

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de **P&D** em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

PREVISÃO DE CARTAS DINAMOMÉTRICAS DE SUPERFÍCIE E FUNDO ATRAVÉS DO
MODELO DE GIBBS

AUTORES:

Harlene Cristina A. G. Soares¹, Thaise Maria S. Paula¹, Carla Wilza S. de P. Maitelli¹

INSTITUIÇÃO:

¹Departamento de Engenharia de Petróleo, Centro de Tecnologia, Laboratório de Automação em
Petróleo (LAUT), Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

PREVISÃO DE CARTAS DINAMOMÉTRICAS DE SUPERFÍCIE E FUNDO ATRAVÉS DO MODELO DE GIBBS

Abstract

The artificial lift methods are used when flowing wells no longer have enough energy to elevate the reservoir fluids to the surface. One of the most used methods in the world is the Sucker-Rod Pumping. To evaluate and analyze the Sucker-Rod Pumping system conditions as well as anomalies that may exist there are the dynamometer cards, which may be surface and downhole ones. In this work the Gibbs method (1963) was used to obtain surface dynamometric cards and downhole dynamometric cards. Therefore, it was developed a computational tool to generate cards in order to obtain the basic operational parameters. To prove the tool efficiency, cards were created for wells with tapered and straight sucker-rod strings and the results were compared to cards from real wells. To each well were obtained three cards, each one has a different value of Gibbs dimensionless dumping factor. For chose the best value was comparing the basic operational parameters that were obtained with real ones.

Introdução

O petróleo para ser comercializado deve ser elevado do fundo do poço até a superfície através da pressão natural do reservatório ou por meio de métodos de elevação artificial. O Bombeio Mecânico (BM) é o método de elevação artificial mais antigo e mais utilizado em todo mundo. Para se avaliar um sistema de BM a principal ferramenta é a carta dinamométrica, uma vez que permite identificar se há alguma anomalia no sistema. A carta trata-se de um gráfico contínuo de carga por posição (ARAÚJO JÚNIOR, 2014). Existem dois tipos de cartas dinamométricas, a carta dinamométrica de superfície (CDS) e a carta dinamométrica de fundo (CDF).

Em função de sua importância para a área de elevação, o Bombeio Mecânico é enfatizado neste trabalho. Assim, é desenvolvida uma ferramenta computacional para gerar, através de métodos numéricos, cartas dinamométricas de superfície e de fundo capazes de informar os parâmetros básicos de projetos de um sistema de Bombeio Mecânico (carga máxima - PPRL, carga mínima - MPRL, torque - PT, potência na haste polida - PRHP). O modelo utilizado para gerar as cartas dinamométricas é o de Gibbs (1963).

Metodologia

Para o desenvolvimento desse trabalho, ou seja, para a criação de uma ferramenta computacional que gere cartas dinamométricas de superfície e de fundo, o método escolhido para geração das cartas e para calcular os parâmetros básicos de projeto, é o método proposto por Gibbs (1963), por ser um método tradicional e ser apenas para poços verticais, que é o caso do trabalho desenvolvido.

A equação proposta por Gibbs (1963), provinda da equação de onda amortecida, para descrever o comportamento das hastes é descrita a seguir:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nu^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} - g - c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

onde $u(s,t)$ é o deslocamento de um ponto da coluna de hastes s num instante t , v é a velocidade do som nas hastes, g é a aceleração da gravidade e c é o coeficiente de amortecimento, que é dado por:

$$c = \frac{\pi v c_D}{2 D_b} \quad (2)$$

sendo c_D o fator de amortecimento adimensional e D_b a profundidade da bomba.

As condições de contorno são as condições de superfície e fundo, já as condições iniciais obedecem ao sistema em repouso.

Outra equação que rege este modelo é a lei de Hooke para o cálculo das forças de tração nas hastes.

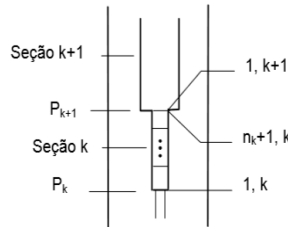
$$F(s,t) = EA \frac{\partial u}{\partial s} \quad (3)$$

onde E é o módulo de elasticidade e A é área da haste.

Os valores da equação acima, durante o ciclo de bombeio mais os valores de posição da haste polida compõem a carta dinamométrica de superfície. Já os valores de posição e força no pistão representam a carta dinamométrica de fundo.

A Figura 1 mostra os pontos em que ocorre a mudança de seção em uma coluna de hastes combinada, que é mais comum de ser encontrada no Bombeio Mecânico. Verifica-se que k designa uma seção da coluna de hastes com n_k segmentos e $k+1$ é a seção subsequente.

Figura 1 – Seções de uma coluna de hastes combinada.



Fonte: COSTA, 1995.

Para a resolução do problema com hastes combinadas, deve-se inicialmente determinar as velocidades nos pontos da coluna de hastes onde não ocorre mudança de seção, através da Eq. (4).

$$v_{n+1}^j = \omega S [A_1 \cos \omega j \Delta t + \dots + A_6 \cos 6 \omega j \Delta t + B_1 \sin \omega j \Delta t + \dots + B_6 \sin 6 \omega j \Delta t] \quad (4)$$

sendo $A_1 \dots A_6$ e $B_1 \dots B_6$ são coeficientes de Fourier, S o curso da haste polida, ω a velocidade angular e Δt elemento de tempo.

Depois, calcula-se as velocidades nos pontos de mudança de seção, utilizando a Eq. (5).

$$v_{rn_k+1,k}^{j+1} = \frac{\frac{A_{rk}}{\Delta s_k} v_{rn_k,k}^{j+1} + \frac{A_{rk+1}}{\Delta s_{k+1}} v_{r2,k+1}^{j+1}}{\frac{A_{rk}}{\Delta s_k} + \frac{A_{rk+1}}{\Delta s_{k+1}}} \quad (5)$$

onde A_r é a área da seção transversal da haste, v_r é a velocidade das hastes e Δs é um elemento de comprimento.

As forças são calculadas usando as equações (6) e (7).

$$F_{S1,k+1}^{j+1} = E_r A_{rk+1} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s_{k+1}} (v_{r2,k+1}^{j+1} - v_{r1,k+1}^{j+1}) + F_{S1,k+1}^j \quad (6)$$

$$F_{Sn_k+1,1}^{j+1} = E_r A_{rk} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s_k} (v_{rn_k+1,k}^{j+1} - v_{rn_k,k}^{j+1}) + F_{Sn_k+1,1}^j \quad (7)$$

onde E_r é o módulo de elasticidade do material da haste e F_s é a carga na haste.

Sendo os índices j e k das equações acima, o índice de tempo no esquema de diferenças finita e o índice da seção da coluna de hastes combinada, respectivamente.

O programa para gerar as cartas é desenvolvido na plataforma *Microsoft Office Excel* usando a linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA). O *software* permite ao usuário configurar características do equipamento instalado no poço, das propriedades do fluido produzido, das condições operacionais e a partir delas o programa funcionar de forma adequada. O *Excel* permite a criação de interfaces simples e dinâmicas e dessa forma, a seguinte interface mostrada na Figura 2 é criada.

Figura 2 - Interface do programa.

EQUIPAMENTO INSTALADO					
COLUNA DE HASTES			HASTE POLIDA E REVESTIMENTO		
Quantidade de hastes na coluna			1		
Seção	Diâmetro (in)	Comprimento (m)	Diâmetro haste polida (in)		
1			OD revestimento (in)		
2			BOMBA		
3			Diâmetro		
4			Profundidade (m)		
			COLUNA DE PRODUÇÃO		
PROPRIEDADES DO FLUIDO PRODUZIDO			Diâmetro Externo		
API			Diâmetro Interno		
BSW (%)			Presença de Âncora		
RGO			PROPRIEDADES DO MATERIAL (HASTES E TUBING)		
Densidade do gás			Massa Específica		
Eficiência de Separação do gás			Elasticidade Hastes		
			Elasticidade Tubing		
CONDIÇÕES OPERACIONAIS			Informar Fator de Amortecimento		
Temperatura na cabeça			PARÂMETROS BÁSICOS DE PROJETO		
Temperatura de fundo			PPRL		
Pressão no Revestimento			MPRL		
Pressão na Cabeça			PRHP		
Curso da Haste Polida			PT		
Frequência de bombeio			Qliq		
Espaço morto					
Nível Dinâmico					
CARTAS DINAMOMÉTRICAS					
Dado adicional					
Número de pontos da carta dinamométrica					

Dessa forma, com os dados de entrada cadastrados, o método de Gibbs é ativado, as cartas de superfície e fundo são geradas e os parâmetros básicos de projeto (PPRL, MPRL, PT, PRHP) são calculados.

A carga máxima (PPRL) e mínima (MPRL) são obtidas a partir da leitura dos pontos da carta dinamométrica de superfície. Já o torque (PT) requerido no redutor, considerando a unidade de bombeio balanceada, é obtido através da carga máxima e mínima, e também do curso da haste polida (S), assim:

$$PT = (PPRL - MPRL) \frac{S}{4} \quad (8)$$

A potência na haste polida (PRHP) é encontrada a partir da área da carta dinamométrica de superfície. Para encontrar a área foi utilizado a Regra do Trapézio, já que é necessário encontrar o trabalho realizado pela haste polida através da realização de um processo de integração numérica. Assim, a potência na haste polida é encontrada dividindo o trabalho realizado (T) pelo tempo de um ciclo de bombeio (CPM).

$$PRHP = \frac{T}{\left(\frac{60}{CPM}\right)} \quad (9)$$

Para validar a ferramenta computacional desenvolvida, são utilizados dados de dois poços verticais de coluna de hastes simples. As Tabelas 1, 2 e 3, apresentam os dados de entrada utilizados.

Tabela 1 - Dados do equipamento instalado.

Poço	Diâm. Rev. (in)	Coluna de tubos			Coluna de hastes			Bomba	
		Diâm. Externo (in)	Diâm. Interno (in)	Âncora (S/N)	Haste Polida (in)	Comprimento (m)		Diâm. (in)	Prof. (m)
						7/8	¾		
1	7	2 7/8	2,441	N	1 1/4	-	708,66	1,75	714
2	7	2 7/8	2,441	N	1 1/4	-	701,04	2,75	709

Tabela 2 – Dados dos fluidos produzidos.

Poço	°API	BSW (%)	RGO (m³/m³)	Dens. Gás	ES (%)
1	29,90	73,9	3	0,8	0
2	29,26	89,7	10	0,8	0

Tabela 3 – Condições operacionais.

Poço	Temp. Cabeça (°F)	Temp. Fundo (°F)	Pressão Cabeça (kgf/cm²)	Pressão Rev. (kgf/cm²)	Curso (in)	N (cpm)	e_m (m)	ND (m)
1	95	122	6	0	39,77	7,1	0,21	619
2	95	122	1,5	0	38,84	9,3	0,21	570

Os valores dos parâmetros básicos de projeto dos poços selecionados foram obtidos como descrito anteriormente e constam da Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros básicos de projeto dos poços selecionados.

Poço	PPRL (lbf)	MPRL (lbf)	PRHP (hp)	PT (lbf.in)
1	5659	2532	4,05	31090,20
2	7328	2400	5,09	47850,88

Resultados e Discussão

Nessa seção, serão apresentadas as cartas dinamométricas de superfície e fundo geradas a partir do *software* desenvolvido e os parâmetros básicos de projeto. Para cada poço em estudo simula-se três cartas dinamométricas, cada uma com valores diferentes do fator de amortecimento adimensional de Gibbs (c_D), sendo 0,05, 0,1 e 0,15. A Figura 3 e 4 mostra um dos resultados simulados das cartas dinamométricas para o poço 1 e 2, respectivamente. Além disso, apresenta a comparação das cartas desenvolvidas com as medidas.

Através das simulações feitas, percebe-se que com o aumento do c_D a carta dinamométrica de superfície fica mais amortecida, diminuindo as oscilações. Além disso, nota-se uma diferença entre as cartas de fundo simuladas e as cartas de fundo reais, provavelmente é função dos dados de entrada estimados, que são: espaço morto na bomba de fundo, RGO, nível dinâmico, eficiência de separação do gás, densidade do gás e temperatura da cabeça e de fundo.

Figura 3 - Carta dinamométrica de superfície e fundo do poço 1, para o $c_D = 0,15$.

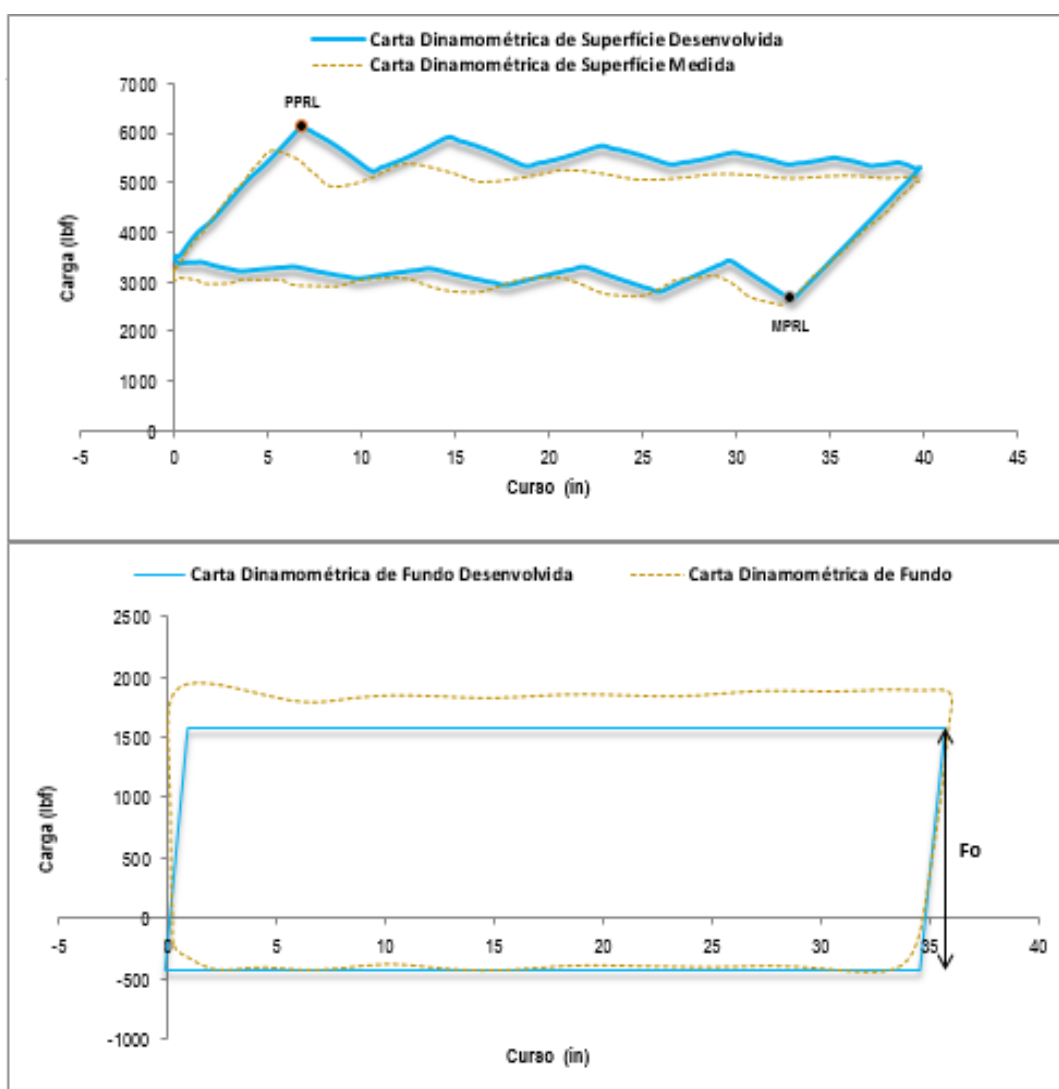
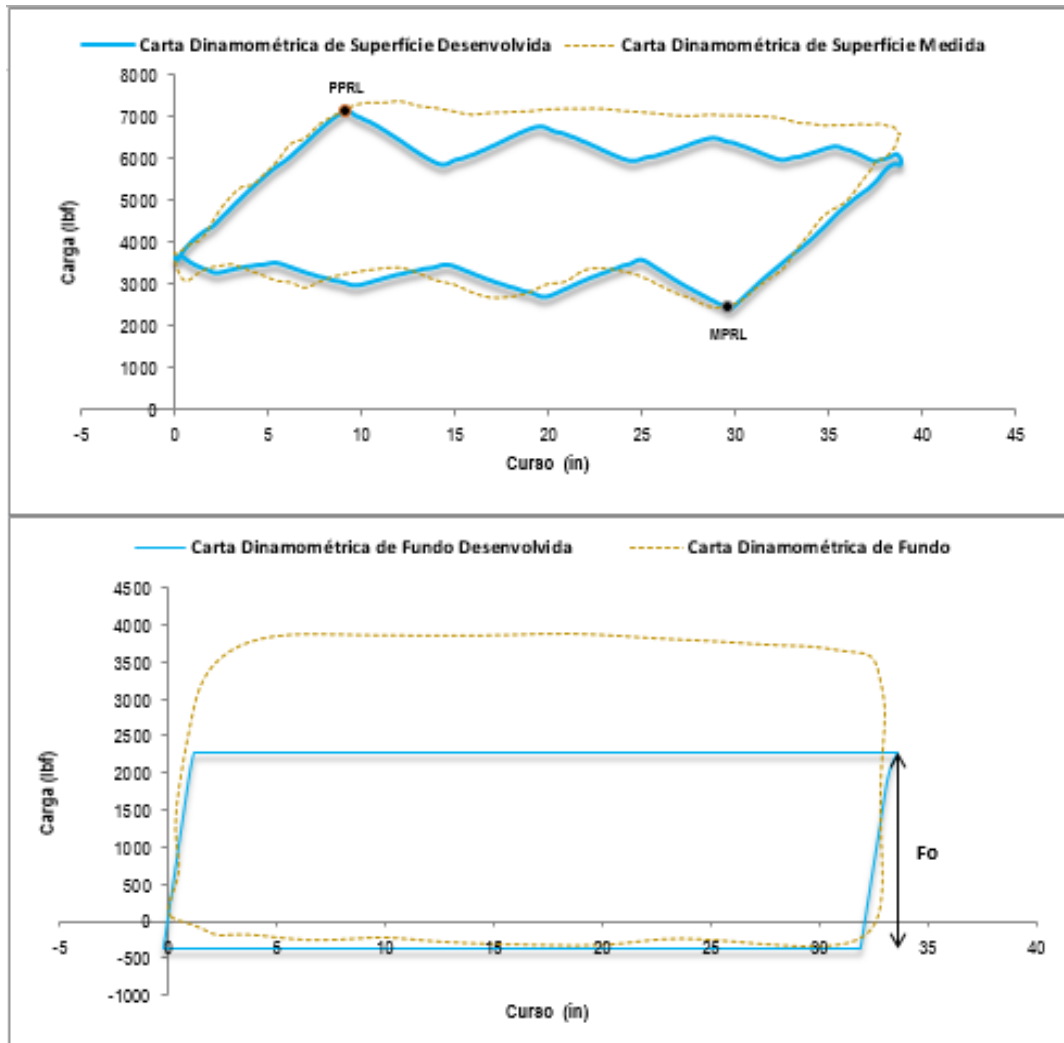


Figura 4 - Carta dinamométrica de superfície e fundo do poço 2 para o $c_D = 0,15$.

Comparando-se os valores dos parâmetros básicos de projeto dos poços, mostrados na Tabela 4, fez-se uma tabela com os valores básicos de projeto de cada situação simulada e com os erros relativos no cálculo dos parâmetros de projeto (Tabela 5). A equação abaixo é utilizada para calcular o erro:

$$Er_{relativo} = \frac{|valor_{medido} - valor_{desenvolvido}|}{valor_{medido}} \quad (10)$$

Segundo Costa (1995), ao se usar o critério de menor erro nos valores encontrados, a variável mais adequada para comparação seria o PPRL. Porém, sendo a unidade de bombeio o elemento mais caro dentro do sistema de bombeio mecânico, a grandeza mais importante no projeto é o PT. Essas variáveis são importantes pois a UB tem limitações de carga máxima e torque no redutor, portanto é essencial predizê-los corretamente com a finalidade não causar danos ao equipamento. Por isso, na avaliação dos diversos fatores de amortecimento adimensional, estas variáveis serão as principais referências.

Pela observação da Tabela 5 e tomando como referência os erros no PPRL e no PT para o poço 1, o melhor valor do fator de amortecimento adimensional é 0,05, pois com o aumento do fator de amortecimento aumenta o erro no cálculo do PPRL e PT. Já para o poço 2, o melhor valor é 0,15 pois com o aumento do fator, diminui o erro no cálculo do PPRL e PT. Assim, verifica-se que o valor do fator de amortecimento a ser utilizado depende de poço para poço.

Tabela 5 - Valores e Erros nos cálculos dos parâmetros básicos de projeto.

Poço	c_D	PPRL (lbf)	PPRL Er.(%)	MPRL (lbf)	MPRL Er.(%)	PRHP (hp)	PRHP Er.(%)	PT (lbf.in)	PT Er.(%)
1	0,05	5959,13	5,30	2671,58	5,51	3,84	5,05	32686,44	5,13
	0,10	6060,05	7,09	2672,25	5,54	4,06	0,26	33683,26	8,34
	0,15	6118,76	8,12	2646,96	4,54	4,30	6,15	34518,41	11,03
2	0,05	7058,49	3,68	2504,14	4,34	3,63	28,58	44222,70	7,58
	0,10	7043,22	3,89	2461,78	2,57	3,82	24,98	44485,71	7,03
	0,15	7097,09	3,15	2390,58	0,39	4,02	20,97	45700,24	4,49

Conclusões

Neste trabalho, desenvolveu-se uma ferramenta computacional que gera cartas dinamométricas de superfície e fundo para que se obtenham os parâmetros básicos de projeto através das cartas. Para isso, adotou-se a metodologia de Gibbs (1963), na qual o comportamento da coluna de hastes é modelada a partir da equação da onda amortecida.

Desse modo, para os poços estudados, toda a faixa do fator de amortecimento adimensional recomenda por Costa (1995) para poços verticais (0,05 a 0,15) obteve resultados satisfatórios, pois o erro no cálculo dos parâmetros básicos de projeto (PPRL e PT) foi menor ou na faixa de 10%, o que é essencial para o correto dimensionamento da UB.

Então, é sempre importante manter o erro relativo baixo, para que as estimativas informadas pelo simulador indiquem valores fidedignos dos observados em campo, e que a UB não fique submetida a esforços superiores ao que ela suporta.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Automação em Petróleo – LAUT, da Universidade Federal do Rio Grande Norte, que concedeu toda a infraestrutura necessária. E a Dra. Carla Maitelli pelas orientações necessárias para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO JÚNIOR, Antônio Pereira de. **Cálculo da carta dinamométrica de fundo para poços direcionais**. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

COSTA, Rutácio de Oliveira. **Bombeamento mecânico alternativo em poços direcionais**. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1995.

GIBBS, S. G. **Predicting the behavior of sucker-rod Pumping Systems**. Journal of Petroleum Technology, 769-778, julho de 1963.