto para coluna de hastes com uso de diferentes diâmetros em conjunto (coluna de hastes combinada) é necessário uma abordagem diferente. A frequência natural para uma coluna de hastes combinadas é sempre maior que em uma coluna de hastes de diâmetro uniforme. Assim será introduzido o conceito de fator de frequência. Possibilitando encontrar  $N_0'$  pela Equação 4.3:

$$N_0' = F_c \cdot N_0 \quad (4.3)$$

Onde:

$N_0'$  é a frequência natural de uma coluna de hastes combinada, CPM.

$F_c$  é o fator de frequência.

$N_0$  é a frequência natural de uma coluna de hastes de um único diâmetro, CPM.

Nos próximos parâmetros, ambos contém em comum o fator  $k_r$  que é a constante elástica da mola da coluna de hastes, isto é, a força necessária em "lbf" para alongar a coluna de hastes em uma polegada. Desde que a coluna de hastes seja conectada em série pode-se estimar a constante elástica da mola da coluna de hastes através da Equação 4.4:

$$\frac{1}{k_r} = \sum_{i=1}^N L_i \cdot E_{ri} \text{ ou simplesmente } \frac{1}{k_r} = L_t \cdot E_r \quad (4.4)$$

Onde:

$k_r$  é a constante elástica da mola da coluna de hastes, em lbf/in.

$L_i$  é o comprimento de uma seção uniforme  $i$ , em ft.

$E_{ri}$  é a constante elástica por unidade de comprimento da seção uniforme  $i$ , em in/lbf/ft.

Outros parâmetros necessários a se determinar são:

A carga de fluido sobre o pistão ( $F_o$ ) presente na Equação 4.5:

$$F_o = 0,34 \cdot G \cdot D^2 \cdot H \quad (4.5)$$

Onde:

$G$  é a densidade relativa do fluido, adimensional.

$D$  é o diâmetro do pistão, em polegadas.

$H$  é nível dinâmico, em ft.

O peso da coluna de hastes no ar ( $W$ ) pode ser estimado conforme mostrado na Equação 4.6:

$$W = W_r \cdot L \quad (4.6)$$

E o peso da coluna de hastes no fluido ( $W_{rf}$ ) pode ser estimado conforme mostrado na Equação 4.7:

$$W_{rf} = W \cdot (1 - 0,128 \cdot G) \quad (4.7)$$

### Parâmetros calculados

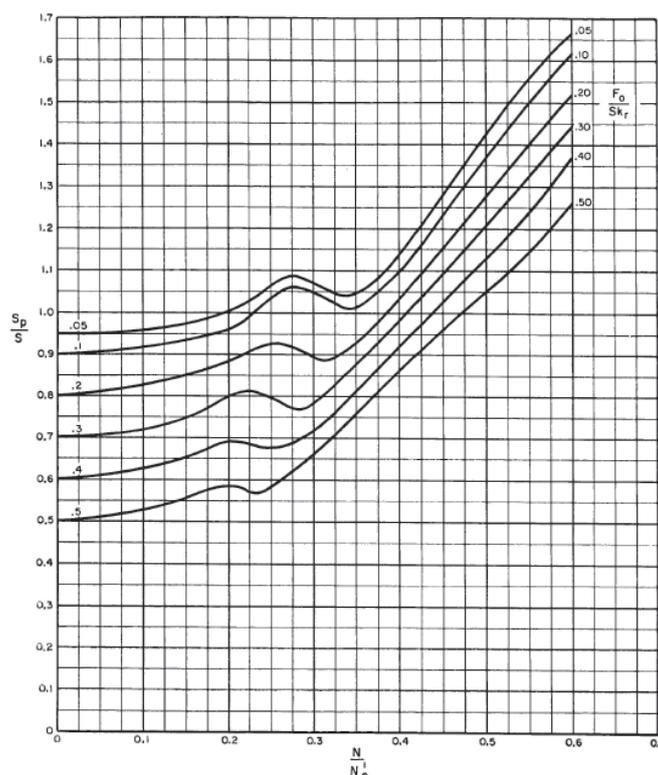
As variáveis adimensionais calculadas serão de fundamental importância para o prosseguimento dos cálculos. A partir deles serão determinados os parâmetros retirados das figuras 4.1 a 4.6 presentes na Norma API TR 11L.

Esses parâmetros retirados das figuras citadas são também variáveis adimensionais e como será mostrada também exigem na entrada das figuras variáveis adimensionais.

As figuras apresentadas na Norma API TR 11L (Figura 4.1 a 4.6) tiveram alguns de seus pontos lidos retirados das curvas, de forma a construir tabelas de pontos que permitem a interpolação de valores intermediários a essas curvas.

A Figura 4.1 ilustrada abaixo foi retirada da Norma API TR 11 L é a responsável por fornecer o fator do curso da haste polida que representa a razão entre o curso efetivo e o curso da haste polida.

Figura 4.1 - Fator curso da haste polida ( $S_p/S$ )



Fonte: Norma API TR 11L. 2004, p. 12

A Tabela 4.3 ilustra os valores pontuais retirados da figura acima e digitalizados para possibilitar a interpolação do valor desejado está ilustrado na tabela 4.3. Como dados de entrada a tabela exige os valores dos seguintes adimensionais: velocidade de

bombeamento adimensional –  $N/N_0$  ' e estiramento da haste devido peso do fluido adimensional -  $F_0/S.k_r$ . Informado os valores de entrada, é efetuado a interpolação e como dado de saída é apresentado o valor do fator curso da haste polida -  $S_p/S$ .

Tabela 4.3 - Fator curso da haste polida ( $S_p/S$ )

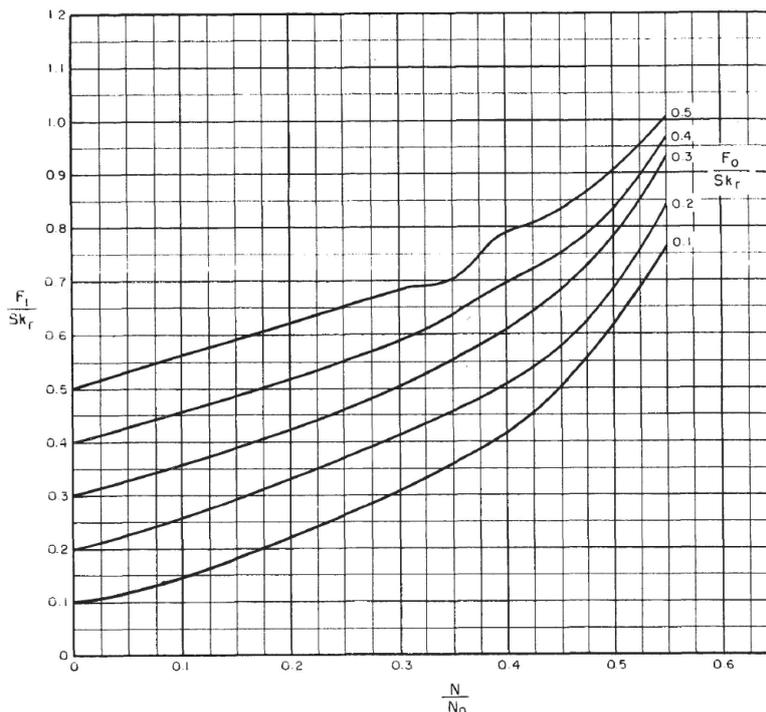
$S_p/S$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$F_0/SK_r$
0	1	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	
0,05	1	0,95	0,9	0,82	0,71	0,61	0,51	
0,1	0,99	0,96	0,93	0,86	0,73	0,63	0,53	
0,15	1,01	0,98	0,95	0,87	0,75	0,65	0,55	
0,2	1,04	1	0,96	0,88	0,8	0,685	0,58	
0,25	1,11	1,07	1,03	0,925	0,8	0,675	0,58	
0,3	1,11	1,08	1,05	0,89	0,78	0,72	0,67	
0,35	1,07	1,05	1,03	0,94	0,88	0,81	0,75	
0,4	1,2	1,15	1,1	0,99	0,95	0,92	0,81	
0,45	1,32	1,28	1,24	1,15	1,1	1,03	0,955	
0,5	1,49	1,43	1,37	1,28	1,21	1,14	1,05	
0,55	1,6	1,55	1,5	1,4	1,33	1,25	1,15	
0,6	1,71	1,66	1,61	1,52	1,45	1,36	1,26	

$N/N_0$

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.2 retirada da Norma API TR 11 L fornece o fator de carga máxima na haste polida.

Figura 4.2 - Fator de carga máxima na haste polida ( $F_1/(Sk_r)$ )



Fonte: Norma API TR 11L. 2004, p. 13

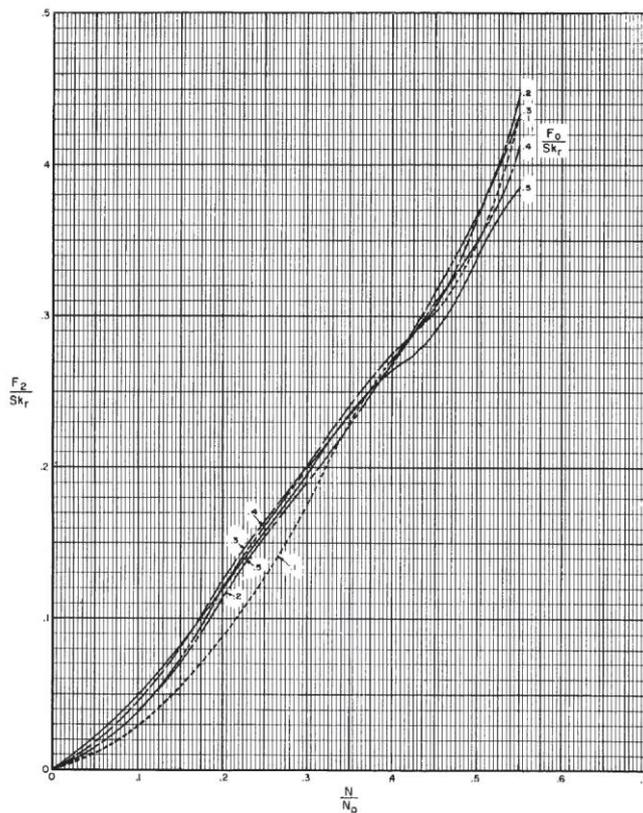
Os valores pontuais retirados da figura acima e digitalizados para possibilitar a interpolação do valor desejado são apresentados na Tabela 4.4. Como dados de entrada a tabela exige os valores dos seguintes adimensionais: velocidade de bombeamento adimensional –  $N/N_0$  e estiramento da haste devido peso do fluido adimensional –  $F_0/Sk_r$ . Como dados de saída apresenta o valor adimensional  $F_1/Sk_r$ .

Tabela 4.4 - Fator de carga máxima na haste polida ( $F_1/Sk_r$ )

$F_1/SK_r$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$F_0/SK_r$
0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	
0,05	0,025	0,13	0,235	0,33	0,43	0,54	
0,1	0,05	0,15	0,25	0,355	0,455	0,56	
0,15	0,06	0,18	0,3	0,39	0,49	0,59	
0,2	0,13	0,23	0,33	0,43	0,52	0,63	
0,25	0,15	0,26	0,37	0,45	0,55	0,65	
0,3	0,21	0,31	0,41	0,5	0,54	0,68	
0,35	0,25	0,35	0,45	0,55	0,64	0,7	
0,4	0,33	0,42	0,51	0,61	0,7	0,79	
0,45	0,43	0,5	0,57	0,67	0,75	0,84	
0,5	0,63	0,66	0,69	0,79	0,83	0,9	
0,55	0,56	0,71	0,86	0,94	0,96	1	
$N/N_0$							

A Figura 4.3 retirada da Norma API TR 11L fornece o fator da carga mínima na haste polida.

Figura 4.3 - Fator de carga mínima na haste polida ( $F_2/Sk_r$ )



Fonte: Norma API TR 11L. 2004, p. 14

Como dados de entrada a tabela exige os valores dos seguintes adimensionais: velocidade de bombeamento adimensional –  $N/N_0$  e estiramento da haste devido peso do fluido adimensional -  $F_0/Sk_r$ . É realizada a interpolação e como dado de saída é informado o fator de carga mínima na haste polida ( $F_2/Sk_r$ ).

Tabela 4.5 - Fator de carga mínima na haste polida ( $F_2/Sk_r$ )

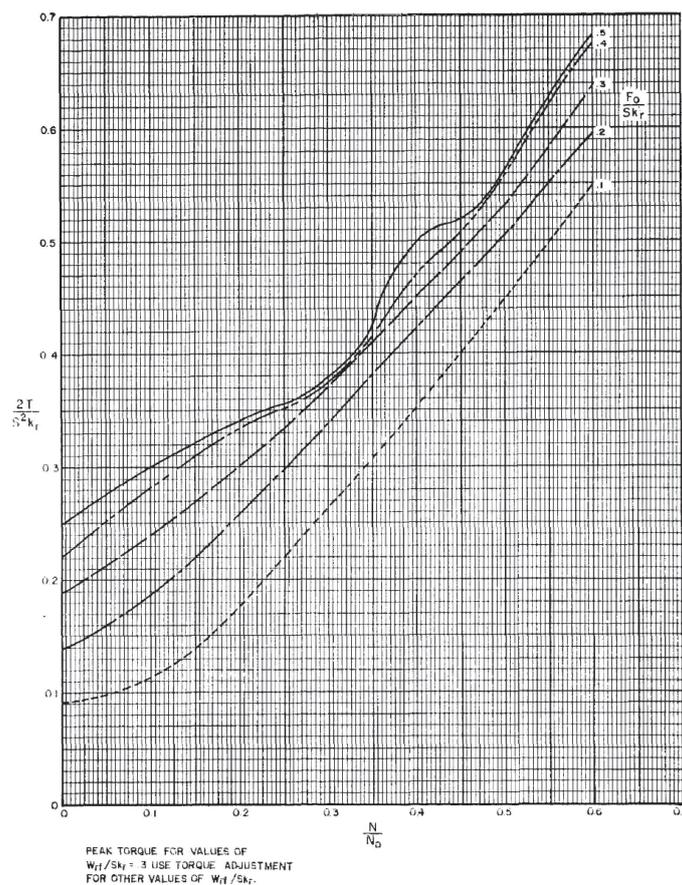
$F_2/SK_r$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$F_0/SK_r$
------------	---	-----	-----	-----	-----	-----	------------

0	0	0	0	0	0	0
0,05	0,007	0,01	0,013	0,014	0,015	0,013
0,1	0,02	0,03	0,04	0,045	0,05	0,04
0,15	0,04	0,055	0,07	0,08	0,08	0,07
0,2	0,065	0,09	0,115	0,12	0,125	0,115
0,25	0,107	0,13	0,153	0,165	0,16	0,155
0,3	0,16	0,175	0,19	0,195	0,2	0,195
0,35	0,23	0,23	0,23	0,3	0,3	0,4
0,4	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,27
0,45	0,28	0,3	0,32	0,31	0,31	0,29
0,5	0,33	0,35	0,37	0,37	0,35	0,34
0,55	0,41	0,43	0,45	0,43	0,41	0,37

N/N<sub>0</sub>

A figura 4.4 retirada da Norma API TR 11L fornece o fator de torque máximo.

Figura 4.4 - Fator de torque máximo ( $2T/(S^2kr)$ )



Fonte: Norma API TR 11L. 2004, p. 15

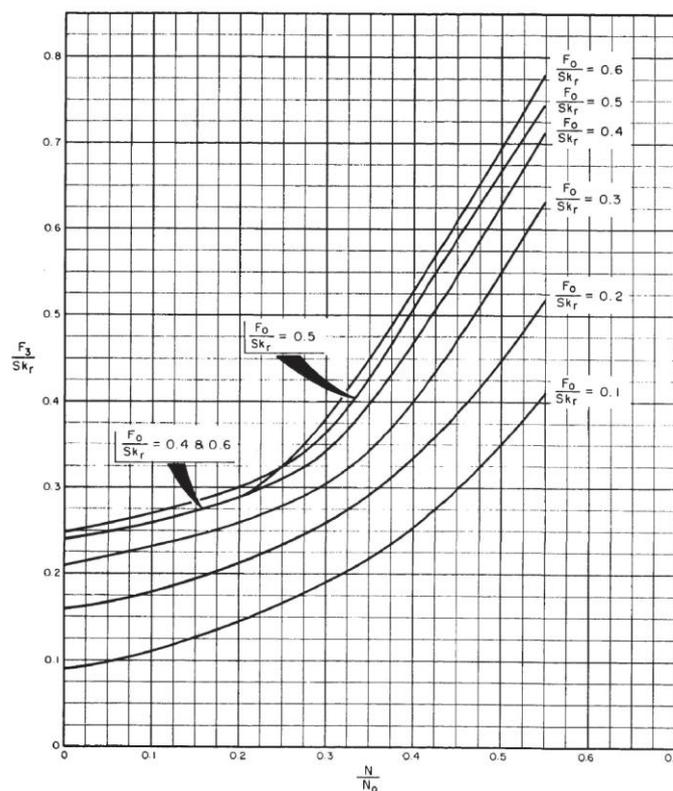
Como dados de entrada a tabela exige os valores dos seguintes adimensionais: velocidade de bombeamento adimensional –  $N/N_0$  e estiramento da haste devido peso do fluido adimensional -  $F_0/Sk_r$ . Em posse dos dados de entrada é realizada a interpolação e como dado de saída é informado o fator de torque máximo ( $2T/S^2k_r$ ).

Tabela 4.6 - Fator de torque máximo ( $2T/S^2k_r$ )

$2T/S^2K_r$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$F_0/SK_r$
0	0,04	0,09	0,14	0,19	0,22	0,25	
0,05	0,04	0,1	0,16	0,21	0,25	0,275	
0,1	0,03	0,11	0,19	0,24	0,28	0,3	
0,15	0,06	0,14	0,22	0,27	0,31	0,32	
0,2	0,08	0,17	0,26	0,3	0,33	0,34	
0,25	0,14	0,22	0,3	0,33	0,35	0,355	
0,3	0,18	0,26	0,34	0,36	0,365	0,37	
0,35	0,24	0,31	0,38	0,41	0,415	0,42	
0,4	0,28	0,35	0,42	0,45	0,47	0,5	
0,45	0,34	0,4	0,46	0,49	0,51	0,52	
0,5	0,395	0,45	0,505	0,53	0,56	0,565	
0,55	0,45	0,5	0,55	0,58	0,62	0,63	
0,6	0,505	0,55	0,595	0,65	0,675	0,68	
$N/N_0$							

A Figura 4.5 tirada da Norma API TR 11L fornece o fator de potência na haste polida.

Figura 4.5 - Fator de potência na haste polida ( $F_3/Sk_r$ )



Fonte: Norma API TR 11L. 2004, p. 16

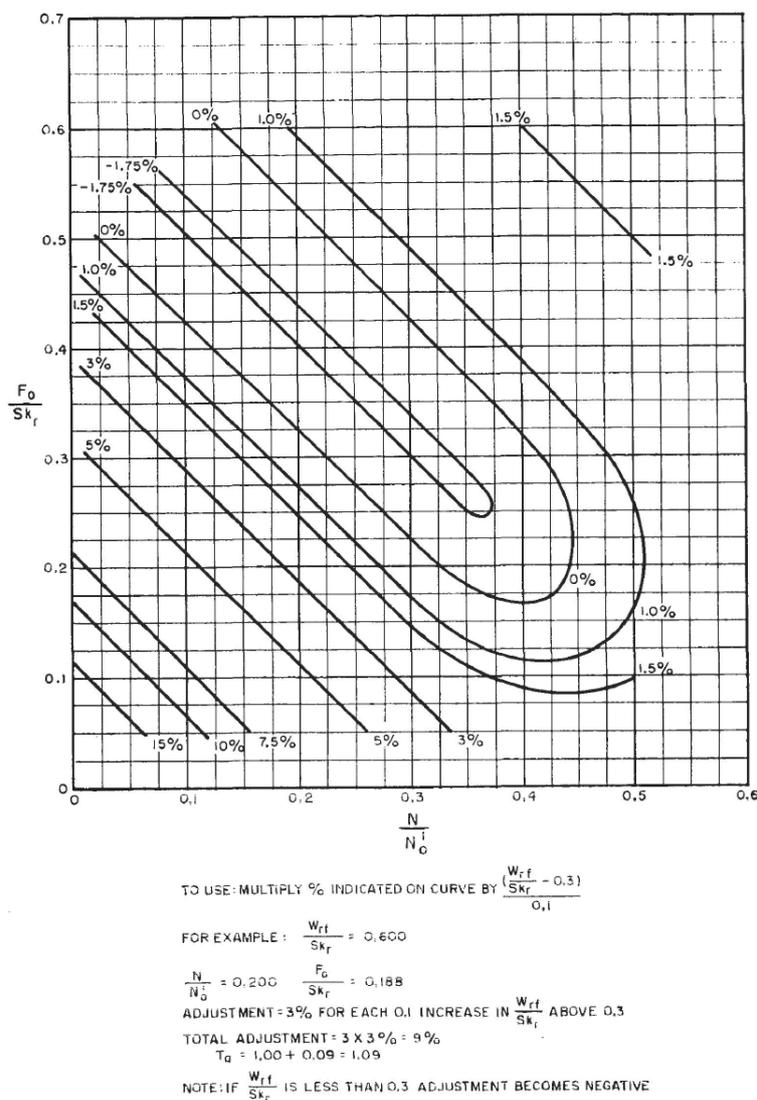
Fornecido os seguintes dados: velocidade de bombeamento adimensional –  $N/N_0$  e estiramento da haste devido peso do fluido adimensional -  $F_0/Sk_r$ . É realizada a interpolação com os valores presentes na Tabela 4,7 e obtem-se como dado de saída o valor do fator de potência na haste polida ( $F_3/Sk_r$ ).

Tabela 4.7 - Fator de potência na haste polida ( $F_3/Sk_r$ )

$F_3/Sk_r$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	$F_0/Sk_r$
0	0,02	0,09	0,16	0,21	0,34	0,35	0,34	
0,05	0,034	0,1	0,166	0,22	0,25	0,26	0,25	
0,1	0,045	0,11	0,175	0,23	0,26	0,27	0,26	
0,15	0,06	0,125	0,19	0,24	0,275	0,28	0,275	
0,2	0,07	0,145	0,22	0,26	0,285	0,3	0,285	
0,25	0,11	0,17	0,23	0,275	0,315	0,325	0,325	
0,3	0,12	0,19	0,26	0,305	0,345	0,37	0,376	
0,35	0,158	0,224	0,29	0,345	0,4	0,425	0,45	
0,4	0,12	0,225	0,33	0,4	0,475	0,51	0,55	
0,45	0,22	0,3	0,38	0,475	0,55	0,59	0,61	
0,5	0,225	0,325	0,425	0,55	0,625	0,67	0,7	
0,55	0,3	0,41	0,52	0,626	0,72	0,724	0,776	
$N/N_0$								

A figura 4.6 retirada da Norma API TR 11L fornece o ajuste do fator de torque máximo ( $T_a$ ) para valores de  $W_{rf}/Sk_r$  diferentes de 0,3.

Figura 4.6 - Ajuste do fator de torque máximo para valores de  $W_{rf}/(Sk_r)$  diferentes de 0,3 ( $T_a$ )



Fonte: Norma API TR 11L. 2004, p. 17

Os valores pontuais retirados da figura acima e digitalizados para possibilitar a interpolação do valor desejado está ilustrado na Tabela 4.7. Como dados de entrada a tabela exige os valores dos seguintes adimensionais: velocidade de bombeamento adimensional –  $N/N_0'$ , estiramento da haste devido peso do fluido adimensional -

$F_o/Sk_r$  e estiramento devido peso da coluna de hastes flutuante adimensional -  $W_{rf}/Sk_r$ . Como dado de saída é fornecido o valor do ajuste do fator de torque máximo ( $T_a$ ).

Tabela 4.8 - Ajuste do fator de torque máximo ( $T_a$ )

% $T_a$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	Fo/SKr
0	22%	15%	8%	6%	3%	1%	
0,1	11%	8%	6%	3%	1%	-2%	
0,2	9%	6%	3%	1%	-2%	-1%	
0,3	5%	3%	1%	-2%	-1%	1%	
0,4	3%	1%	-1%	-1%	1%	1%	
0,5	2%	2%	1%	1%	1%	2%	
N/N'0							

Em posse dos parâmetros adimensionais obtidos através das tabelas e com o procedimento descrito abaixo se podem estimar os parâmetros operacionais desejados.

**Curso efetivo do pistão**

Para determinação do curso efetivo do pistão para o caso de colunas de produção ancorada, tem-se a Equação 4.8:

$$S_p = S \cdot \frac{S_p}{S} \tag{4.8}$$

Onde:

$S_p$  é o curso efetivo no fundo do poço do pistão, in.

$\frac{S_p}{S}$  variável adimensional lida na figura 4.1.

$S$  é o curso nominal do pistão.

Caso a coluna de produção seja não ancorada, a elongação da coluna de produção devido à carga de fluido reduz o curso efetivo do pistão, então tem-se a Equação 4.9:

$$S_p = S \cdot \frac{S_p}{S} - \frac{F_o}{k_t} \quad (4.9)$$

Onde:

$F_o$  é a carga de fluido sobre o pistão, lbf.

$k_t$  é a constante elástica da mola da coluna de produção, lbf/in.

A constante elástica da mola da coluna de produção é calculada a partir da constante elástica da coluna de produção (retirada na tabela 4.2) e da profundidade de assentamento da bomba. Como mostra a Equação 4.10:

$$k_t = \frac{1}{E_t \cdot L} \quad (4.10)$$

**Deslocamento volumétrico da bomba.** Assumindo um enchimento completo da bomba a cada curso, o volume diário deslocado pela bomba pode ser calculado com base no comprimento do curso do pistão através da Equação 4.11:

$$PD = 0,1166 \cdot D^2 \cdot S_p \cdot N \quad (4.11)$$

Onde:

$PD$  é o deslocamento volumétrico da bomba, bpd.

$S_p$  é o curso efetivo do pistão, in.

$N$  é a frequência de bombeamento, ciclos/minuto.

$D$  é o diâmetro do pistão, in.

**Cargas na haste polida.** As cargas máxima e mínima aplicadas sobre a haste polida são descritas nas Equações 4.12 e 4.13:

$$PPRL = W_{rf} + \frac{F_1}{S k_r} \cdot S k_r \quad (4.12)$$

$$MPRL = W_{rf} - \frac{F_2}{Sk_r} \cdot Sk_r \quad (4.13)$$

Onde:

$PPRL$  é a carga máxima sobre a haste polida, lbf.

$MPRL$  é a carga mínima sobre a haste polida, lbf.

$W_{rf}$  é o peso das hastes flutuantes, lbf.

$\frac{F_1}{Sk_r}$  é uma variável adimensional retirada da figura 4.2.

$\frac{F_2}{Sk_r}$  é uma variável adimensional retirada da figura 4.3.

$S$  é o curso da haste polida, in.

$k_r$  é a constante da mola da coluna de hastes, lbf.in.

**Potência na haste polida.** A potência requerida para movimentar a haste polida é expressa pela Equação 4.14:

$$PRHP = 2,53 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{F_3}{Sk_r} \cdot S^2 \cdot N \cdot k_r \quad (4.14)$$

Onde:

$PRHP$  é a potência requerida pela haste polida, HP.

$\frac{F_3}{Sk_r}$  é uma variável adimensional retirada da figura 4.4.

$S$  é o curso da haste polida, in.

$N$  é a frequência de bombeamento, ciclos/minuto.

$k_r$  é a constante da mola da coluna de hastes, lbf.in.

**Efeito de Contrabalanceio.** O efeito de contrabalanceio é calculado através da Equação 4.15:

$$CBE = 1,06 \cdot (W_{rf} + 0,5 \cdot F_o) \quad (4.15)$$

Onde:

CBE é o efeito de contrabalanceio na haste polida, lbf.

$W_{rf}$  é o peso das hastes flutuantes, lbf.

$F_o$  é a carga de fluido sobre o pistão, lbf.

**Torque máximo.** O máximo torque no redutor de velocidade é calculado assumindo perfeito balanceio da unidade de bombeio.

Assim, o torque máximo pode ser calculado pela Equação 4.16:

$$PT = \frac{2T}{S^2 k_r} \cdot \frac{S^2}{2} \cdot k_r \cdot \left[ 1 + \left( \frac{W_{rf}}{S \cdot k_r} - 0,3 \right) \cdot \frac{T_a}{10} \right] \quad (4.16)$$

Onde:

$PT$  é o torque máximo no eixo da saída do redutor de velocidade, lbf.in.

$\frac{2T}{S^2 k_r}$  é uma variável adimensional retirada da figura 4.5.

$S$  é o curso da haste polida, in.

$k_r$  é a constante da mola da coluna de hastes, lbf.in.

$\frac{W_{rf}}{S \cdot k_r}$  é a elongação devido peso da coluna de hastes no fluido adimensional.

$T_a$  é o fator de ajuste de torque retirado da figura 4.6.(%)

## 4.2 Análise Nodal aplicada ao bombeio mecânico

A análise nodal aplicado a bombeio mecânico tem por objetivo traçar curvas de pressão requerida e pressão disponível para "n" valores de pressão de fluxo no fundo do poço. A seguir será detalhado o procedimento para se realizar a análise nodal:

- 1) Definir o ponto de início da análise nodal (geralmente cabeça ou fundo do poço), no caso deste trabalho o ponto inicial escolhido será o fundo do poço.
- 2) Definir o número de pontos "n", correspondente ao grau de discretização desejado e com "n" diferentes valores de pressão de fluxo de fundo do poço ( $p_{wf_i}$ ) retirados do intervalo entre 0 e pressão de reservatório ( $p_e$ ), conforme mostrado na Equação 4.17. Também determinar os "n" níveis dinâmicos ( $H_i$ ) associados à pressão de fluxo no fundo do poço, pois há uma relação simplificada entre  $p_{wf}$  e o nível dinâmico que considera a condição onde a pressão de revestimento é nula, tem-se a Equação 4.18:

$$p_{wf_i} = p_e - i \cdot \frac{p_e}{n} \text{ com } i = 0,1,2, \dots n. \quad (4.17)$$

$$H_i = L - \frac{p_{wf_i}}{0,433 \cdot \gamma_F} \quad (4.18)$$

Onde:

n é o número de pontos definidos para análise.

$H_i$  é o nível dinâmico associado ao  $p_{wf_i}$ , em ft.

L é a profundidade de assentamento da bomba, em ft.

$p_{wf_i}$  é a pressão de fluxo no fundo do poço, em psi.

$\gamma_F$  é a densidade relativa do fluido.

0.433 é o gradiente de pressão da água doce, em psi/ft.

- 3) Para pressão disponível será usada à modelagem da curva de IPR de Vogel, que associa a cada pressão de fluxo de fundo uma vazão de produção ( $q_{oi}$ ). Conforme a Equação 4.19:

$$\frac{q_{oi}}{q_{m\acute{a}x}} = 1 - 0,2 \cdot \frac{p_{wf_i}}{p_e} - 0,8 \cdot \left( \frac{p_{wf_i}}{p_e} \right)^2 \quad (4.19)$$

A determinação do valor de  $q_{máx}$  exige resultados de um teste de produção ( $p_{wf_T}$  e  $q_T$ ).

- 4) Determinar as propriedades do fluido que já foram abordados no subcapítulo 3.1. Elas serão estimadas nas condições de temperatura e  $p_{wf}$  vigente para cada uma das "n" pressões. As propriedades do fluido necessária serão  $R_s$ ,  $B_o$ ,  $Z$  e  $B_g$ . Admitindo-se que a bomba está instalada defronte dos canhoneados.
- 5) Estimar as eficiências volumétricas da bomba para cada pressão de fluxo de fundo de poço, usando a Equação 3.40 e utilizando as propriedades do fluido que foram estimados no procedimento anterior.
- 6) Determinar o deslocamento volumétrico da bomba no fundo do poço para cada uma das "n" pressões de fluxo no fundo do poço. Será necessário antes estimar os valores de  $F_o$ ,  $F_o/Skr$ ,  $N/No'$ ,  $Sp/S$  e  $Sp$ . A seguir temos uma sequência de variáveis a determinar que deve ser seguida:

Figura 4.7 - Sequência para obtenção do deslocamento volumétrico

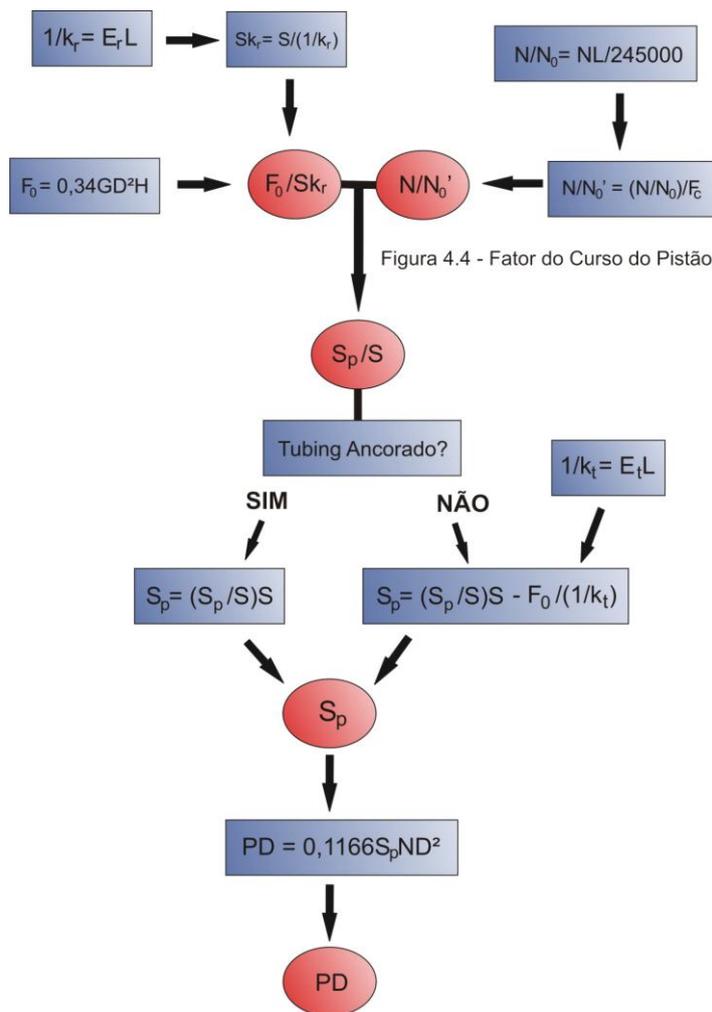


Figura 4.4 - Fator do Curso do Pistão

Fonte: Elaborado pelo autor

- 7) Estimar a vazão de produção de líquidos na superfície através da definição de eficiência volumétrica da bomba (Equação 4.20).

$$q_{L_i} = E_{v_i} \cdot PD_i \tag{4.20}$$

Onde:

$q_{L_i}$  é a vazão bruta de líquidos na superfície associada a cada  $p_{wf_i}$ , em bpd.

$E_{v_i}$  é a eficiência volumétrica da bomba associada a cada  $p_{wf_i}$ .

$PD_i$  é o deslocamento volumétrico da bomba associado a cada  $p_{wf_i}$ , em bpd.

- 8) Por fim, traçar as curvas de pressão disponível (IPR vogel) e de pressão requerida e determinar as condições de operação que graficamente corresponde ao ponto de intersecção das curvas.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A metodologia apresentada no capítulo anterior será posta em prática neste capítulo do trabalho. Inicialmente serão analisados os resultados obtidos na aplicação da norma API TR 11L para estimar parâmetros operacionais importantes para um projetista que deseja aplicar como sistema de elevação artificial o bombeamento mecânico. E de forma complementar, a análise nodal do sistema permitirá estimar a vazão de operação e estudar possíveis melhorias do sistema.

### **5.1 Análise do programa de cálculo (Planilha Excel)**

Para o estudo realizado neste trabalho foi construído um programa computacional capaz de por meio de dados conhecidos (ou assumidos) estimar parâmetros muito importantes para um projeto de bombeio mecânico.

A norma API TR 11L apresenta uma página dedicada a um exemplo da utilização passo-a-passo desse procedimento. Este exemplo presente na Norma contém: informações de dados conhecidos (ou assumidos), essas informações englobam características da bomba, das hastes, da coluna de produção e dos fluidos; variáveis adimensionais, que por vezes são estimadas por equações e outras por gráficos; parâmetros calculados que são os resultados esperados.

Figura 5.8 - Exemplo do procedimento presente na Norma API TR 11L

**EXAMPLE DESIGN CALCULATIONS  
CONVENTIONAL SUCKER ROD PUMPING SYSTEM**

**Object:** To solve for—Sp, PD, PPRL, MPRL, PT, PRHP, and CBE

**Known or Assumed Data:**

Fluid Level, H = 4,500 ft.                      Pumping Speed, N = 16 SPM                      Plunger Diameter, D = 1.50 in.  
 Pump Depth, L = 5,000 ft.                      Length of Stroke, S = 54 in.                      Spec. Grav. of Fluid, G = 0.9  
 Tubing Size 2 in. Is it anchored? Yes,  No                       Sucker Rods 33.8 % - 7/8" 6 66.2 % - 3/4"

**Record Factors from Tables 4.1 & 4.2:**

1.  $W_r = 1.833$  (Table 4.1, Column 3)                      3.  $F_c = 1.082$  (Table 4.1, Column 5)  
 2.  $E_r = 8.04 \times 10^{-6}$  (Table 4.1, Column 4)                      4.  $E_t = 3.07 \times 10^{-6}$  (Table 4.2, Column 5)

**Calculate Non-Dimensional Variables:**

5.  $F_o = .340 \times G \times D^2 \times H = .340 \times 0.9 \times 2.25 \times 4,500 = 3,098$  lbs.  
 6.  $1/k_r = E_r \times L = 8.04 \times 10^{-6} \times 5,000 = 4.020 \times 10^{-3}$  in/lb.                      9.  $N/N_o = NL \div 245,000 = 16 \times 5,000 \div 245,000 = 0.326$   
 7.  $Sk_r = S \div 1/k_r = 54 \div 4.020 \times 10^{-3} = 13,433$  lbs.                      10.  $N/N_o' = N/N_o \div F_c = 0.326 \div 1.082 = 0.301$   
 $F_o/Sk_r = 3,098 \div 13,433 = 0.231$                       11.  $1/k_t = E_t \times L = 3.07 \times 10^{-6} \times 5,000 = 1.535 \times 10^{-3}$  in/lb.

**Solve for Sp and PD:**

12.  $S_p/S = 0.86$  (Figure 4.1)  
 13.  $S_p = [(S_p/S) \times S] - [F_o \times 1/k_r] = [0.86 \times 54] - [3,098 \times 1.535 \times 10^{-3}] = 41.7$  in.  
 14.  $PD = 0.1166 \times S_p \times N \times D^2 = 0.1166 \times 41.7 \times 16 \times 2.25 = 17.5$  barrels per day  
 If the calculated pump displacement fails to satisfy known or anticipated requirements, appropriate adjustments must be made in the assumed data and steps 1 through 14 repeated. When the calculated pump displacement is acceptable, proceed with the Design Calculation.

**Determine Non-Dimensional Parameters:**

15.  $W = W_r \times L = 1.833 \times 5,000 = 9,165$  lbs.                      17.  $W_t/Sk_r = 8,110 \div 13,433 = 0.604$   
 16.  $W_{rt} = W[1 - (.128G)] = 9,165 [1 - (.128 \times 0.9)] = 8,110$  lbs.

**Record Non-Dimensional Factors from Figures 4.2 through 4.6:**

18.  $F_1/Sk_r = 0.465$  (Figure 4.2)                      20.  $2T/S^2k_r = 0.37$  (Figure 4.4)  
 19.  $F_2/Sk_r = 2.13$  (Figure 4.3)                      21.  $F_3/Sk_r = 0.29$  (Figure 4.5)                      22.  $T_a = 0.997$  (Figure 4.6)

**Solve for Operating Characteristics:**

23.  $PPRL = W_{rt} + [(F_1/Sk_r) \times Sk_r] = 8,110 + [0.465 \times 13,433] = 14,356$  lbs.  
 24.  $MPRL = W_{rt} - [(F_2/Sk_r) \times Sk_r] = 8,110 - [2.13 \times 13,433] = 5,249$  lbs.  
 25.  $PT = (2T/S^2k_r) \times Sk_r \times S/2 \times T_a = 0.37 \times 13,433 \times 2.7 \times 0.997 = 133,793$  lb inches  
 6.  $PRHP = (F_3/Sk_r) \times Sk_r \times S \times N \times 2.53 \times 10^{-6} = 0.29 \times 13,433 \times 54 \times 16 \times 2.53 \times 10^{-6} = 8.5$   
 7.  $CBE = 1.06(W_{rt} + 1/2 F_o) = 1.06 \times (8,110 + 1/2 \times 3,098) = 10,239$  lbs.

Fonte: Norma API TR 11L. 2004, p. 7

Dessa forma, conhecendo as informações contidas nesse exemplo de aplicação presente na Norma e os resultados já apresentados nela, será aplicado o mesmo exemplo e comprovado a aplicabilidade desse programa computacional.

Os dados de entrada do programa computacional foram os seguintes:

Tabela 5.9 - Dados de entrada

DADOS DE ENTRADA	
°API	25,7222222
Densidade relativa do óleo	0,9
Profundidade da bomba (m)	1523,92563
Profundidade da bomba (ft)	5000
Nível dinâmico (m)	1371,53307
Nível dinâmico (ft)	4500
Coluna de produção OD (in)	2,375
Código da coluna de hastes	76
Diâmetro do pistão (in)	1,5
Curso (in)	54
Frequência de bombeamento (cpm)	16
Tubing ancorado ?	Não

Algumas características do sistema podem ser extraídas desses dados de entrada. Por exemplo, o grau API caracteriza o óleo como mediano o que permite uma boa funcionalidade do sistema de bombeio mecânico. As profundidades rasas do sistema (assentamento da bomba e nível dinâmico) também garante boa funcionalidade do sistema. O diâmetro da coluna de produção é igual ao menor valor que é aceito pela norma e o diâmetro do pistão está muito próximo do menor diâmetro aceito pela norma (diâmetro mínimo externo para coluna de produção é de 2 3/8” e diâmetro mínimo para pistão é de 1,25 in, portanto, espera-se um sistema com baixa vazão de produção. O curso do pistão é relativamente curto. A frequência de bombeamento é inferior ao limite máximo permitido pela norma API 11E que deve ser no máximo de 20 cpm e também está no limite mínimo de frequência que garante uma boa lubrificação interna do redutor que normalmente é de 6 cpm. O tubing não ancorado permitirá alongamentos da coluna de produção, e por consequência, perdas no curso do pistão.

Tabela 5.10 - Dados da bomba, das hastes e da coluna de produção

Dados da bomba, das hastes e da coluna de produção.		76
Wr	1,833	lbf/ft
Er	0,000000804	in/lbf.ft
Fc	1,082	
Et col. Produção	0,000000307	in/lbf.ft

Os fatores retirados das tabelas, dados da bomba, das hastes e da coluna de produção, foram similares aos valores apresentados no exemplo da norma API TR 11L.

O restante do exemplo da Norma API TR 11L foi fielmente ou praticamente toda reproduzida nos resultados do programa computacional, como segue abaixo:

Tabela 5.11 - Variáveis adimensionais, curso do pistão efetivo e eficiência volumétrica da bomba

DADOS DE SAÍDA		
Fo =	3098,254	Lbf
1/kr =	0,00402	in/lbf
Skr =	13432,84	Lbf
1/kt =	0,001535	in/lbf
Adimensionais:		
Fo/Skr =	0,230648	
N/No =	0,326531	
N/No' =	0,301784	
W =	9165	Lbf
Wrf =	8117,439	Lbf
Wrf/Skr =	0,604298	
Sp =	41,60958	In
pressão de sucção =	194,8503	Psi
Rs na sucção da bomba =	3,438553	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Bo na sucção da bomba =	1,036451	bbbl/STB
Z na sucção da bomba =	0,975614	
Bg na sucção da bomba =	0,076434	ft <sup>3</sup> /scf
Eficiência Volumétrica =	47,53%	

O resultado do curso efetivo do pistão no fundo do poço foi de 41,6 in, menor em 12,4 in comparado ao valor do curso nominal do pistão dado inicialmente que era de 54 in. Essa redução de 12,4 in do curso do pistão ocorre devido às perdas de curso por alongamento da coluna de produção. Esse alongamento da coluna ocorre por dois motivos: (1) Coluna não ancorada e (2) Carga exercida pelo fluido sobre o pistão.

Outro resultado importante apresentado nesta tabela é o valor da eficiência volumétrica de aproximadamente 47,53%, ou seja, do volume deslocado na bomba 47,53% será produzido na superfície.

Tabela 5.12 - Parâmetros adimensionais

FIGURA 4.1	
$S_p/S =$	0,858619
FIGURA 4.2	
$F1/S_{kr} =$	0,460433
FIGURA 4.3	
$F2/S_{kr} =$	0,223327
FIGURA 4.4	
$2T/S^2_{kr} =$	0,36898
FIGURA 4.5	
$F3/S_{kr} =$	0,291336
FIGURA 4.6	
% indicado na figura	-0,00195
$T_a =$	0,994063

Tabela 5.5 – Resultados obtidos

RESULTADOS OBTIDOS:	
PD =	174,6604 Bpd
PPRL =	14302,37 Lbf
MPRL =	5117,521 Lbf
PT =	133029,6 lbf.in
PRHP =	8,554532 HP
CBE =	10246,56 lbf
QL =	83,00915 bpd

Os resultados finais obtidos foram muito semelhantes aos apresentados pelo exemplo da Norma API TR 11L.

## 5.2 Resultados da análise nodal

### 5.2.1 Curva IPR do reservatório

Para gerar a curva IPR foi usada a equação proposta por Vogel. Inicialmente é determinada a vazão máxima do reservatório e para isso é necessário conhecer alguns dados, tais como: pressão estática do reservatório, pressão de fluxo no fundo do poço

durante o teste e vazão de teste são usados para estimar a vazão máxima do reservatório. Dotado desses dados é possível determinar a vazão máxima do reservatório pela Equação 5.1:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{q_o}{\left[1 - 0,2 \cdot \frac{p_{wf}}{p_e} - 0,8 \cdot \left(\frac{p_{wf}}{p_e}\right)^2\right]} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

$q_o$  é a vazão de óleo, em bpd ou m<sup>3</sup>/dia.

$p_{wf}$  é a pressão de fluxo no fundo do poço, em kgf ou psia.

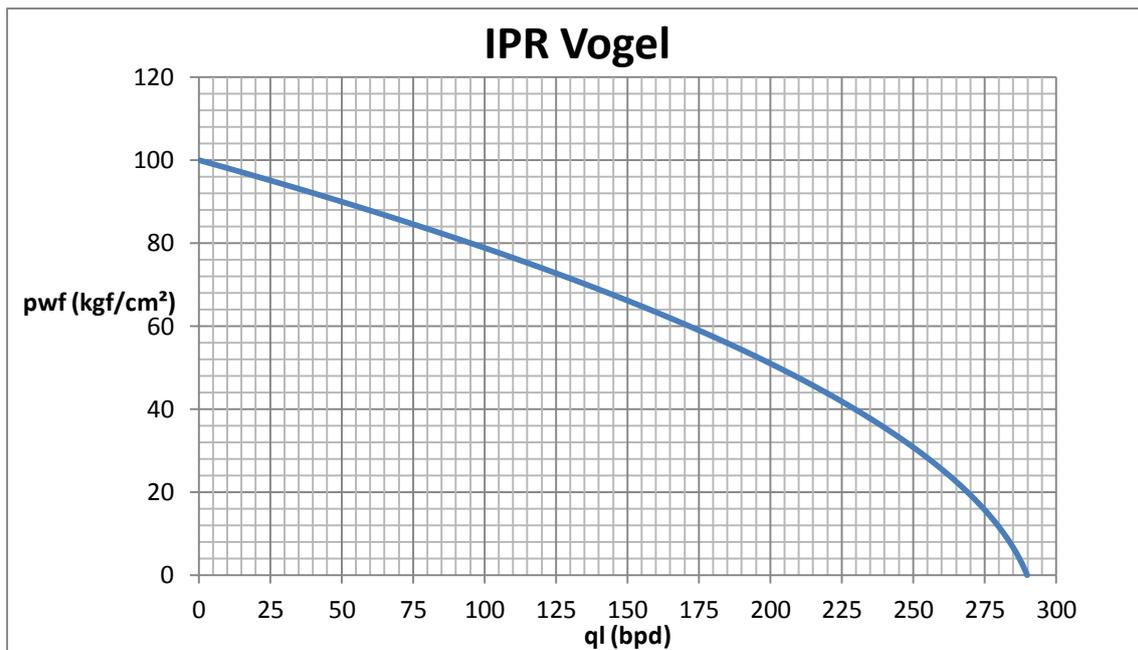
$p_e$  é a pressão estática do reservatório, em kgf ou psia.

Aplicando-se a equação de IPR de Vogel para “i” condições de pressão de fluxo de fundo  $p_{wf}$  e obtendo “i” vazões correspondentes conforme a Equação 5.2:

$$\frac{q_{o_i}}{q_{m\acute{a}x}} = 1 - 0,2 \cdot \frac{p_{wf_i}}{p_e} - 0,8 \cdot \left(\frac{p_{wf_i}}{p_e}\right)^2 \quad \text{Equação 5.2}$$

A curva IPR de Vogel obtido para o exemplo analisado neste trabalho está representada abaixo na Figura 5.2.

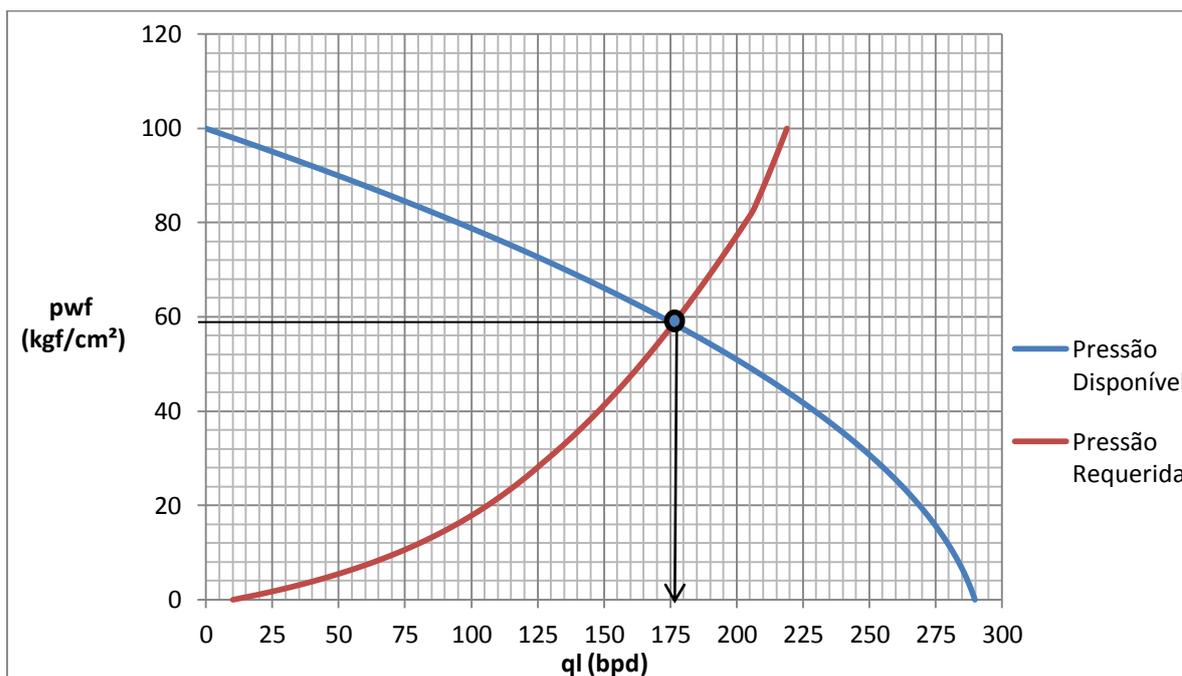
Figura 5.9 - Curva IPR de Vogel



### 5.2.2 Análise Nodal aplicada ao exemplo da Norma API TR 11L

Usando alguns dados retirados da Figura 5.1 (Exemplo do procedimento presente na Norma API TR 11L) e empregando a sequência apresentada no tópico 4.2 (Análise nodal aplicada ao bombeio mecânico) é possível realizar a análise nodal e tem-se o gráfico apresentado na Figura 5.3 como resultado.

Figura 5.10 - Análise nodal aplicada ao exemplo presente na norma API TR 11L.

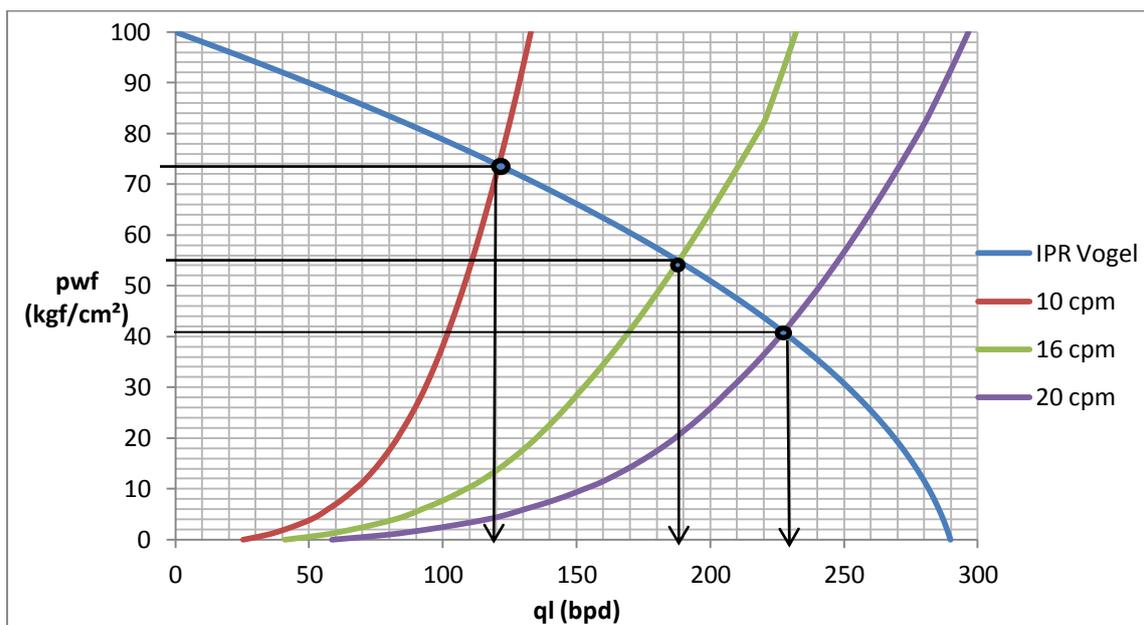


O resultado da análise nodal aplicado ao exemplo está representado acima pelo gráfico (Figura 5.3). O sistema de bombeio deve operar segundo os valores encontrados no ponto de intersecção entre as curvas de pressão disponível e pressão requerida, que corresponde à vazão bruta de líquidos de aproximadamente 175 bpd, pressão de fluxo no fundo do poço de 59 kgf/cm<sup>2</sup> (853,68 psia) e um nível dinâmico correspondente de 2809,39 ft.

### 5.2.3 Influência da frequência de bombeamento sobre a análise nodal

Estudo da influência causada pela mudança na frequência de bombeamento. São comparados os resultados para as seguintes frequências de bombeamento  $N = 10, 16$  e  $20$  cpm. O resultado encontrado é apresentado na Figura 5.4.

Figura 5.11 - Influência da frequência de bombeamento na análise nodal



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente foi proposto no exemplo anterior a utilização da bomba operando na frequência de 16 cpm. Para tal valor de frequência (16 cpm) já foi feita a análise de seus resultados. Porém durante a operação de bombeamento pode ser necessário mudanças no projeto com objetivo de alterar a vazão de produção. Portanto, uma mudança de frequência de bombeamento pode ser necessária. Assim foi adicionado a nossa análise nodal original mais algumas frequências.

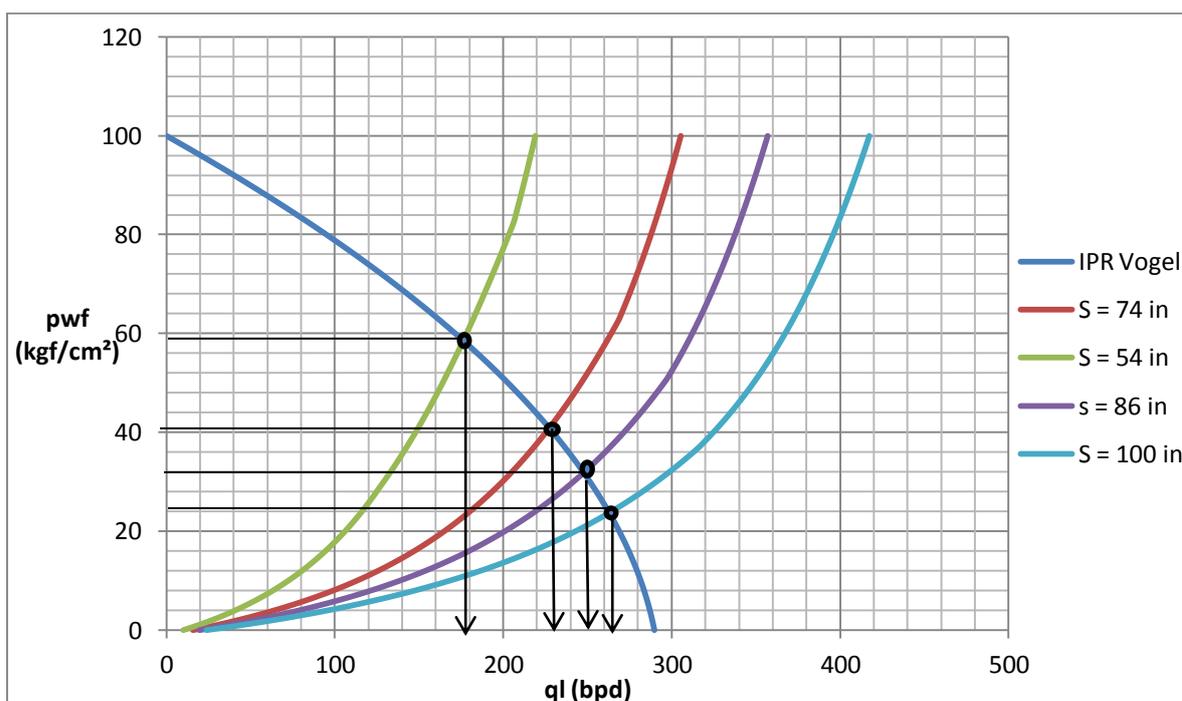
Para a frequência de 10 cpm, ocorre uma redução de frequência de bombeamento proposto no exemplo original. Apesar da redução de frequência resultar em redução na produção do sistema, porém em determinadas circunstâncias pode ser exigido uma redução de frequência de bombeamento. Como consequência da redução, ocorre também redução da vazão de produção bruta de líquidos, que será aproximadamente de 110 bpd a uma pressão de fluxo no fundo do poço de 76 kgf/cm<sup>2</sup> (1080,72 psi), essas serão as condições para esse sistema operando a 10 cpm. Redução de 65 bpd em relação ao projeto inicial.

Para a frequência de 20 cpm foi testado o limite máximo de frequência de bombeamento imposta pela ANP. Nestas condições houve um aumento na vazão de produção de líquidos para aproximadamente 210 bpd.

### 5.2.4 Influência do curso do pistão sobre a análise nodal

Estudo da influência causada pelo curso do pistão. São comparados os resultados para os seguintes cursos do pistão,  $S = 54, 74, 86$  e  $100$  in. Conforme apresentado na Figura 5.5.

Figura 5.12 - Influência do curso do pistão na análise nodal



Fonte: Elaborado pelo autor

O aumento do curso do pistão causa um correspondente aumento na vazão de produção de líquidos e uma correspondente redução de pressão fluxo no fundo do poço (ou pressão de sucção da bomba).

O sistema operando nas condições exemplificadas na norma apresentou vazão de líquidos de 175 bpd (com pressão de sucção de 59 kgf/cm<sup>2</sup> e curso do pistão de 54 in). A configuração que apresentou maior aumento da vazão de produção entre todas foi o sistema operando a 100 in, sob a condição de  $p_{wf} = 23$  kgf/cm<sup>2</sup>. Vazão de líquidos para estas condições foi de 265 bpd. Aumento de 90 bpd em relação às condições originais.

O aumento do curso do pistão se mostrou um meio viável de aumento de produção, segundo a análise nodal. Porém, modificações no curso do pistão causam mudanças no torque requerido no redutor. E mudanças elevadas no curso do pistão podem gerar correspondentes torques elevados. Esses torques elevados podem

ultrapassar o máximo suportado pela Unidade de Bombeio (UB) em operação. Portanto, ao aumentar o curso do pistão deve-se atentar para o aumento do torque para valores maiores que o permitido na UB. Isto pode ser verificado na expressão abaixo:

$$PT = \frac{2T}{S^2 k_r} \cdot \frac{S^2}{2} \cdot k_r \cdot \left[ 1 + \left( \frac{W_{rf}}{S \cdot k_r} - 0,3 \right) \cdot \frac{T_a}{10} \right]$$

Nesta expressão percebe-se que o torque máximo (PT) é proporcional ao curso do pistão ao quadrado ( $S^2$ ), portanto mudanças no curso acarretam em grandes variações no torque máximo.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 Conclusões

A planilha criada se mostrou aplicável na determinação de parâmetros operacionais importantes para o bombeio mecânico. Além disso, se mostrou funcional na análise nodal. Em ambas as aplicações foram encontradas resultados esperados ou condizentes com a realidade do projeto.

Os resultados da aplicação do procedimento descrito na norma API TR 11L foram os mesmos presente no exemplo da norma. Foi verificada a capacidade em determinação de parâmetros para outras condições de bombeio mecânico e o programa computacional se mostrou capaz.

Quanto à análise nodal, os resultados foram satisfatórios, vistos que dela se obteve as condições de operação do sistema de bombeio mecânico, tais como pressão de fundo, nível dinâmico e vazão produção de líquidos.

No segundo caso foi estudado como a mudança na frequência de bombeamento influencia na análise nodal. E no terceiro caso foi estudado como a mudança no curso do pistão influencia na análise nodal do sistema de bombeio. Em ambos os casos aumento tanto da frequência de bombeio quanto do curso do pistão acarretaram aumento na vazão de produção de líquidos. E destacando apenas a ressalva que aumento no curso do pistão gera elevados torques no redutor de velocidade.

## 6.2 Recomendações

- Realizar uma análise de viabilidade econômica para determinar o retorno financeiro e possibilitar a comparação em aspecto financeiro entre projetos;
- Fazer o estudo para a aplicação do programa computacional (método API e análise nodal) para poços direcionais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHANATI, F. J. S. *Bottomhole Gas Separation Efficiency in Electrical Submersible Pump Installations*. Tese (Doutorado) — The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, 1993.

American Petroleum Institute, API TR 11L - Design Calculations for Sucker Rod Pumping Systems (Conventional Units), 5ª Edição, Washington D.C.: American Petroleum Institute, 2008.

COSTA, R. O. *Curso de bombeio mecânico*. Petrobras, 2008.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. *Engenharia de reservatórios de petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

TAKÁCS, G. *Gas Lift Manual*. Trad. sob a direção de Raphael Eliedson da Silva. Tulsa, Oklahoma: PennWell Corporation, 2005.

TAKÁCS, G. *Sucker-Rod Pumping Manual*. Tradução sob a direção de Raphael Eliedson da Silva. Tulsa, Oklahoma: PennWell Corporation, 2003.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Interciência, 2ª Edição, 2004.

ZHAO R. *et al.* The Piston Tubing Rod Performance Curve: A New and Useful Concept for Sucker-Rod-Pumping Analysis. *International Petroleum Technology Conference (IPTC)*, 2013.