MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE MANOBRAS EM PROCESSOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS

Juliano Scholz Slongo, Guilherme A. Schneider, Flávio Neves Jr., Lucia V. R. de Arruda, Cezar O. R. Negrão
CPGEI/UTFPR - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Avenida Sete de Setembro, 3165
Curitiba-PR - CEP 80.230-910
julianoslongo@alunos.utfpr.edu.br, guilherme@utfpr.edu.br, neves@utfpr.edu.br, lvrarruda@utfpr.edu.br, negrao@utfpr.edu.br

RESUMO

O controle dos gradientes de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração durante a execução de manobras em procedimentos de perfuração representa um desafio a ser superado. As altas velocidades axiais impostas à coluna de perfuração podem gerar gradientes de pressão de magnitudes suficientemente grandes a ponto de levar a pressão no interior do poço para além de limites operacionais seguros. Por outro lado, a adoção de políticas conservadoras com relação à velocidade axial da coluna de perfuração resultam em subutilização da infraestrutura instalada e em desperdício de recursos operacionais e financeiros. O presente trabalho apresenta um modelo de otimização da movimentação axial da coluna de perfuração baseado em um modelo matemático para o escoamento compressível e transitório resultante da realização de uma manobra. O modelo de otimização se mostrou efetivo na redução do tempo de operação e no respeito às restrições implementadas.

PALAVRAS CHAVE. Otimização de Manobras, Perfuração, Modelagem.

Área principal. P&G (PO na Área de Petróleo e Gás). PM (Programação Matemática).

ABSTRACT

The control of pressure gradients generated by drilling string's movements during tripping operations is a great challenge to be overcome. High axial velocities imposed on the drill string can generate sufficiently large pressure gradients to bring well inner pressure overtake the safe operational limits. On the other hand, the adoption of conservative policies concerning the axial velocity of the drill string results in underutilization of the installed infrastructure and a waste of operational and financial resources. This work presents an optimization model based on a mathematical formulation for the compressible and transitory flow resulting from the tripping operations. The optimization model was effective in reducing the operating time and in compliance with the restrictions implemented.

KEYWORDS. Tripping optimization. Drilling operations. Modeling.

Main area. P&G (OR in Oil&Gas). PM (Mathematical Programming).

https://proceedings.science/p/85355?lang=pt-br

1. Introdução

O processo de perfuração é extremamente custoso e envolve quesitos de segurança operacional que não podem ser negligenciados. Neste cenário considera-se a utilização de técnicas de controle e otimização de processos uma importante ferramenta na busca por maximização de desempenho e garantia da seguridade operacional.

Com a crescente expansão dos campos de exploração, as empresas petrolíferas direcionam suas buscas para zonas reservatórias cada vez mais profundas e complexas, e que impõem novos desafios a serem superados [Coker et al., 2004]. A pressão no interior do poço é uma variável crítica para o sucesso de procedimentos de perfuração de poços de petróleo e sua manutenção em patamares seguros se torna mais difícil com o aumento da profundidade do poço. Deste modo a definição de métodos e a utilização de ferramentas capazes de controlar, de forma precisa, o perfil de pressão ao longo do poço têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores e desenvolvedores de soluções para a indústria de petróleo e gás [Zhou e Nygaard, 2010].

A manipulação inadequada do perfil de pressão no interior do poço pode levar a situações indesejadas que causam prejuízos financeiros e colocam em risco os equipamentos e os operadores. Dentre os principais problemas causados por esse tipo de evento pode-se citar o influxo de hidrocarbonetos para o interior do poço (*kiks* ou *blowouts*), perda de circulação, instabilidade das paredes do poço e prisão da coluna de perfuração [Thomas, 2004]. Muitos são os eventos causadores de gradientes de pressão no interior do poço, contudo, entre esses podem ser destacados os procedimentos de parada e reinício de circulação de fluido de perfuração e a movimentação axial da coluna de perfuração para a realização de manobras [Rohani, 2012].

Neste cenário, o presente trabalho trata da modelagem dos gradientes de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração durante a execução de manobras em procedimentos de perfuração de poços. Além disso, com base no modelo hidrodinâmico e levando-se em consideração os patamares seguros de pressão e as limitações operacionais envolvidas, um modelo de otimização é desenvolvido e validado a fim de se realizar manobras no menor tempo possível, mantendo a segurança, utilizando de forma otimizada a infraestrutura disponível e minimizando o tempo não produtivo.

2. Descrição do Problema

A realização de manobras, que consiste na retirada total ou parcial da coluna de perfuração do interior do poço e sua posterior reinserção, é necessária em situações que requerem a manutenção ou substituição da broca ou de equipamentos instalados ao longo da coluna de perfuração, bem como para a realização do revestimento e cimentação do poço, perfilagem e testemunhagem da formação, pescaria, entre outras [Thomas, 2004].

Por questões de desempenho e, especialmente, segurança operacional, o perfil de pressão ao longo do poço deve ser mantido dentro de um intervalo seguro de operação, limitado inferiormente pela pressão de poro e superiormente pela pressão de fratura da formação. Sendo a manobra um procedimento causador de gradientes de pressão no interior do poço, destaca-se que sua realização deve ser gerenciada de forma que os diferenciais de pressão não levem a pressão observada ao longo do poço para além dos patamares seguros.

Sabendo-se que as manobras são realizadas com poço aberto e sem circulação de fluido, observa-se que as ferramentas de controle de pressão comumente utilizadas durante a efetiva perfuração não são passíveis de aplicação. Assim destaca-se que a manutenção da pressão de fundo dentro da janela operacional relaciona-se especialmente à correta manutenção do perfil de velocidade axial da coluna de perfuração. A opção por grandes velocidades axiais resultam em gradientes de pressão de grandes magnitudes que podem levar a extrapolação dos limites operacionais de pressão e, por outro lado, a adoção de valores conservadores de velocidade de deslocamento axial da coluna significam a subutilização da infraestrutura instalada e aumento do tempo de manobra e dos custos operacionais [Zamanipour, 2015].

https://proceedings.science/p/85355?lang=pt-br

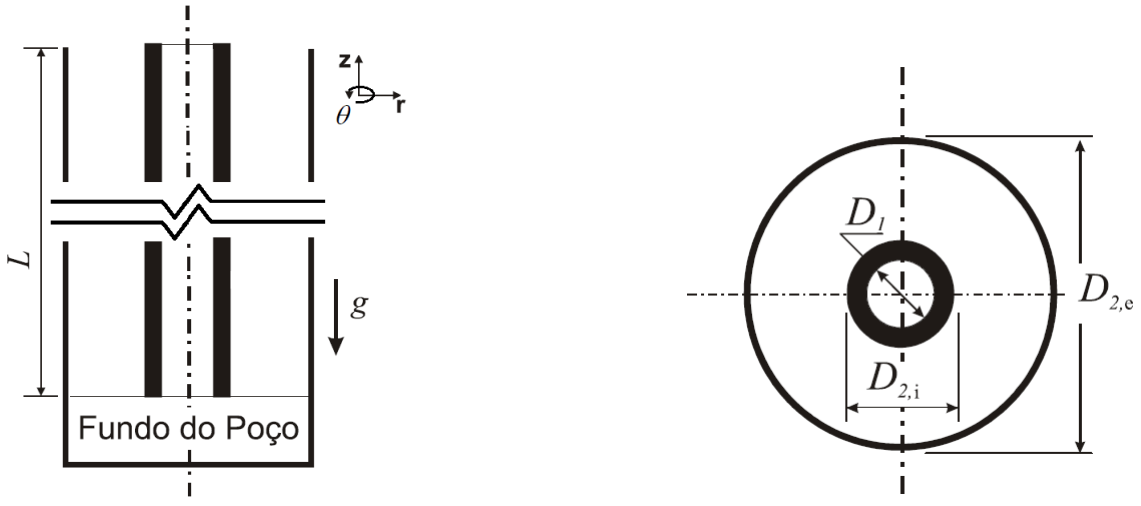
Neste contexto, a utilização de um perfil ótimo para a velocidade axial da coluna de perfuração deve ser considerada a fim de evitar situações operacionalmente indesejadas e maximizar o desempenho através da redução do tempo de manobra e, consequentemente, dos custos de operação [Zamanipour, 2015]. Desta forma, o problema abordado neste trabalho é a modelagem dos gradientes de pressão resultantes da movimentação da coluna de perfuração e a otimização da velocidade axial desta, de forma que a amplitude de tais gradientes sejam limitadas, observando-se as restrições operacionais impostas pela infraestrutura instalada.

3. Modelagem Matemática

A presente seção apresenta um modelo matemático representativo do comportamento fluidodinâmico resultante de uma manobra em um procedimento de perfuração. Tal modelo, baseado nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento, é capaz de prever, através de solução pelo método das características e integração por diferenças finitas, os gradientes de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração. A seguir é apresentada a seção de testes, a formulação do problema bem como o método de solução implementado.

3.1. Seção de Testes

Embora um procedimento real de perfuração seja realizado em diversas seções de diferentes diâmetros, neste trabalho tanto a coluna de perfuração quanto o poço são considerados com geometrias constantes. Como ilustrado na Figura 1, a seção de testes é representada por duas tubulações cilíndricas, de diâmetros diferentes, posicionadas concentricamente. A tubulação interna representa a coluna de perfuração, enquanto a externa representa o poço. A região na qual o problema é resolvido é, desta forma, representada pela porção interior da coluna de perfuração conectada ao espaço anular formado pela parede externa da coluna e a parede do poço. A Figura 1a apresenta a vista longitudinal da seção de testes, destacando o comprimento L da coluna de perfuração e do espaço anular. Já a Figura 1b ilustra o corte transversal da seção de teste destacando o diâmetro interno da coluna de perfuração D_1 e os diâmetros interno e externo do espaço anular, $D_{2,i}$ e $D_{2,e}$, respectivamente. As coordenadas espaciais axial, radial e angular são representadas por z, r e θ, respectivamente.



(a) Corte Longitudinal

(b) Corte Transversal

Figura 1: Seção de teste representada por duas tubulações posicionadas concentricamente. A região de solução do problema compreende o interior da coluna de perfuração e o espaço anular formado pela coluna e o poço.

Neste trabalho o fluido de teste é considerado newtoniano, de alta viscosidade e fracamente compressível. Como hipótese simplificadora, o escoamento é considerado unidimensional na

direção axial, laminar e isotérmico. Não é considerada a presença de cascalhos nem a ocorrência de influxos de hidrocarbonetos no espaço anular, de forma que não existe mudança na massa específica do fluido durante o escoamento. A tensão de cisalhamento nas paredes da coluna de perfuração e do espaço anular são consideradas de acordo com a abordagem de fator de atrito, assim como em Oliveira [2011].

3.2. Equacionamento

A partir das considerações citadas, adotando-se coordenadas cilíndricas e assumindo-se que a massa específica ρ responde às variações da pressão de acordo com $\partial\rho/\partial P = \rho\alpha$, a equação diferencial de conservação de massa pode ser escrita como na Equação 1 [Anderson, 1990; White, 2010]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{\alpha}\frac{\partial V}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

em que V e P são, respectivamente, a velocidade de escoamento e a pressão média ao longo da área da seção transversal (A_s) da região em análise.

O balanço de quantidade de movimento de um escoamento unidimensional de um fluido de baixa compressibilidade, com difusão axial desprezível e simetria angular, em que o fator de atrito é utilizado para representar o valor médio da tensão limite de cisalhamento, pode ser apresentado como na Equação 2 [Oliveira, 2011]:

$$\rho\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{2f\rho V\left|V\right|}{D_h} + \rho g = 0 \tag{2}$$

em que D_h é o diâmetro hidráulico da geometria em análise, definido como D_1 para o caso da coluna de perfuração e $D_{2,e} - D_{2,i}$ para o espaço anular. A aceleração gravitacional é representada pelo símbolo g, enquanto f é o fator de atrito de Fanning e depende da geometria, do regime de escoamento e das propriedades reológicas do fluido em escoamento.

Através do método das características as equações diferenciais parciais de conservação de massa (Eq.(1)) e quantidade de movimento (Eq.(2)), cujas incógnitas são a pressão e a velocidade média de escoamento, com a posição axial e o tempo figurando como variáveis independentes, são convertidas em equações diferenciais totais, para que, submetidas a integração pelo método das diferenças finitas, possam ser resolvidas [Wylie e Streeter, 1978]. Este par de equações pode ser linearmente combinado tal qual na Equação 3:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{2fV\left|V\right|}{D_h} + g + \lambda\left[\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{\alpha}\frac{\partial V}{\partial z}\right] = 0 \tag{3}$$

ou

$$\left[\frac{\lambda}{\alpha}\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial t}\right] + \lambda\left[\frac{1}{\rho\lambda}\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial t}\right] + \frac{2fV\left|V\right|}{D_h} + g = 0 \tag{4}$$

Sabendo-se que a pressão e a velocidade de escoamento são ambas grandezas dependentes do tempo e da posição axial e, tomando-se a compressibilidade isotérmica $\alpha = 1/\rho c^2$ [Anderson, 1990], pode-se definir $\lambda = \pm 1/\rho c$ e $dz/dt = \pm c$. Assim é possível reescrever a Equação 4 na forma de derivadas totais tal qual na Equação 5:

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} + \lambda\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} + \frac{2fV\left|V\right|}{D_h} + g = 0 \tag{5}$$

A substituição de λ na Equação 5 resulta nas retas características C^+ e C^- apresentadas nas Equações 6 e 7, respectivamente:

$$C^+ : \begin{cases} \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\rho c}\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} + \frac{2fV|V|}{D_h} + g = 0 \\ \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} = c \end{cases} \tag{6}$$

https://proceedings.science/p/85355?lang=pt-br

$$C^- : \begin{cases} \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} - \frac{1}{\rho c}\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} + \frac{2fV|V|}{D_h} + g = 0 \\ \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} = -c \end{cases} \tag{7}$$

É conveniente representar o problema em um formato espaço temporal, ilustrado na Figura 2, em que o comprimento total da seção de teste é dividido em NZ seções de tamanho $\Delta z = L/NZ$. Como c normalmente é constante, tem-se que dz/dt é a derivada de uma reta com inclinação c e, desta forma, $\Delta t = \Delta z/c$.

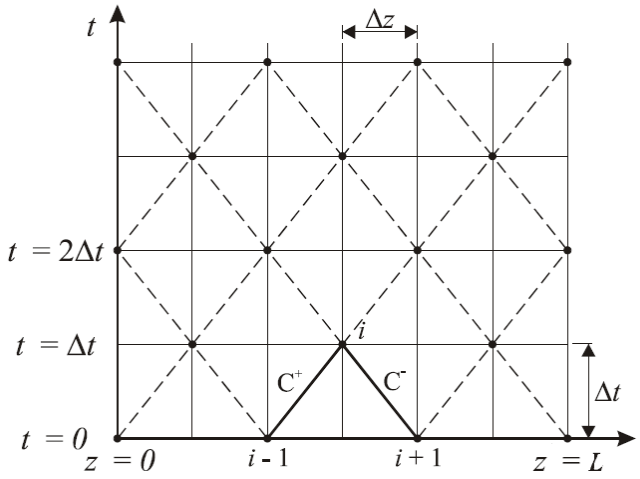


Figura 2: Malha espaço temporal para solução pelo método das características

Na Figura 2, observa-se que é possível verificar a evolução da pressão e da velocidade de escoamento ao longo do tempo, avaliando-se os valores anteriores de pressão e velocidade de escoamento em posições axiais adjacentes. Desta forma, nota-se que P_i e V_i, em um tempo $t = \Delta t$, podem ser derivados a partir das informações contidas nas posições axiais $i - 1$ e $i + 1$ e em um tempo $t = 0$.

As equações que relacionam estas grandezas ao longo do tempo e do espaço podem ser definidas através da integração espacial pelas Equações 6 e 7:

$$C^+ : \quad P_i = P_{i-1} - \rho c\,(V_i - V_{i-1}) - \frac{2\rho f \Delta z}{D_h} V_i\,|V_{i-1}| - \rho g \Delta z \tag{8}$$

$$C^- : \quad P_i = P_{i+1} + \rho c\,(V_i - V_{i+1}) + \frac{2\rho f \Delta z}{D_h} V_i\,|V_{i+1}| + \rho g \Delta z \tag{9}$$

em que $\Delta z = z_i - z_{i-1} = z_{i+1} - z_i$.

Adotando-se o conceito de velocidade efetiva de escoamento (V_{ef}) e de fator de aderência (F_{ve}), a velocidade axial da coluna de perfuração V_{ax} e o arrasto do fluido de perfuração em decorrência da movimentação desta são considerados [Bourgoyne et al., 1986].

$$V_{ef} = V + F_{ve} V_{ax} \tag{10}$$

$$F_{ve} = \begin{cases} 1 & \text{para o interior da coluna} \\ -\left(\frac{1}{2ln(\varepsilon)} + \frac{\varepsilon^2}{1-\varepsilon^2}\right) \; ; \; \varepsilon = \frac{D_{2,i}}{D_{2,e}} & \text{para o espaço anular} \end{cases} \tag{11}$$

Levando-se em consideração as relações expressas nas Equações 10 e 11, as Equações 8 e 9 podem ser apresentadas como:

https://proceedings.science/p/85355?lang=pt-br

$$C^+: \quad P_i = F^+ - \rho c V_i - R_s V_{ef}|_i \tag{12}$$

$$C^-: \quad P_i = F^- + \rho c V_i + R_s V_{ef}|_i \tag{13}$$

com:

$$F^+ = P_{i-1} + \rho c V_{i-1} - \rho g \Delta z - R_s V_{ef}|_{i-1} \tag{14}$$

$$F^- = P_{i+1} - \rho c V_{i+1} + \rho g \Delta z + R_s V_{ef}|_{i+1} \tag{15}$$

em que R_s é o coeficiente de resistência da tubulação, definido como na Equação 16:

$$R_s = \frac{2\rho f \Delta z}{D_h} V \tag{16}$$

Combinando-se as Equações 12 e 13 para uma posição i, com base nos valores anteriores em $i-1$ e $i+1$, é possível definir a equação algébrica para o calculo de V_i e P_i como nas Equações 17 e 18, respectivamente:

$$V_i = \frac{F^+ - F^- - 2R_s F_{ve} V_{ax}}{2\left(\rho c + R_s\right)} \tag{17}$$

$$P_i = \frac{F^+ + F^-}{2} \tag{18}$$

A Figura 3 ilustra a estratégia utilizada para a solução. Duas malhas distintas são definidas, uma para o interior da coluna de perfuração e outra para o espaço anular. O fundo de poço é definido como origem espacial e a superfície como posição final de cálculo. Desta forma, as condições de contorno devem ser definidas para a entrada da coluna de perfuração e para a saída do espaço anular, com $i = j = N_z$, assim como para a região de acoplamento, em que $i = j = 1$.

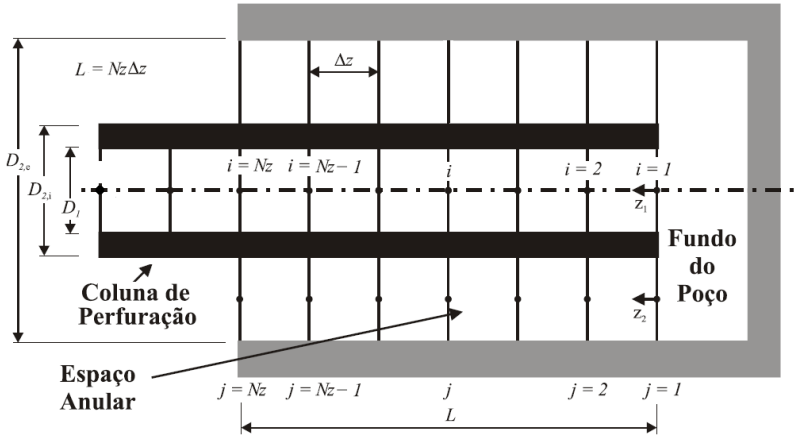


Figura 3: Representação do domínio do problema dividido em duas malhas: coluna de perfuração e espaço anular.

Como uma manobra é realizada com poço aberto, para $i = j = N_z$ as condições de contorno correpondem à pressão atmosférica, de forma que $P_{i=NZ} = P_{j=NZ} = P_{atm}$. Já para a região de acoplamento, região de fundo do poço, considerou-se que a vazão através do espaço anular ($Q_{j=1}$) é a mesma do interior da coluna de perfuração ($Q_{i=1}$), alterando-se somente o sentido. Estas condições definidas oferecem subsídio de cálculo de pressão e velocidade média de escoamento

https://proceedings.science/p/85355?lang=pt-br

para os pontos localizados nas fronteiras da malha apresentada na Figura 2, em que apenas uma das retas características encontra-se disponível.

Após a implementação do modelo fluidodinâmico no *software* Matlab, realizaram-se simulações de procedimentos de retirada e inserção da coluna de perfuração ao interior do poço e analisaram-se os efeitos dos valores de pico da velocidade axial e aceleração, bem como efeitos relacionados aos parâmetros geométricos e reológicos. De forma geral, observou-se que os tempos de subida e de dissipação da energia da onda de pressão estão relacionados com a aceleração imposta à coluna de perfuração, enquanto a intensidade dos picos de pressão relacionam-se, principalmente, à velocidade axial máxima. O aumento dos valores de viscosidade do fluido e profundidade do poço causam aumentos nos gradientes de pressão observados, assim como o estreitamento das regiões por onde o escoamento acontece o faz. Destaca-se, ainda, que aumentos de viscosidade ou da profundidade, assim como o estreitamento do espaço anular do poço, fazem com que a resposta em termos de pressão seja mais amortecida.

4. Modelo Não Linear de Otimização

Nesta seção é definido um modelo de otimização, com seus parâmetros e variáveis de decisão, seu conjunto de restrições e sua função objetivo. A metodologia de implementação do modelo de otimização é, também, apresentada.

4.1. Parâmetros e Variáveis de Decisão

Os parâmetros do modelo representativo de uma manobra podem ser divididos em dois grupos principais: os que descrevem a geometria do poço e os que definem a reologia do fluido de perfuração. O conjunto de parâmetros geométricos é composto pelos diâmetros do poço e da coluna de perfuração além dos comprimentos destes. O parâmetros reológicos são a viscosidade e a densidade do fluido, bem como a velocidade característica de propagação da onda de pressão no fluido utilizado. A Tabela 1 apresenta os parâmetros que definem o poço, a coluna e o fluido de perfuração que, neste trabalho, é representado por glicerina a uma concentração de 90%.

Tabela 1: Parâmetros do modelo de otimização.

Parâmetro	**Valor**
Profundidade do Poço $[m]$	3000
Comprimento da Coluna $[m]$	3000
Diâmetro do Poço $[m]$	0.254
Diâmetro externo da Coluna $[m]$	0.150
Diâmetro interno da Coluna $[m]$	0.127
Viscosidade $[Pa \cdot s]$	0.219
Densidade $[kg/m^3]$	1235.1
Velocidade de Propagação $[m/s]$	1450

Para a otimização de manobras, tomou-se a velocidade axial da coluna de perfuração como a variável de decisão. No entanto destaca-se que esta variável se apresenta como uma função temporal, de forma que a saída do modelo é o perfil de velocidade axial da coluna de perfuração ao longo de todo o procedimento.

A fim de simplificar o problema, definiram-se duas formas pré-fixadas de perfis de velocidade: parabólico e trapezoidal. Assim sendo as variáveis de decisão são os elementos que descrevem essas curvas. Para o perfil de velocidade parabólico a velocidade é descrita como na Equação 19:

$$V_{ax}(t) = \begin{cases} at^2 + bt & \text{se } t' \leq t \leq t'' \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{19}$$

em que a e b são os coeficientes da equação de segundo grau, enquanto t' e t'' são suas raízes.

Caso o perfil de velocidade utilizado seja o trapezoidal, a curva de velocidade é definida como na Equação 20 e as variáveis de decisão são o tempo em movimentação uniformemente acelerada (t_a) e o tempo de movimentação com velocidade constante (t_c). A variável V_p é a velocidade da coluna de perfuração quando em movimento uniforme, também pode ser tomada como a velocidade de pico para este tipo de perfil, e seu valor é dependente das restrições implementadas.

$$V_{ax}(t) = \begin{cases} V_P/t_a \cdot t & \text{se } 0 \leq t \leq t_a \\ V_P & \text{se } t_a \leq t \leq t_a + t_c \\ -V_P/t_a\,(t - 2t_a - t_c) & \text{se } t_a + t_c \leq t \leq 2t_a + t_c \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{20}$$

4.2. Conjunto de Restrições

As restrições as quais o sistema está sujeito se referem principalmente a limitações operacionais e de segurança. Neste trabalho são quatro as restrições definidas e implementadas:

1. O gradiente de pressão resultante da movimentação da coluna de perfuração deve ser tal que não ultrapasse os limiares negativos e positivos definidos de forma a manter a pressão de fundo de poço dentro da janela operacional. Essa restrição pode ser escrita como na Equação 21:

$$\Delta P^{-}_{max} \leq \Delta P \leq \Delta P^{+}_{max} \tag{21}$$

2. A área sobre o perfil ótimo de velocidade no tempo deve ser constante e igual ao comprimento total de uma seção de coluna a ser retirada ou inserida. Usualmente as manobras são realizadas de forma a retirar ou inserir um conjunto de três seções de coluna. Definindo-se que cada seção apresenta um comprimento de nove metros, o deslocamento a cada operação deve totalizar exatos 27 metros. Isso pode ser escrito como a integral do perfil de velocidade ao longo do tempo de operação, tal qual na Equação 22:

$$\int_0^{t_f} V_{ax}(t)dt = 27 \tag{22}$$

3. Dada a capacidade operacional dos equipamentos instalados, a velocidade de pico da coluna de perfuração deve ser menor ou igual à máxima velocidade executável. Essa restrição pode ser escrita como na Equação 23:

$$|V_P| = \max|(V_{ax}(t))| \leq V_{max} \tag{23}$$

4. De forma análoga, a aceleração de pico da coluna de perfuração deve ser menor ou igual à máxima aceleração operacional. Essa restrição pode ser escrita como na Equação 24:

$$|a_P| = \max\left|\frac{\mathrm{d}V_{ax}(t)}{\mathrm{d}t}\right| \leq a_{max} \tag{24}$$

4.3. Função objetivo

A fim de reduzir o tempo não produtivo do processo de perfuração, a otimização de uma manobra requer que o procedimento seja realizado o mais rápido possível. Dessa forma a função objetivo a que se deseja minimizar é o tempo final do deslocamento. O fato de serem considerados dois perfis diferentes de velocidade, que por sua vez são descritos por variáveis distintas, sugere que diferentes funções objetivo sejam escritas de acordo com perfil utilizado.

https://proceedings.science/p/85355?lang=pt-br

Caso se deseje utilizar um perfil parabólico de velocidade, o tempo de operação pode ser escrito como sendo a diferença entre os tempos em que a curva $V_{ax}(t)$ (Equação 19) assume valores nulos. Ou seja, o tempo de operação pode ser definido como a diferença entre as raízes da equação de segundo grau que define a velocidade axial. Assim, para perfil parabólico, define-se a função objetivo como na Equação 25:

$$min\ t_{op} = \frac{-b}{a} \tag{25}$$

Já para o caso de configuração de um perfil de velocidade trapezoidal, a função objetivo pode ser escrita como na Equação 26 e se resume ao tempo de deslocamento da coluna de perfuração em movimento uniforme somado aos tempos em movimento uniformemente acelerado.

$$min\ t_{op} = t_c + 2t_a \tag{26}$$

4.4. Implementação

O modelo de otimização definido nesta seção foi implementado com o uso do conjunto de ferramentas de otimização do *software* Matlab. Mais especificamente, utilizou-se a função *fmincon* que é capaz de solucionar problemas não lineares na forma da Equação 27:

$$\min_x f(x) \ \ s.\,a. \ \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases} \tag{27}$$

em que b e beq são vetores de termos independentes das restrições lineares. A e Aeq são as matrizes de coeficientes das restrições lineares. A função objetivo é representada por $f(x)$ e retorna um escalar, enquanto $c(x)$ e $ceq(x)$ são funções restritivas que retornam vetores. As funções $f(x)$, $c(x)$ e $ceq(x)$ podem ser não lineares. Os vetores lb e ub definem, respectivamente, os limites inferiores e superiores do intervalo em que x está contido.

Para o modelo implementado neste trabalho, a ferramenta de otimização utiliza o método dos pontos interiores para a definição de um ótimo local. Tal método, também referenciado por *método das barreiras*, trabalha de forma a estabelecer barreiras nas bordas da região factível do problema de forma que o processo de busca não deixe tal região [Luenberger e Ye, 2008].

5. Testes, Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados obtidos para a otimização de manobras de inserção da coluna de perfuração com perfis parabólicos e trapezoidais de velocidade axial da coluna de perfuração. Destaca-se que para esta manobra os gradientes de pressão são positivos, assim sendo o máximo gradiente positivo de pressão é, normalmente, um limitador operacional. Os valores de máximos gradientes positivos (ΔP^{+}_{max}) e negativos (ΔP^{-}_{max}) foram configurados de forma que a janela operacional de pressão fosse se estreitando a cada novo teste, simulando manobras em situações cada vez mais desafiadoras. O valor de ΔP^{-}_{max} foi mantido com valor constante de $-2bar$ enquanto o ΔP^{+}_{max} foi configurado com valores diferentes a cada teste, variando de $20bar$ até $4bar$ e totalizando cinco diferentes combinações. A máxima velocidade axial foi definida como $1m/s$ enquanto a máxima aceleração, por sua vez, foi configurada como $0.1m/s^2$.

Os resultados obtidos para perfis parabólicos e trapezoidais de velocidade axial são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 2 e 3. Nestas são apresentados os valores otimizados para as variáveis que definem as curvas de velocidade, a e b para perfis parabólicos de velocidade e t_a e t_c para perfis trapezoidais. Os valores referentes aos tempos de operação (t_{op}), valores de pico para a velocidade (V_P) e aceleração (a_P), bem como os gradientes positivos (ΔP^{+}) e negativos (ΔP^{-}) resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração são, também, apresentados.

https://proceedings.science/p/85355?lang=pt-br

Tabela 2: Otimização dos perfis parabólicos de velocidade para manobras de inserção da coluna de perfuração. Resultados para testes com $\Delta P^{-}_{max} = -2bar$, $V_{max} = 1m/s$ e $a_{max} = 0.1m/s^2$.

-	**caso 1**	**caso 2**	**caso 3**	**caso 4**	**caso 5**
$\Delta P^{+}_{max}[bar]$	20.00	16.00	12.00	8.00	4.00
$t_{op}[s]$	40.50	40.50	42.41	63.53	126.95
a	-0.00243	-0.00243	-0.00213	-0.00063	-0.00008
b	0.0987	0.0987	0.0900	0.0401	0.0100
$\|V_P\|[m/s]$	1.00	1.00	0.95	0.63	0.32
$\|a_P\|[m/s^2]$	0.0987	0.0987	0.0900	0.0401	0.0100
$\Delta P^{+}[bar]$	12.56	12.56	12.00	8.00	4.00
$\Delta P^{-}[bar]$	-0.35	-0.35	-0.32	-0.14	-0.04

Tabela 3: Otimização dos perfis trapezoidais de velocidade para manobras de inserção da coluna de perfuração. Resultados para testes com $\Delta P^{-}_{max} = -2bar$, $V_{max} = 1m/s$ e $a_{max} = 0.1m/s^2$.

-	**caso 1**	**caso 2**	**caso 3**	**caso 4**	**caso 5**
$\Delta P^{+}_{max}[bar]$	20.00	16.00	12.00	8.00	4.00
$t_{op}[s]$	37.00	37.00	38.39	50.75	95.37
$ta[s]$	10.00	10.00	9.27	6.10	5.85
$tc[s]$	17.00	17.00	19.84	38.55	83.66
$\|V_P\|[m/s]$	1.00	1.00	0.93	0.60	0.30
$\|a_P\|[m/s^2]$	0.100	0.100	0.100	0.100	0.051
$\Delta P^{+}[bar]$	12.91	12.91	12.00	8.00	4.00
$\Delta P^{-}[bar]$	-0.37	-0.37	-0.37	-0.41	-0.22

Na Tabela 2 observa-se que a operação foi limitada pela máxima velocidade axial nos casos 1 e 2. Em todas as demais configurações o limitante operacional foi o valor definido para ΔP^{+}_{max}. O mesmo é observado para os resultados apresentados na Tabela 3.

Diferentemente dos resultados obtidos para perfis parabólicos de velocidade, para perfis trapezoidais os resultados apresentam também limitação em termos de máxima aceleração da coluna de perfuração. Essa diferença pode ser explicada pelos graus de liberdade impostos pela representação de cada um dos perfis. Considerando-se um perfil parabólico de velocidade, para um determinado a só existe um b tal que a restrição de deslocamento total seja respeitada. A consideração de um perfil trapezoidal, por sua vez, insere um terceiro termo na representação da curva de velocidade, como pode ser observado na Equação 20, representando um grau de liberdade a mais e a possibilidade de multiplas combinações entre t_a, t_c e V_P para satisfazer a mesma restrição citada.

Os resultados sumarizados nas Tabelas 2 e 3 são graficamente apresentados ao longo do tempo nas Figuras 4 à 7.

A Figura 4 apresenta os perfis ótimos de velocidade axial da coluna de perfuração, para os quais nenhuma das restrições definidas é desrespeitada. As curvas apresentadas em linhas contínuas referem-se aos resultados obtidos para perfil parabólicos de velocidade, enquanto as em estilo tracejado são representativas dos resultados para perfis trapezoidais de velocidade. Isso também é válido para as Figuras 5, 6 e 7 que apresentam, respectivamente, as acelerações da coluna de perfuração ao longo do tempo, seus deslocamentos axiais e os gradientes de pressão observados no fundo do poço. Destaca-se que para ambos os perfis os resultados obtidos para os casos 1 e 2 são idênticos, de forma que as curvas traçadas se sobrepõem.

Com relação ao processo de otimização, destaca-se que o maior grau de liberdade para a implementação com perfil trapezoidal de velocidade resulta em maiores esforços computacionais

https://proceedings.science/p/85355?lang=pt-br

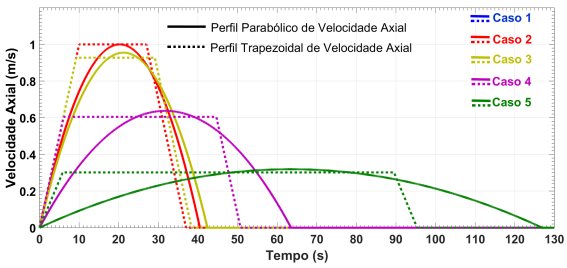


Figura 4: Velocidade axial

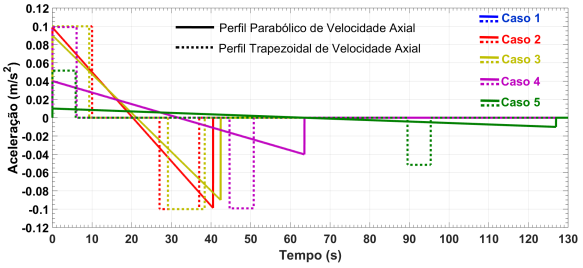


Figura 5: Aceleração

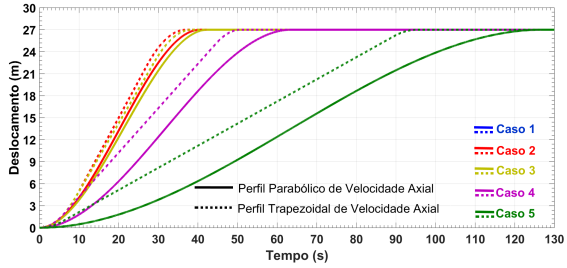


Figura 6: Deslocamento Axial

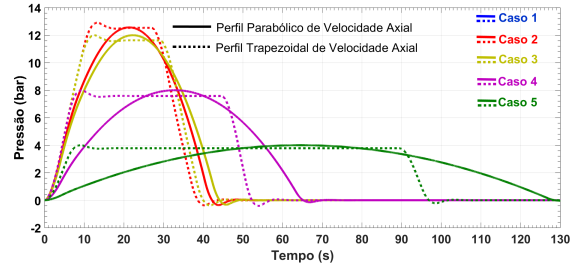


Figura 7: Gradiente de Pressão

para a obtenção de um valor ótimo. A Tabela 4 apresenta a comparação, utilizando valores médios, entre os dados do processo de solução para cada um dos perfis.

Tabela 4: Dados do Processo de Otimização

Propriedade	**Perfil**	
	Parabólico	**Trapezoidal**
Iterações	9	35
Avaliações da Função Objetivo	34	202
Violação Relativa das Restrições	1.13E-12	7.10E-16
Otimalidade de Primeira Ordem	1.03E-5	52E-3

6. Considerações Finais

6.1. Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de otimização aplicado com o intuito de maximizar o desempenho operacional na execução de manobras em processos de perfuração de poços de petróleo e gás. Para tal desenvolveu-se um modelo matemático representativo do escoamento compressível transitório resultante da movimentação axial da coluna de perfuração. A implementação foi realizada utilizando-se as ferramentas de otimização do *software* Matlab.

Das simulações realizadas conclui-se que a taxa de variação da pressão aumenta com o aumento da aceleração da coluna de perfuração, assim como a energia da onda de pressão que se propaga através do fluido de perfuração. Os resultados sugerem que a magnitude do pico de pressão relaciona-se, especialmente, com a velocidade axial da coluna de perfuração. Testes demonstram que o aumento da viscosidade do fluido de perfuração faz com que os gradientes de pressão observados no fundo do poço sejam maiores e que este crescimento não possui comportamento linear. Ainda com relação à viscosidade do fluido nota-se que esta é diretamente relacionada à dissipação da energia da onda de pressão que se propaga através do fluido. Isso se explica pelo fato de o fator de atrito ser diretamente proporcional à viscosidade do fluido em escoamento. De forma semelhante, observa-se que o aumento da profundidade e o estreitamente do espaço anular resultam em maiores gradientes de pressão e maiores taxas de dissipação de energia. Esses aumentos são associados

https://proceedings.science/p/85355?lang=pt-br

especialmente ao aumento da superfície de contato entre o fluido e as paredes da coluna e do poço, e à maior resistência ao escoamento representados pelo aumento da profundidade e estreitamento do anular, respectivamente.

Relativamente aos resultados obtidos através dos procedimentos de otimização, conclui-se que o modelo foi capaz de levar o processo para um estado de maximização de desempenho, de forma a trabalhar nas fronteiras dos recursos operacionais e das margens de segurança. Os testes realizados levam em consideração os gradientes positivos e negativos de pressão admitidos, o deslocamento total da coluna de perfuração e as limitações operacionais em termos de máxima velocidade axial e máxima aceleração da coluna de perfuração. De forma geral, conclui-se que o modelo de otimização desenvolvido e apresentado neste documento é efetivo na minimização dos tempos de operação em manobras e auxilia na redução do tempo não produtivo em procedimentos de perfuração de poços de petróleo.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros sugere-se a consideração de fluidos de perfuração não newtonianos, a existência da broca e de equipamentos instalados ao longo da coluna de perfuração, bem como alterações de geometria do poço. A modelagem das propriedades elásticas da coluna de perfuração e das paredes do poço (formação) também se mostra como uma atividade necessária. Relativamente ao modelo de otimização, considera-se que a otimização funcional da velocidade, de forma que a ferramenta de otimização defina a forma de onda desta, se apresente como uma atividade promissora de bons resultados.

Referências

Anderson, J. (1990). *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective*. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. McGraw-Hill. ISBN 9780070016736.

Bourgoyne, A. J., Millheim, K., Chenevert, M., e Young, F. J. (1986). *Applied drilling engineering*, volume 2. Society of Petroleum Engineers,Richardson, TX.

Coker, I. C. et al. (2004). Managed pressure drilling applications index. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.

Luenberger, D. G. e Ye, Y. (2008). *Linear and Nonlinear Programming*. Springer, 4th edition.

Oliveira, G. M. d. (2011). Modelagem da propagação de pressão no reinício do escoamento de fluidos de perfuração não gelificados. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Rohani, M. R. (2012). Managed pressure drilling: Techniques and options for improving operational safety and efficiency. *Petroleum & Coal*, 54(1).

Thomas, J. (2004). *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Interciência. ISBN 9788571930995.

White, F. (2010). *Mecânica dos Fluidos - 6.ed.:*. McGraw Hill Brasil. ISBN 9788580550092.

Wylie, E. e Streeter, V. (1978). *Fluid transients*. Number v. 1977 in Advanced book program. McGraw-Hill International Book Co.

Zamanipour, Z. (2015). *Automation of Tripping Operations in Directional Wellbores*. PhD thesis, University of Tulsa.

Zhou, J. e Nygaard, G. (2010). Control and estimation of downhole pressure in managed pressure drilling operations. In *Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), 2010 4th International Symposium on*, p. 1–6. IEEE.

https://proceedings.science/p/85355?lang=pt-br