



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

ANÁLISE NODAL APLICADA AO BOMBEIO MECÂNICO

Raphael Eliedson da Silva¹, Eliara de Melo Medeiros², Harlene Cristina Ambrosio Gomes Soares³,
Carla Wilza Souza de Paula Maitelli⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia de Petróleo –
raphaeleliedson@hotmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia de Petróleo –
medeiros.eliara@gmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia de Petróleo –
harlenecristina@hotmail.com

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia de Petróleo –
carlamaitelli@gmail.com

RESUMO

Quando a pressão no reservatório é suficiente para promover 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 quando a produção de gás é alta, e conseqüentemente, a energia exigida para realizar a elevação é baixa. Porém à medida que o fluido é produzido, a pressão cai e quando o reservatório não possui energia suficiente para elevar naturalmente o petróleo, 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 são utilizados os métodos de elevação artificial. O bombeio mecânico (BM) é o método de elevação artificial estudado neste trabalho. O estudo foi feito no ambiente de programação *Visual Basics for Applications* (VBA) presente no *Microsoft Excel* e nele foi desenvolvido um programa capaz de realizar a análise nodal aplicada ao BM, auxiliado pela norma API RP 11L para estimar parâmetros operacionais relevantes do BM. Também foi realizado um estudo dos efeitos causados no resultado da análise nodal, devido mudanças na frequência de bombeio, no curso do pistão, na ancoragem da coluna de produção e no diâmetro do pistão. A partir dessas análises concluiu-se que o aumento das variáveis listadas resultou em aumento significativo de produção do poço, com exceção da ancoragem da coluna de produção, que independente do estado (ancorado ou não) não apresentou aumento significativo na produção do poço.

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

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas que operam por Bombeio Mecânico são compostos de equipamentos de superfície e subsuperfície. Na superfície, o movimento do motor elétrico ou de combustão interna é convertido em movimento alternativo através da geometria da unidade de bombeio e o movimento alternativo é transmitido à coluna de hastes.

Na subsuperfície, 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, que resulta no aumento da pressão. Diante disso, se analisa o que acontece com os fluidos antes ou após um

www.conepetro.com
.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

ponto de maneira que a pressão (jusante ou a montante) pode ser determinada.

Em um sistema em que a pressão do reservatório e a pressão do separador são conhecidas e se quer usar estas informações para determinar as perdas de pressão em cada ponto, a determinação das perdas será feita através da análise nodal. A ideia básica será definir um ponto nodal, na qual o sistema será dividido em dois subsistemas e definir duas pressões (montante e jusante).

O objetivo deste trabalho será demonstrar a viabilidade e a utilidade prática do emprego da análise nodal em sistemas de bombeio mecânico para determinação das condições de operação (vazão de produção e pressão de fluxo no fundo do poço). A avaliação será realizada através de uma ferramenta computacional capaz de realizar a análise nodal, traçando as curvas de pressão disponível e pressão requerida. O programa desenvolvido encontra o ponto que corresponde à intersecção entre essas curvas,

investiga a influência que a mudança de dados de projeto causa sobre as condições de operação. A análise será desenvolvida avaliando os seguintes parâmetros de projeto: velocidade de bombeio, curso da haste polida, ancoragem da coluna de produção e diâmetro do pistão. Com a aplicação da análise nodal para esses diferentes cenários, o projetista conhecerá a melhor combinação de condições de projeto que proporcionam maior eficácia produtiva.

2. METODOLOGIA

Um poço fictício com dados de reservatório, dados dos fluidos e dados de projeto foi usado para gerar os resultados da análise nodal. Alguns dos dados de entrada do poço são valores usualmente usados na literatura e os demais foram valores assumidos. Os dados de entrada do poço são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de entrada.

DADOS DE RESERVATÓRIO	
Pressão estática do reservatório	100 kgf/cm ²



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Pressão durante o teste	30	kgf/cm ²
Vazão durante o teste	40	m ³ /d
Temperatura defronte aos canhoneados	80	°C

DADOS DOS FLUIDOS

Grau API	30	
BSW	0	%
RGO	50	m ³ /m ³
Densidade relativa do gás	0,7	
Tensão superficial do líquido	8	dina/cm

DADOS DE PROJETO

Profundidade de assentamento da bomba	1200	m
Profundidade média dos canhoneados	1200	m
Código da coluna de hastes	76	
Diâmetro do pistão	1,75	in
Curso da haste polida	74	in
Velocidade de bombeio	12	CPM
Diâmetro da coluna de produção	2,875	in
Coluna de produção ancorada	SIM	

Em seguida, mantendo os mesmos dados contidos na Tabela 1 foi realizado a avaliação dos parâmetros de projeto, para tal foi realizada modificação na velocidade de bombeio, curso da haste polida, ancoragem da coluna de produção e diâmetro do pistão. Na Tabela 2 são mostrados esses parâmetros e seus valores investigados.

Tabela 2: Parâmetros modificados e valores investigados.

Parâmetro Modificado	Valores investigados
Velocidade de bombeio (cpm)	12
	15
	18
	20
Curso da haste polida (in)	74
	86
	100
	120
	Não

Coluna de produção ancorada	Sim
Diâmetro do pistão (in)	1,06
	1,75
	2,25

- Seção a montante: reservatórios e zonas próximas ao poço.

2.1. Análise Nodal

A ideia básica para realização da análise nodal é definir um ponto nodal. Este ponto deve ser escolhido arbitrariamente para dividir o sistema em dois subsistemas. Por exemplo, O ponto nodal alocado no fundo do poço divide o sistema em dois. O meio poroso, a montante do ponto nodal, e a coluna de produção e superfície, a jusante. Dessa forma, no ponto escolhido podem-se definir duas pressões: uma é a pressão disponível dos fluidos e a outra é a pressão requerida para o fluxo de fluidos [PRADO, 2008].

O ponto de equilíbrio é o ponto no qual a seção à montante do ponto nodal é capaz de fornecer uma vazão numa pressão suficiente para que na seção a jusante os fluidos possam fluir até o separador [PRADO, 2008].

A localização do ponto da análise nodal é arbitrária. Qualquer ponto entre o separador e borda do reservatório pode ser selecionado como um ponto nodal [PRADO, 2008]. No caso deste trabalho, o ponto nodal escolhido fica em frente aos canhoneados, conforme Figura 1, gerando divisão no sistema em duas seções:





II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO



[www.conepetro.com](http://www.conepetro.com.br)
.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO



[www.conepetro.com](http://www.conepetro.com.br)
.br

(83) 3322.3222
contato@conepetro.com.br

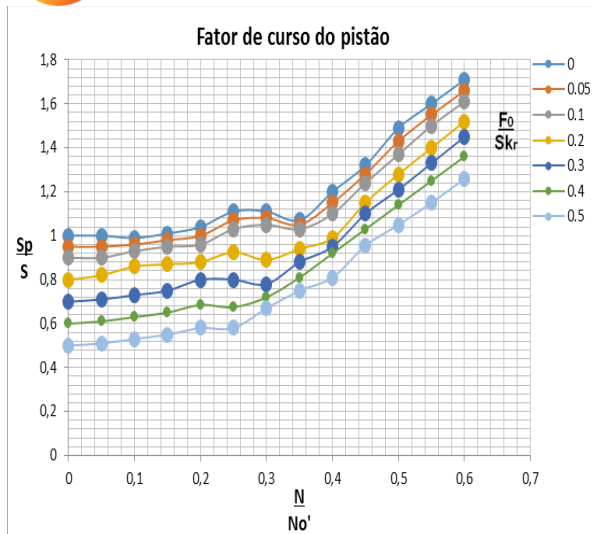


Figura 3: Fator de curso do pistão.

Para uma coluna de produção ancorada, o curso do pistão é expresso pela equação 6.

$$S_p = \left[\frac{S_p}{S} \right] \cdot S$$

[6]

No caso da coluna de produção não ancorada, ocorre a alongação da coluna de produção devido à carga de fluido, e conseqüentemente, a diminuição do curso efetivo do pistão. De maneira que a equação anterior é levemente modificada para gerar a equação 7.

$$S_p = \left[\frac{S_p}{S} \right] \cdot S - \frac{F_0}{k_t}$$

[7]

2.5. Eficiência volumétrica da bomba

(E_v)

A eficiência volumétrica da bomba de fundo pode ser definida como a razão entre a vazão bruta de líquidos na superfície e o volume deslocado pela bomba no fundo, utilizando a equação 8. A presença de gás na sucção da bomba, a insuficiência do fluxo de líquido da formação, a presença de restrições na sucção da bomba, o vazamento nas válvulas ou entre pistão e camisa resultam em baixas eficiências volumétricas. Nessas situações ocorre redução do volume disponível dentro da camisa do pistão para o líquido ou mau funcionamento das válvulas.

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

[8]

As propriedades dos fluidos devem ser determinadas nas condições de sucção da bomba e serão parâmetros para determinação da eficiência volumétrica da bomba.

2.6. Ponto de operação

A intersecção entre a curva de pressão disponível (curva IPR) e a curva de pressão requerida (curva TPR) define o ponto de equilíbrio natural do sistema e determina qual a condição de operação deste, ou seja, a vazão de produção e pressão de fluxo no fundo do poço, conforme ilustrado na Figura 4.

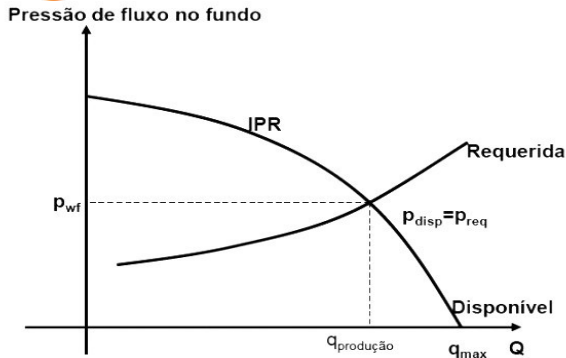


Figura 4: Ponto de operação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da análise nodal nos dados de entrada contidos na Tabela 1 resultou na Figura 5, cujo valor de vazão de produção foi de aproximadamente 238 bpd e de pressão de fluxo no fundo do poço de 532,6 psia.

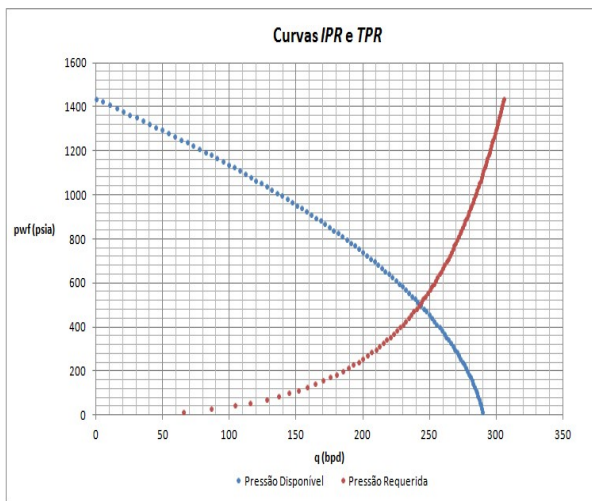


Figura 5: Curvas de pressão requerida e pressão disponível.

Além da realização da análise nodal considerando os dados informados na Tabela 1, foi também realizado um estudo da interferência dos parâmetros de projeto sobre

as condições de operação do poço. Dessa maneira, foram investigados os seguintes parâmetros: velocidade de bombeio (12, 15, 18 e 20 cpm), curso da haste polida (74, 86, 100 e 120 in), coluna de produção (ancorada ou não) e diâmetro do pistão (1,06, 1,75 e 2,25 in).

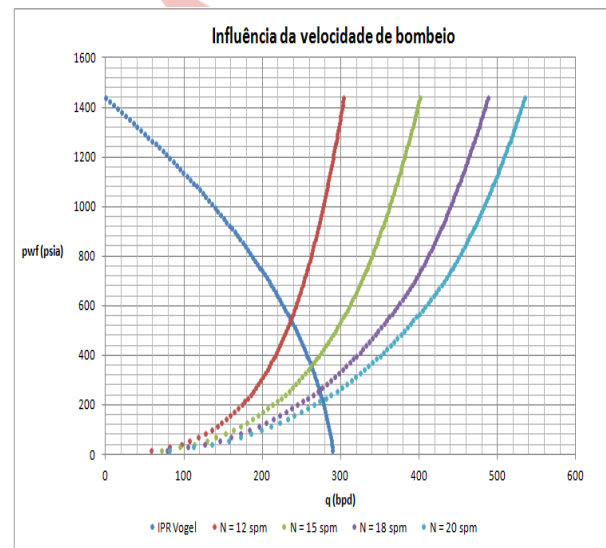


Figura 6: Influência da velocidade de bombeio.

Analisando a Figura 6, é possível observar que houve aumento da vazão de produção causado pelo aumento da velocidade de bombeio do sistema de BM, logo esta seria uma alternativa de mudança de projeto que resultaria em aumento da produção do poço. Porém, este parâmetro de projeto está limitado a um valor máximo de 20 cpm, o que resulta em uma variável de projeto pouco flexível. Ainda observando a Figura 6, percebe-se que as curvas de TPR para



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

velocidade de bombeio de 18 e 20 cpm causaram pouco incremento na vazão, o que induz a concluir que mais aumento da velocidade de bombeio não proporcionaria aumento significativo na vazão de produção.

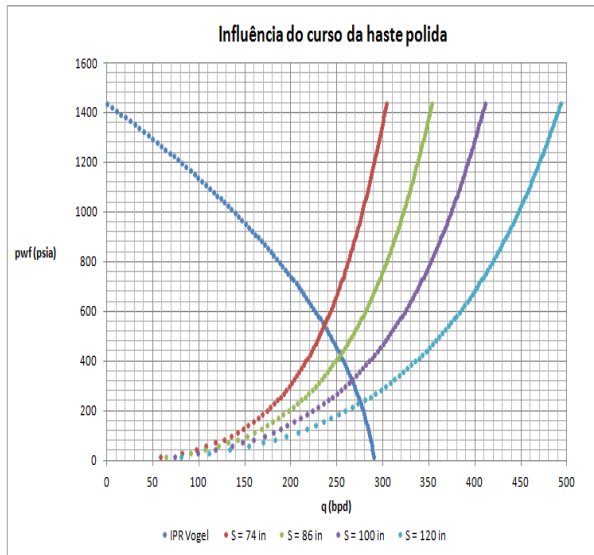


Figura 7: Influência do curso da haste polida.

Para realizar o estudo da interferência causada pelo curso da haste polida sobre as condições de operação, foram escolhidos alguns valores medianos retirados das opções disponíveis em catálogos. Os valores escolhidos foram 74, 86, 100 e 120 polegadas. E notou-se que o aumento do curso da haste polida também é uma ótima alternativa para o projetista melhorar a produção do poço, haja em vista que aumentar o curso da haste polida produz um aumento no volume de fluido deslocado pela bomba, e conseqüentemente, aumenta a vazão de produção na superfície, como pode ser observado na Figura 7.

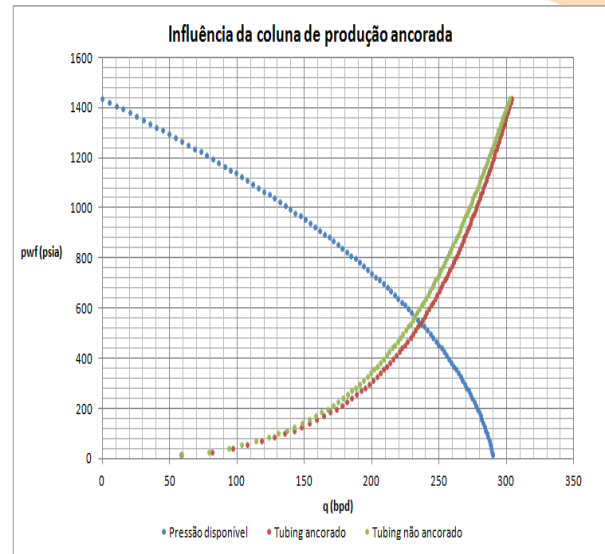


Figura 8: Influência da coluna de produção ancorada ou não.

A coluna de produção tem a possibilidade de operar ancorada ou não, e tal escolha influencia diretamente na determinação do curso efetivo do pistão. Como já abordado nas Equações 6 e 7, as colunas ancoradas ou não se distinguem pela inclusão do efeito da carga de fluido sobre a coluna de produção, implicando na elongação da coluna de produção (para o caso da coluna de produção não ancorada). No entanto, analisando a Figura 8, observa-se que a vazão de produção obtida para coluna de produção ancorada e não ancorada foram levemente diferentes, sendo a coluna de produção ancorada a opção que apresentou maior vazão de produção, esse resultado era esperado porque colunas de produção ancoradas não sofrem efeitos da elongação.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

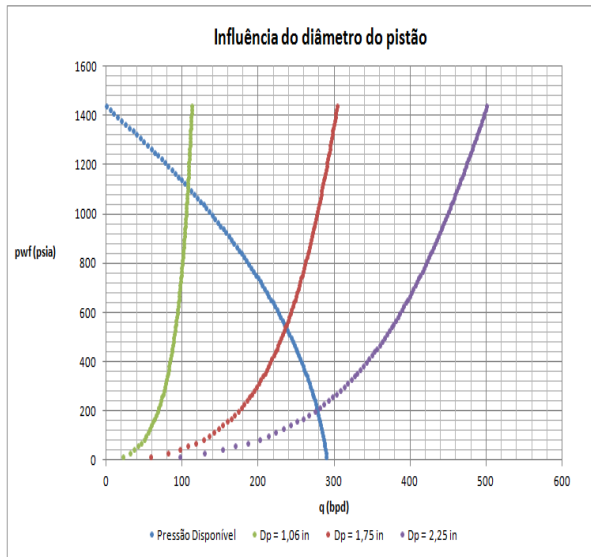


Figura 9: Influência do diâmetro do pistão.

Através da Figura 9, é possível notar que o diâmetro do pistão foi a mudança de projeto que apresentou os resultados mais expressivos no aumento da vazão de produção. Os resultados obtidos foram: para o

diâmetro do pistão de 1,06 in, a vazão correspondente foi de 107 bpd; para o diâmetro do pistão de 1,75 in, a vazão foi de 238 bpd; e para o diâmetro de 2,25 in, a vazão de produção chegou a 278 bpd, que corresponde praticamente a vazão máxima disponível do reservatório. Foi comprovada através da Figura 9 que o aumento do diâmetro do pistão pode ser uma ótima alternativa para aumentar a vazão de produção, porém o projetista deve atentar ao diâmetro e ao *drift* da coluna de produção e conhecer quais são os diâmetros de pistão que podem ser descidos em seu interior.

A Tabela 3 sintetiza as condições operacionais encontradas por meio da análise nodal aplicada aos quatro parâmetros operacionais investigados.

www.conepetro.com.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

Tabela 3: Resultados obtidos da aplicação da análise nodal.

Parâmetro Modificado	Valores investigados	Vazão de produção (bpd)	Pressão no fundo do poço (psia)
Velocidade de bombeio (cpm)	12	237,97	532,7
	15	262,40	357,5
	18	274,18	247,0
	20	277,60	209,0
Curso da haste polida (in)	74	237,97	532,7
	86	254,75	418,0
	100	266,84	318,8
	120	275,75	230,1
Coluna de produção ancorada	Não	234,59	553,6
	Sim	237,97	532,7
Diâmetro do pistão (in)	1,06	107,06	1111,9
	1,75	237,97	532,7
	2,25	277,91	205,3

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a viabilidade e a utilidade prática da utilização da análise nodal para obtenção das condições de operação de um sistema que opera pelo método de Bombeio Mecânico. Foi observado e analisado a influência que os parâmetros de projeto causam sobre as condições de equilíbrio natural do sistema, e foram propostas as possíveis mudanças de projeto que causam aumento na vazão de produção.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido através de uma parceria PETROBRAS/UFRN. Os autores agradecem à PETROBRAS e aos pesquisadores que atuam no Laboratório de Automação em Petróleo LAUT/UFRN.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Petroleum Institute, API RP 11L - Design Calculations for Sucker Rod Pumping Systems (Conventional Units), 5ª Edição, Washington D.C.: American Petroleum Institute, 2008.
- BROWN, KERMIT E. & BEGGS. 1997. *The technology of artificial lift methods*, Kluwer Academic Publishers, Tulsa.
- PRADO, M.G. *Nodal analysis – Introduction*. The University of Tulsa, 2008.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO



www.conepetro.com

.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

