

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

JULIANO SCHOLZ SLONGO

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

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2018

JULIANO SCHOLZ SLONGO

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. Guilherme A. Schneider

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S634n
2018 Slongo, Juliano Scholz
Modelagem e otimização de manobras em processos de perfuração de poços de petróleo e gás / Juliano Scholz Slongo.-- 2018.
103 f. : il. ; 30 cm

Disponível também via World Wide Web
Texto em português com resumo em inglês
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2018
Bibliografia: f. 99-103

1. Engenharia do petróleo. 2. Poços de petróleo – Perfuração. 3. Plataformas de perfuração. 4. Campos petrolíferos – Métodos de produção. 5. Gás – escoamento. 6. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Neves Junior, Flávio. II. Schneider, Guilherme Alceu. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 23 – 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecário: Adriano Lopes CRB9/1429

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 793

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Modelagem e Otimização de Manobras em Processos de Perfuração de Poços de Petróleo e Gás**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Juliano Scholz Slongo**, no dia 06 de abril de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Engenharia de Automação e Sistemas, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Flávio Neves Júnior - Presidente – (UTFPR)

Prof(a). Dr(a). Lúcia Valéria Ramos de Arruda - (UTFPR)

Prof(a). Dr(a). Gustavo Henrique da Costa Oliveira - (UFPR)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 06 de abril de 2018.

À Danieli, meu porto seguro e a minha melhor metade. Você me ensinou que o impossível é passageiro e que basta um passo para já não estarmos no mesmo lugar.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Valmor e Maria Irene, aos meus irmãos, Marcelo e Fernando, e à Danieli, pelo amor, carinho, oportunidade, incentivo, paciência e compreensão ao longo de toda minha vida.

Aos meus orientadores, Flávio Neves Júnior e Guilherme Alceu Schneider, pelo conhecimento compartilhado e pela confiança em mim depositada. Pela disponibilidade e dedicação em ensinar e guiar pelos melhores caminhos. Pelo laço de amizade construído.

Ao professor e coordenador do projeto Avaliação Numérico-experimental de Escoamentos em Hidráulica de Poços, Cezar Negrão, e aos pesquisadores Gabriel, Taynan, Holmes e Nezia, pelas contribuições dedicadas a esta dissertação.

Aos professores e pesquisadores da banca examinadora, por terem aceito o convite e pela graça de ter esta dissertação por eles julgada.

Aos amigos e colegas do Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos - CERNN, do Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado - LASCA, pelo apoio e companheirismo, contribuições e incentivo constante.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que na figura de seu corpo docente e administrativo disponibilizam sua estrutura física e promovem formação de qualidade.

Ao apoio financeiro da PETROBRAS e da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás (PRH-ANP/MCT), do Programa de Formação de Recursos Humanos da PETROBRAS (PRH10) e do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN) na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Nunca houve e nunca haverá um trabalho fácil. Mas a estrada que é construída na esperança é mais agradável ao viajante do que aquela construída no desespero, apesar de ambas levarem ao mesmo destino. MARION ZIMMER BRANDLEY

RESUMO

SLONGO, Juliano Scholz. MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE MANOBRAS EM PROCESSOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS. 117 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O controle dos gradientes de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração durante a execução de manobras em procedimentos de perfuração são um grande desafio a ser superado. 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 dos limites seguros definidos pelas pressões de poro e de fratura da formação, resultando em perdas de recursos, danos ao reservatório poroso e riscos de acidentes. Por outro lado, a adoção de políticas conservadores com relação à velocidade axial da coluna de perfuração resultam em subutilização da infraestrutura instalada, grandes períodos de operação e aumento do tempo não produtivo, significando 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 representativo do processo é baseado nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento que são solucionadas através do método das características. O poço e a coluna de perfuração são modelados por duas tubulações de diâmetros distintos, concêntricamente posicionadas. Os escoamentos no interior da coluna de perfuração e no espaço anular são também modelados. Contudo não se considera a existência de broca ou equipamentos instalados ao longo da coluna. As extremidades superiores da coluna de perfuração e do espaço anular são consideradas abertas para a atmosfera e o nível de fluido no interior do poço é dito constante. O fluido é considerado newtoniano de alta viscosidade, sendo que as características de compressibilidade, viscosidade e tensão limite de escoamento são tomadas como constantes. O escoamento é modelado como unidimensional, laminar e isotérmico em que os efeitos viscosos são avaliados através do conceito de fator de atrito. A existência de cascalhos ou influxos de hidrocarbonetos é desconsiderada. Simulações são realizadas a fim de verificar os efeitos da velocidade e da aceleração nos gradientes de pressão experimentados. Os efeitos da geometria do poço e das propriedades reológicas do fluido de perfuração são também analisados. Os resultados demonstram que aceleração da coluna de perfuração está diretamente relacionada à taxa de variação da pressão ao longo do poço, enquanto a velocidade relaciona-se especialmente à magnitude do pico de pressão. Os aumentos da profundidade do poço, da viscosidade do fluido de perfuração e o estreitamento do espaço anular fazem com que os gradientes de pressão sejam maiores e que a dissipação da energia da onda de pressão aconteça mais rapidamente. O modelo de otimização se mostrou efetivo na redução do tempo de operação e no respeito às restrições implementadas.

Palavras-chave: Perfuração, Manobras, Modelagem, Otimização

ABSTRACT

SLONGO, Juliano Scholz. MODELING AND OPTIMIZATION OF TRIPPING OPERATIONS IN DRILLING PROCESSES. 117 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

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 that brings well inner pressure to overtake safe limits defined by formation's pore and fracture pressures, resulting in loss of resources, damage to the porous reservoir and risk of accidents. On the other hand, the adoption of conservative policies concerning the axial velocity of the drill string results in underutilization of the installed infrastructure, large periods of operation and increase in non-productive time, meaning 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 process modeling is based on the conservation equations of mass and momentum that are solved through the method of the characteristics. The domain of the problem is represented by two pipes with different diameters, representing the well and the drill pipe, concentrically positioned. Both flows inside the drilling column and into the annular space are represented. Nevertheless, the use of a drill bit or any other installed equipment along the column is not considered. The upper ends of the drill string and the annular space are considered open to the atmosphere and the level of fluid within the well is constant. The fluid is considered as a high viscosity Newtonian ones. It's mean that fluid's properties such as compressibility, viscosity and yield stress characteristics are taken as constants. The flow is modeled as one-dimensional, laminar and isothermal, in which the viscous effects are evaluated through the concept of friction factor. The existence of gravel or hydrocarbon inflow is disregarded. Simulations are performed to verify the effects of velocity and acceleration on the pressure gradients experienced. The effects of well geometry and rheological properties of the drilling fluid are also analyzed. The results show that acceleration of the drill string is directly related to the pressure variation rate along the well, whereas the velocity is related to the magnitude of the pressure peak. Increases in the depth of the well, the viscosity of the drilling fluid and the narrowing of the annular space make the pressure gradients larger and the energy dissipation from pressure wave happens so much faster. The optimization model was effective in reducing the operating time and while respect the imposed restrictions.

Keywords: Drilling Operations, Tripping Operations, Modeling, Optimization

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Sonda de Perfuração	27
FIGURA 2	– Representação da geometria do domínio definido	52
FIGURA 3	– Malha espaço temporal para solução pelo método das características	56
FIGURA 4	– Representação do domínio total do problema	60
FIGURA 5	– Fluxograma do procedimento de cálculo.	65
FIGURA 6	– Simulação de retirada da coluna de perfuração.	66
FIGURA 7	– Gradiente de pressão resultante de uma manobra de retirada da coluna de perfuração.	67
FIGURA 8	– Simulação de inserção da coluna de perfuração.	67
FIGURA 9	– Gradiente de pressão resultante de uma manobra de inserção da coluna de perfuração.	68
FIGURA 10	– Análise dos efeitos da máxima velocidade	69
FIGURA 11	– Gradiente de pressão para diferentes velocidade de pico	69
FIGURA 12	– Análise dos efeitos do pico de aceleração	71
FIGURA 13	– Gradiente de pressão para diferentes picos de aceleração	72
FIGURA 14	– Análise de efeitos da viscosidade do fluido	73
FIGURA 15	– Análise de efeitos da profundidade do poço	74
FIGURA 16	– Análise de efeitos do espaçamento anular	75
FIGURA 17	– Perfis parabólicos ótimos de velocidade para manobras de retirada da coluna de perfuração em casos de três restrições.	84
FIGURA 18	– Otimização de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis parabólicos de velocidade e três restrições.	85
FIGURA 19	– Gradientes de pressão - Retirada da coluna - Três restrições - Perfis parabólicos de velocidade.	85
FIGURA 20	– Perfis trapezoidais ótimos de velocidade para manobras de retirada da coluna de perfuração em casos de três restrições.	86
FIGURA 21	– Otimização de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis trapezoidais de velocidade e três restrições.	87
FIGURA 22	– Gradientes de pressão - Retirada da coluna - Três restrições - Perfis trapezoidais de velocidade.	87
FIGURA 23	– Perfis parabólicos ótimos de velocidade para manobras de retirada da coluna de perfuração em casos de cinco restrições.	89
FIGURA 24	– Otimização de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis parabólicos de velocidade e cinco restrições.	89
FIGURA 25	– Gradientes de pressão - Retirada da coluna - Cinco restrições - Perfis parabólicos de velocidade.	90
FIGURA 26	– Perfis trapezoidais ótimos de velocidade para manobras de retirada da coluna de perfuração em casos de cinco restrições.	92
FIGURA 27	– Otimização de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis trapezoidais de velocidade e cinco restrições.	92
FIGURA 28	– Gradientes de pressão - Retirada da coluna - Cinco restrições - Perfis trapezoidais de velocidade.	93

FIGURA 29 – Perfis parabólicos ótimos de velocidade para manobras de inserção da coluna de perfuração em casos de três restrições.	94
FIGURA 30 – Otimização de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis parabólicos de velocidade e três restrições.	94
FIGURA 31 – Gradientes de pressão - Inserção da coluna - Três restrições - Perfis parabólicos de velocidade.	95
FIGURA 32 – Perfis trapezoidais ótimos de velocidade para manobras de inserção da coluna de perfuração em casos de três restrições.	96
FIGURA 33 – Otimização de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis trapezoidais de velocidade e três restrições.	96
FIGURA 34 – Gradientes de pressão - Inserção da coluna - Três restrições - Perfis trapezoidais de velocidade.	97
FIGURA 35 – Perfis parabólicos ótimos de velocidade para manobras de inserção da coluna de perfuração em casos de cinco restrições.	98
FIGURA 36 – Otimização de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis parabólicos de velocidade e cinco restrições.	99
FIGURA 37 – Gradientes de pressão - Inserção da coluna - Cinco restrições - Perfis parabólicos de velocidade.	99
FIGURA 38 – Perfis trapezoidais ótimos de velocidade para manobras de inserção da coluna de perfuração em casos de cinco restrições.	100
FIGURA 39 – Otimização de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis trapezoidais de velocidade e cinco restrições.	100
FIGURA 40 – Gradientes de pressão - Inserção da coluna - Cinco restrições - Perfis trapezoidais de velocidade.	101
FIGURA 41 – Interface gráfica da ferramenta de simulação e otimização de manobras.	110
FIGURA 42 – Janela de configuração das restrições operacionais.	111

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Taxa de transmissão Velocidade/Pressão	70
TABELA 2	– Taxa de transmissão Aceleração/Pressão	72
TABELA 3	– Parâmetros do modelo de otimização.	78
TABELA 4	– Manobra de retirada da coluna de perfuração. Otimização do perfil parabólico de velocidade em caso de três restrições.	84
TABELA 5	– Manobra de retirada da coluna de perfuração. Otimização do perfil trapezoidal de velocidade em caso de três restrições.	86
TABELA 6	– Manobra de retirada da coluna de perfuração. Otimização do perfil parabólico de velocidade em caso de cinco restrições.	88
TABELA 7	– Manobra de retirada da coluna de perfuração. Otimização do perfil trapezoidal de velocidade em caso de cinco restrições.	91
TABELA 8	– Manobra de inserção da coluna de perfuração. Otimização do perfil parabólico de velocidade em caso de três restrições.	93
TABELA 9	– Manobra de inserção da coluna de perfuração. Otimização do perfil trapezoidal de velocidade em caso de três restrições.	95
TABELA 10	– Manobra de inserção da coluna de perfuração. Otimização do perfil parabólico de velocidade em caso de cinco restrições.	97
TABELA 11	– Manobra de inserção da coluna de perfuração. Otimização do perfil trapezoidal de velocidade em caso de cinco restrições.	100
TABELA 12	– Manobra de retirada da coluna de perfuração. Dados de otimização do perfil parabólico de velocidade.	102
TABELA 13	– Manobra de retirada da coluna de perfuração. Dados de otimização do perfil trapezoidal de velocidade.	102
TABELA 14	– Manobra de inserção da coluna de perfuração. Dados de otimização do perfil parabólico de velocidade.	103
TABELA 15	– Manobra de inserção da coluna de perfuração. Dados de otimização do perfil trapezoidal de velocidade.	103
TABELA 16	– Inserção da coluna de perfuração. Testes com diferentes pontos iniciais (x_0).	104

LISTA DE SIGLAS

NPT	<i>Non Productive Time</i>
IADC	<i>International Association of Drilling Contractors</i>
MPD	<i>Managed Pressure Drilling</i>
PI	Programação Inteira
PIM	Programação Inteira Mista
PL	Programação Linear
PNL	Programação Não Linear
LICQ	Linear Independence Constraint Qualification
KKT	Condições Karush-Kuhn-Tucker
ROP	<i>Rate Of Penetration</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

\mathcal{E}	Conjunto de índices de equações restritivas
\mathcal{I}	Conjunto de índices de inequações restritivas
\mathbb{Z}	Conjunto dos números inteiros
D_1	Diâmetro interno da coluna de perfuração [m]
$D_{2,i}$	Diâmetro interno do espaço anular [m]
$D_{2,e}$	Diâmetro externo do espaço anular [m]
L	Profundidade do poço/ Comprimento da coluna de perfuração
z	Coordenada axial
r	Coordenada radial
θ	Coordenada angular
ρ	Massa específica [kg/m^3]
V	Velocidade média de escoamento através da seção transversal de um volume de controle [m/s]
A_s	Área da seção transversal de um volume de controle
Q	Vazão volumétrica [m^3/s]
P	Pressão média na seção transversal de um volume de controle [Pa]
D_h	Diâmetro hidráulico [m]
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
τ_w	Tensão limite de escoamento
f	Fator de atrito de Fanning
c	Velocidade de propagação da onda de pressão no fluido [m/s]
NZ	Número de volumes de controle [un]
C^+	Reta característica C^+
C^-	Reta característica C^-
V_{ef}	Velocidade eficaz de escoamento [m/s]
V_{ax}	Velocidade axial da coluna de perfuração [m/s]
F_{ve}	Fator de aderência
R_s	Coefficiente de resistência da tubulação
Re	Número de Reynolds
ζ	Termo de correção de R_s para o espaço anular
P_{max}^-	Máximo gradiente negativo de pressão admitido
P_{max}^+	Máximo gradiente positivo de pressão admitido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	26
1.1.1 Processo de Perfuração	26
1.1.2 Descrição do problema	28
1.1.3 Delimitação do tema	29
1.2 OBJETIVOS	30
1.2.1 Objetivo Geral	30
1.2.2 Objetivos Específicos	30
1.3 JUSTIFICATIVA	30
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	31
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 TERMINOLOGIA	33
2.2 PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO	34
2.2.1 Formulação Matemática	35
2.2.1.1 Problemas de Programação Linear e Não Linear	36
2.2.1.2 Problemas Com e Sem Restrições	37
2.2.2 Algoritmos de Solução	41
2.3 OTIMIZAÇÃO E CONTROLE NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS	44
2.4 MODELAGEM DE GRADIENTES DE PRESSÕES EM MANOBRAS	47
2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO 2	50
3 MODELAGEM MATEMÁTICA	51
3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	51
3.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES DO PROBLEMA	53
3.2.1 Equação da conservação de Massa	53
3.2.2 Equação da Quantidade de Movimento	54
3.3 SOLUÇÃO PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS	54
3.3.1 Condições de Contorno	60
3.3.1.1 Pressão conhecida na superfície	61
3.3.1.2 Vazão conhecida na extremidade inferior do anular	61
3.3.1.3 Região de acoplamento entre coluna e espaço anular	62
3.4 IMPLEMENTAÇÃO	63
3.5 SIMULAÇÃO DE MANOBRAS	64
3.5.1 Retirada da coluna de perfuração	64
3.5.2 Inserção da coluna de perfuração	66
3.5.3 Efeitos da velocidade de pico	68
3.5.4 Efeitos do pico de aceleração	70
3.5.5 Efeitos de Parâmetros Geométricos e Reológicos	72
3.5.5.1 Viscosidade	72
3.5.5.2 Profundidade	73
3.5.5.3 Espaçamento anular	74
3.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO 3	74
4 MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE MANOBRAS	77

4.1	PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE DECISÃO	77
4.2	CONJUNTO DE RESTRIÇÕES	79
4.3	FUNÇÃO OBJETIVO	80
4.4	IMPLEMENTAÇÃO	80
4.5	RESULTADOS	82
4.5.1	Retirada da coluna de Perfuração	83
4.5.1.1	Retirada da coluna com três restrições implementadas	83
4.5.1.2	Retirada da coluna com cinco restrições implementadas	88
4.5.2	Inserção da coluna de Perfuração	91
4.5.2.1	Inserção da coluna com três restrições implementadas	92
4.5.2.2	Inserção da coluna com cinco restrições implementadas	96
4.5.3	Análise do processo de otimização	101
4.6	SÍNTESE DO CAPÍTULO 4	104
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
5.1	CONCLUSÕES	105
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
	Apêndice A – INTERFACE GRÁFICA	109
	REFERÊNCIAS	113

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente interesse por 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. Pode-se afirmar que mais da metade das reservas de hidrocarbonetos descobertas em mar não apresentam exploração economicamente viável se os procedimentos de perfuração forem realizados sem a utilização de métodos avançados de monitoramento e controle (COKER et al., 2004).

O processo de perfuração é extremamente custoso e envolve quesitos de segurança operacional que devem ser levados em conta. É neste cenário que a utilização de técnicas de controle e otimização de processos se apresenta como uma importante ferramenta na busca por maximização de desempenho e garantia da seguridade operacional.

A pressão de fundo de poço é uma variável crítica para o sucesso de procedimentos de perfuração de poços de petróleo. 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 vários pesquisadores e desenvolvedores de soluções para a indústria de petróleo e gás (ZHOU; NYGAARD, 2010).

Muitos são os eventos causadores de altos gradientes de pressão no interior do poço. Em especial devem ser destacados os procedimentos de parada e reinício de circulação de fluido de perfuração durante as conexões de extensão da coluna e a movimentação axial da coluna de perfuração para a realização de manobras (ROHANI, 2012).

Altos gradientes de pressão no interior do poço podem 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 (*kicks* ou *blowouts*), perda de circulação, instabilidade das paredes do poço e prisão da coluna de perfuração (KHAN, 2012).

Neste cenário, o presente trabalho tratará 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. Com base no modelo hidrodinâmico e levando-se em consideração os patamares seguros de pressão e limitações operacionais, um modelo de otimização será desenvolvido e executado a fim de se realizar manobras no menor tempo possível, mantendo a segurança, utilizando de forma otimizada a infraestrutura disponível e minimizando os custos operacionais.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Esta seção se destina a apresentar ao leitor o contexto em que o trabalho está inserido. A seguir são definidas as atividades básicas envolvidas em um procedimento de perfuração com seus requisitos e tomadas de decisões. O problema de controle de pressão durante a movimentação axial da coluna de perfuração é exposto e as delimitações do trabalho são definidas.

1.1.1 PROCESSO DE PERFURAÇÃO

A perfuração de um poço de petróleo é realizada por meio de um conjunto de equipamentos conhecido como sonda de perfuração, representado parcialmente na Figura 1. Uma sonda é formada por vários sistemas e cada um deles possui suas funcionalidades bem definidas. Pode-se citar os sistemas de sustentação e movimentação de cargas, o sistema de rotação, de circulação de fluido, entre outros (THOMAS, 2004).

Basicamente a perfuração é realizada por meio da aplicação de forças axiais e rotacionais sobre um conjunto de tubulações, referenciado por coluna de perfuração, o qual possui instalado em sua extremidade inferior uma broca de perfuração.

O elemento responsável por promover a movimentação rotacional da coluna de perfuração é a mesa rotativa. Esta está conectada à coluna por meio de uma tubulação dotada de grande resistência à torção, flexão e tração chamada de *kelly* (THOMAS, 2004).

Durante o procedimento de perfuração, um fluido é continuamente bombeado, através de um elemento denominado *swivel*, para o interior da coluna de perfuração. Este fluido, também chamado de lama, escoar através da coluna e de orifícios existentes na broca promovendo troca térmica e lubrificação dos mesmos. O retorno do fluido para a superfície acontece pelo espaço anular formado entre a coluna de perfuração e a parede do poço e, ao retornar, o fluido carrega consigo o particulado resultante do corte da rocha, realizando, assim, a limpeza do poço. Outra função importante desempenhada pelo fluido de perfuração é promover a pressurização do espaço anular de forma a manter

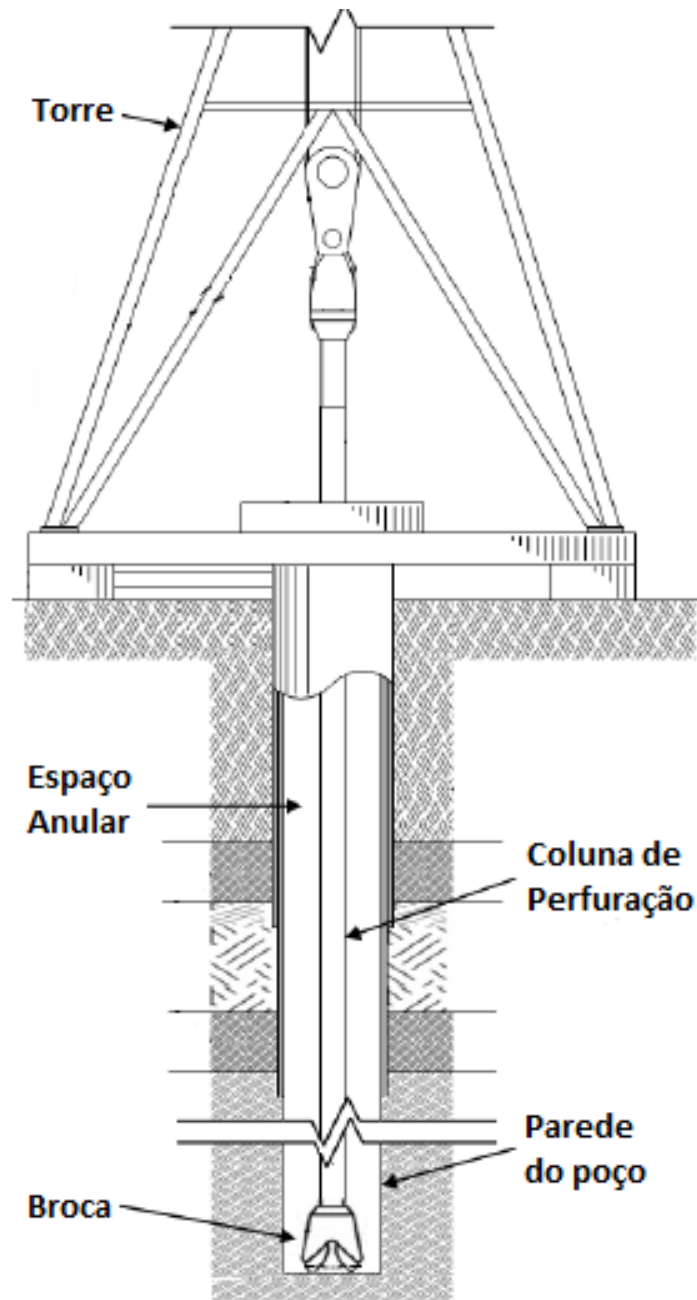


Figura 1: Representação de uma sonda de perfuração

a estabilidade do poço evitando o seu colapso e o fluxo de hidrocarbonetos para o seu interior.

O controle de pressão no interior do poço está intimamente relacionado à segurança operacional e têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores e empresas fornecedoras de soluções para a indústria petrolífera. A pressão no interior do poço deve ser mantida em valores superiores a pressão de poro da formação, evitando, assim, que ocorra o fluxo de óleo ou gás para o interior do poço. Esse fluxo de hidrocarbonetos para o interior do poço, referenciado por *kik*, representa um aumento súbito na vazão através

do espaço anular e pode causar sérios danos aos equipamentos de superfície e resultar em graves acidentes. Caso esse influxo seja incontrolável o termo que o define é, não mais *kik* e sim, *blowout*.

Por outro lado, a pressão no interior do poço não pode superar a pressão de fratura da formação, evitando assim que o fluido de perfuração invada a formação contaminando e causando mudanças na região porosa que contém os hidrocarbonetos. Dessa forma define-se uma região operacional de pressão (janela operacional) com limitações inferior e superior representadas pelas pressões de poro e de fratura da formação, respectivamente.

No decorrer do procedimento de perfuração, conforme a profundidade do poço aumenta, algumas zonas reservatórias com pressões de poro e de fratura muito próximas podem impor desafios de controle de pressão e tornar a operação insegura. Nestas ocasiões, quando a pressão no interior do poço já não pode mais ser mantida dentro da janela operacional, um procedimento conhecido por cimentação deve ser realizado a fim de selar a parede do poço e isolar a zona reservatória (THOMAS, 2004).

A cada etapa de cimentação a coluna de perfuração é retirada e uma estrutura metálica de revestimento, com diâmetro inferior ao da broca, é introduzida no poço. O espaço anular resultante entre o revestimento e as paredes do poço é, então, cimentado, de forma a promover o isolamento necessário para o prosseguimento da perfuração em segurança. Após a cimentação a coluna de perfuração é novamente introduzida, desta vez com uma broca de diâmetro menor, para que a perfuração continue. Os procedimentos de retirada e inserção da coluna de perfuração no interior do poço são chamados de manobras, também referenciadas na literatura como *tripping*.

Tais procedimentos podem custar várias horas de trabalho e estão entre os principais eventos causadores de gradientes de pressão no interior do poço. O presente trabalho apresenta uma proposta de modelagem e otimização destas manobras visando a redução do tempo não produtivo de forma a gerar economia de recursos financeiros, impulsionar a viabilidade de exploração e aumentar a seguridade operacional. A seguir será apresentado o problema, as delimitações adotadas, os objetivos e as justificativas para a realização deste.

1.1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Por questões de desempenho e, especialmente, seguridade operacional, a pressão de fundo de poço deve ser mantida dentro dos limites definidos, inferiormente, pela pressão de poro e, superiormente, pela pressão de fratura da formação, independentemente da

ocorrência ou não de eventos causadores de distúrbios de pressão.

Durante a realização de manobras o poço encontra-se aberto e sem circulação de fluido, de forma que as ferramentas de controle de pressão comumente utilizadas durante a efetiva perfuração não podem ser utilizadas. Desta forma destaca-se que a manutenção da pressão de fundo em patamares seguros de pressão relaciona-se única e exclusivamente à correta manipulação do perfil de velocidade axial da coluna de perfuração e à manutenção de um nível constante de fluido no interior do poço. A opção por grandes velocidades resultam em grandes gradientes de pressão e situações inseguras de operação e, por outro lado, valores conservadores em termos de velocidade significam subutilização da infraestrutura instalada e, o aumento do tempo de operação e dos custos operacionais.

Buscando não somente superar as dificuldades técnicas, mas também as limitações financeiras de um procedimento de perfuração, técnicas de otimização apresentam-se como uma alternativa através da qual consegue-se maximizar o desempenho e reduzir os custos operacionais, podendo tornar viáveis empreendimentos que, até então, não se mostravam economicamente factíveis.

Neste contexto, o problema abordado neste trabalho é a modelagem dos transientes de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração em manobras e a posterior otimização destes procedimentos visando a realização dos mesmos no menor tempo possível respeitando as margens seguras de pressão de fundo de poço e as limitações operacionais que possam estar envolvidas.

1.1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Embora procedimentos reais de perfuração sejam realizados em diversas seções de diferentes diâmetros, neste trabalho, tanto o poço quanto a coluna de perfuração são considerados de geometria constante e a presença de broca ou outros equipamentos instalados ao longo da coluna são desconsiderados. As extremidades superiores do anular e da coluna de perfuração são considerados abertos para a superfície e o nível de fluido de perfuração é tomado como constante ao longo de todo o procedimento.

O fluido de perfuração é considerado newtoniano, de alta viscosidade e com valores de compressibilidade, viscosidade e tensão limite de escoamento constantes. A existência de cascalho ou fragmentos de rocha é desconsiderado, assim como o influxo de hidrocarbonetos para o interior do poço, de forma que a densidade do fluido é constante ao longo do tempo de da profundidade. O escoamento é modelado como unidimensional, laminar e isotérmico em que a tenção de cisalhamento ao longo de todo o domínio é calculada

através do fator de atrito.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos deste trabalho e as atividades executadas para alcançá-los.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é realizar a otimização de manobras de retirada e inserção da coluna de perfuração em operações de perfuração de poços na indústria petrolífera, visando a redução do tempo não produtivo (- *Non Productive Time*) levando-se em conta as limitações operacionais, as restrições impostas janela operacional de pressão e os quesitos de segurança.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral deste trabalho seja alcançado, uma série de objetivos específicos devem ser definidos:

- Modelar os gradientes de pressão causados pela movimentação axial da coluna de perfuração;
- Identificar as restrições do sistema;
- Desenvolver, implementar e validar o modelo de otimização;
- Realizar a otimização de manobras de retirada e inserção da coluna de perfuração no interior do poço.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os gastos operacionais de sondas de perfuração são da ordem de 500 mil dólares por hora. Tal número deixa claro que qualquer avanço em relação à diminuição do tempo de operação representa uma grande economia de recursos financeiros, podendo, inclusive, significar a viabilidade de um procedimento. O presente trabalho é justificado por apresentar a otimização de manobras em termos de tempo operacional e diminuição do tempo não produtivo em que a perfuração não é efetivamente realizada.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos nos quais são apresentadas desde as motivações e justificativas para sua realização até as conclusões relacionadas aos resultados obtidos, passando pela apresentação do problema, revisão literária relacionada a modelagem, otimização e controle de processos industriais. A definição, classificação e formulação matemática de problemas de otimização é apresentada, a caráter de revisão bibliográfica, no Capítulo 2. Ainda neste capítulo são apresentadas algumas propostas de modelagem, implementadas e testadas ao longo dos últimos anos, para a representação de gradientes de pressão resultantes da realização de manobras em procedimentos de perfuração de poços de petróleo. Além disso, a capítulo elenca alguns dos principais trabalhos relacionados à otimização e controle de processos na indústria do petróleo e gás, especialmente os recentemente realizados em busca da superação de desafios encontrados em procedimentos de perfuração visando tornar tais processos mais seguros e eficientes técnico e economicamente. Apresentada a revisão bibliográfica, para tornar possível a otimização de manobras se faz necessária o desenvolvimento de um modelo matemático que as represente. Um modelo definido para esse fim é apresentado no Capítulo 3. O Capítulo 4 apresenta o modelo de otimização e os resultados obtidos com sua aplicação, enquanto as conclusões e discussões são apresentadas no Capítulo 5, juntamente com a definição de possíveis de trabalhos futuros. A interface gráfica implementada ao longo da realização deste trabalho é apresentada no Apêndice A.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo serão apresentados alguns termos técnicos comumente utilizados em trabalhos científicos e por profissionais da área em operações relacionadas à perfuração de poços na indústria petrolífera. O capítulo traz, ainda, a definição e formulação de problemas de otimização, classificando-os em função de suas características representativas e restritivas, além de uma revisão bibliográfica a respeito de sistemas de otimização e controle na indústria de petróleo e gás, bem como em termos de modelagem dos gradientes de pressão causados pela movimentação axial da coluna de perfuração durante a execução de manobras.

2.1 TERMINOLOGIA

A. Manobras

Segundo a Associação Internacional de Contratantes de Perfuração (IADC), uma manobra consiste na retirada (*tripping-out*) ou recolocação (*tripping-in*) da coluna de perfuração do/para o interior do poço (IADC, 2015).

Esta é uma operação normalmente realizada em momentos onde a intervenção para cimentação se faz necessária ou quando a broca encontra-se quebrada ou gasta a ponto de não promover o corte da rocha de forma eficiente. Nesta situação, para que a troca da broca seja realizada, a remoção completa da coluna de perfuração se faz necessária. Na prática, a retirada é realizada em seções de 27 metros que serão, posteriormente, gradualmente unidas e recolocadas no poço com uma nova broca em sua extremidade inferior. A duração desta operação é dependente da profundidade total do poço e da ocorrência ou não de eventos indesejados, como a prisão da coluna, por exemplo. Considera-se que, em um procedimento bem realizado, gaste-se aproximadamente três horas para cada 1000 metros de coluna de perfuração, de forma que em um poço de 6 quilômetros de profundidade a manobra resultaria em cerca de 18 horas de operação (SCHLUMBERGER, 2017).

B. Pressões *surge* e *swab*

Pressões *surge* e *swab* são gradientes de pressão resultantes da realização de operações *tripping-in* e *tripping-out*, respectivamente (IADC, 2015; SCHLUMBERGER, 2017).

Em manobras de inserção da coluna de perfuração, a aceleração desta provoca o deslocamento de frentes de onda de pressão ao longo do poço, resultando em gradientes positivos de pressão (pressões *surge*) com picos e frequência de oscilação dependentes da aceleração, velocidade instantânea e posição axial de referência. De forma análoga, a retirada da coluna de perfuração resultará em gradientes negativos de pressão (pressões *swab*) dependentes das mesmas grandezas citadas acima (OLIVEIRA, 2011).

C. *Managed Pressure Drilling*

De acordo com a Associação Internacional de Contratantes de Perfuração (), *Managed Pressure Drilling* () pode ser definido como: "An adaptive drilling process used to precisely control the annular pressure profile throughout the wellbore"¹ (IADC, 2015).

As técnicas MPD, aplicadas com o objetivo de manter a pressão no espaço anular dentro dos limites operacionais e reagir adequadamente a qualquer situação anômala, podem basear-se em pressurização controlada do poço, controle da densidade e reologia do fluido de perfuração, gerenciamento do nível de fluido no espaço anular, das perdas por fricção, da geometria do poço, entre outras (IADC, 2015; SCHLUMBERGER, 2017).

A aplicação de técnicas MPD pode evitar ou minimizar a ocorrência de problemas como perda de circulação, prisão da coluna de perfuração, instabilidades das paredes do poço e incidentes relacionados ao controle do poço (*kicks* e *blowouts*) (MALLOY et al., 2009). Dentre as principais ferramentas utilizadas para a implementação de um sistema MPD pode-se citar a válvula *choke*, o sistema de bombeio auxiliar e a mesa rotativa ou RCD (KHAN, 2012).

2.2 PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

Muitos autores creditam o início do uso das teorias de otimização e pesquisa operacional a problemas de estratégias e táticas militares com o objetivo de definir a melhor e

¹Um processo adaptativo de perfuração usado para controlar precisamente o perfil de pressão anular em todo o poço.

mais eficaz alocação dos limitados recursos disponíveis. Em 1947, com o desenvolvimento do método Simplex por George B. Dantzig, o uso da pesquisa operacional passou a ser utilizada em muitos outros setores industriais, com o objetivo de diminuição de custos de produção e melhoria na qualidade dos produtos e serviços ofertados. Desde então, esta vem sendo estudada e desenvolvida, tendo alcançado grande sucesso e aplicabilidade com o aumento da velocidade de processamento e a quantidade de memória dos computadores. Deste modo, cada vez mais a otimização de sistemas tem se mostrado eficaz na tomada de decisões ao substituir políticas operacionais conservativas, em que as tomadas de decisões são conduzidas por critérios baseados meramente na experiência dos operadores. Isso permite a melhor compreensão de procedimentos operacionais complexos e fazendo com que os recursos produtivos sejam utilizados de forma a maximizar o desempenho do processo produtivo (MAGATÃO, 2001, 2017).

Segundo Nocedal e Wrihr (2006) a primeira definição a ser realizada a fim de utilizar PO para a otimização de um processo é a de um *objetivo*. O objetivo, que apresenta-se como uma medida quantitativa do desempenho do sistema em estudo, está intimamente relacionado às características as quais se deseja otimizar. Esta relação se dá através dos parâmetros e das variáveis que descrevem o sistema. A intenção por trás da aplicação de PO é encontrar valores para as variáveis de forma que o objetivo seja otimizado, respeitando-se as restrições intrínsecas à operação. O processo de identificação do objetivo, das variáveis e das restrições operacionais para um determinado problema é conhecido como modelagem, e uma vez formulado o modelo, este pode ser solucionado através do uso de algoritmos de otimização.

2.2.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Um problema de otimização é matematicamente expresso como a minimização ou maximização de uma função $f(x)$ cujas variáveis alocadas em um vetor x estão sujeitas a um conjunto de funções restritivas c_i . Uma expressão generalizada para problemas de otimização pode ser observada na Equação 1 (NOCEDAL; WRIGHR, 2006):

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x) \quad s. a. \quad \begin{cases} c_i = 0, & i \in \mathcal{E} \\ c_i \geq 0, & i \in \mathcal{I} \end{cases} \quad (1)$$

em que \mathcal{E} e \mathcal{I} representam os conjuntos finitos de índices para equações e inequações de restrição.

Em alguns problemas de otimização restrições de conjuntos numéricos se fazem

necessárias para uma melhor representação do sistema. Nos problemas que requerem Programação Inteira () ou Programação Inteira Mista (), por exemplo, restrições do formato $x_i \in \mathbb{Z}$, onde \mathbb{Z} é o conjunto dos números inteiros, devem ser acrescentadas ao modelo de otimização.

Problemas de otimização definidos na forma da Equação 1 podem ser classificados de acordo com uma gama de características. Dentre elas pode-se citar a classificação em problemas com ou sem restrições e, ainda em problemas lineares ou não lineares, de acordo com a natureza da função objetivo e das restrições. Problemas lineares e não lineares são resolvidos através de Programação Linear () e Programação Não Linear (), respectivamente (NOCEDAL; WRIGHR, 2006; LUENBERGER; YE, 2008).

2.2.1.1 Problemas de Programação Linear e Não Linear

Um problema de Programação Linear, como o próprio nome sugere, é formulado através de funções lineares. Ou seja, a função objetivo é de natureza linear assim como as equações e inequações restritivas (NOCEDAL; WRIGHR, 2006; LUENBERGER; YE, 2008).

Um modelo de programação linear pode resolver problemas de otimização em sistemas de transporte, armazenagem e distribuição, dimensionamento de lotes, otimização de *layouts*, formação de células, programação de produção, gestão, finanças, economia, entre outros. Esse tipo de problema pode ser representado matematicamente como na Equação 2 (NOCEDAL; WRIGHR, 2006; LUENBERGER; YE, 2008):

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} z(x) = c^T x \quad s.a. \quad \begin{cases} A \cdot x = b \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

em que, $c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}$, $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$, $b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}$ e $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$.

Problemas de Programação Não Linear, por sua vez, são aqueles que ao menos uma das equações que compõem o modelo, função objetivo e funções restritivas, é de caráter não linear. São problemas geralmente relacionados a fenômenos físicos, aplicações em engenharia, controle, economia e finanças, processamento de sinais, entre outros (NOCEDAL; WRIGHR, 2006; ZAMANIPOUR, 2015).

2.2.1.2 Problemas Com e Sem Restrições

Problemas de otimização sem restrições, em que $\mathcal{E} = \mathcal{I} = \emptyset$, são geralmente problemas de formulação mais simples (LUENBERGER; YE, 2008) ou que surgem como uma reformulação de modelos com restrições, em que o conjunto de restrições é substituído por termos de penalização inseridos na própria função objetivo de forma a desencorajar violações de restrições (NOCEDAL; WRIGHR, 2006).

Os problemas com restrições por sua vez surgem em modelos em que estas representam parte fundamental do problema e não devem ser negligenciadas (NOCEDAL; WRIGHR, 2006). Tais restrições podem ser meramente para indicar intervalos nos quais o valor de uma variável pode estar contido, ser uma expressão linear ou representar relacionamentos não lineares entre as variáveis.

De acordo com Nocedal e Wrighr (2006), se, em um ponto x pertencente ao espaço válido de busca, $c_i(x) = 0$, então $i \in \mathcal{I}$ é dito *ativo*. No entanto se $c_i(x) > 0$, $i \in \mathcal{I}$ é dito *inativo*. Desta forma, o conjunto $\mathcal{A}(x)$, em qualquer ponto x , consiste nos índices das equações de restrição (\mathcal{E}) juntamente com os índices das inequações restritivas para as quais $c_i = 0$. Ou seja, $\mathcal{A}(x) = \mathcal{E} \cup \{i \in \mathcal{I} | c_i(x) = 0\}$.

A. Problema com Restrição de Igualdade

Considerando o problema de minimização apresentado na Equação 3:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x) \quad \text{s. a. } c_1(x) = 0 \quad (3)$$

em que $c_1(x)$ a uma restrição de igualdade, tem-se que para um ponto x^* que é solução para o problema, existe um escalar λ_1^* tal que (NOCEDAL; WRIGHR, 2006):

$$\nabla f(x^*) = \lambda_1^* \nabla c_1(x^*) \quad (4)$$

em que $\nabla f(x^*)$ é o gradiente da função f no ponto x^* e nos permite avaliar a direção e o sentido de crescimento de f . O mesmo pode ser afirmado a respeito de $\nabla c_1(x^*)$.

Tomando-se a função Lagrangiana $\mathcal{L}(x, \lambda_1) = f(x) - \lambda_1 c_1(x)$, tem-se o gradiente desta como na Equação 5:

$$\nabla_x \mathcal{L}(x, \lambda_1) = \nabla f(x) - \lambda_1 \nabla c_1(x) \quad (5)$$

Substituindo a Equação 3 na Equação 5 tem-se:

$$\nabla_x \mathcal{L}(x^*, \lambda_1^*) = 0 \quad (6)$$

A igualdade apresentada na Equação 6 nos permite afirmar que, para um problema de minimização sujeito a uma restrição de igualdade, a solução pode ser obtida encontrando-se pontos estacionários da função Lagrangiana (NOCEDAL; WRIGHR, 2006; ZAMANIPOUR, 2015). Embora a condição da Equação 6 seja necessária para uma solução ótima, ela não é suficiente (ZAMANIPOUR, 2015).

O escalar λ_i^* é conhecido como o *multiplicador Lagrangiano* para a restrição $c_i(x^*)$ e nos diz algo sobre a sensibilidade do valor de $f(x^*)$ à restrição c_i . Se λ_i^* é exatamente zero para uma dada restrição c_i , uma pequena alteração no termo independente desta irá afetar enormemente o valor de $f(x^*)$ (NOCEDAL; WRIGHR, 2006).

B. Problema com Restrição de Desigualdade

Considerando o problema de minimização apresentado na Equação 7,

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x) \quad \text{s. a. } c_1(x) \geq 0 \quad (7)$$

em que $c_1(x)$ a uma restrição de desigualdade, tem-se que para um ponto x^* que é solução para o problema, existe um multiplicador Lagrangiano $\lambda_1^* \geq 0$ tal que (NOCEDAL; WRIGHR, 2006):

$$\nabla_x \mathcal{L}(x^*, \lambda_1^*) = 0 \quad (8)$$

O multiplicador Lagrangiano só pode ser estritamente positivo quando a restrição c_i a qual ele está relacionado for ativa ($i \in \mathcal{I}$). Isso se dá com a chamada *condição de complementaridade* apresentada na Equação 9 (NOCEDAL; WRIGHR, 2006):

$$\lambda_1^* c_1(x^*) = 0 \quad (9)$$

C. Condições de Otimalidade em Problemas com Restrições

a. Condições Necessárias de Primeira Ordem

A função Lagrangiana para um problema geral de minimização, tal qual o apresentado na Equação 1, é definida como na Equação 10:

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) - \sum_{i \in \mathcal{E} \cup \mathcal{I}} \lambda_i c_i(\mathbf{x}) \quad (10)$$

Supondo que x^* é uma solução local para o problema da Equação 1, onde f e c_i apresentam suas derivadas primeira e segunda contínuas, e que $\nabla c_1(\mathbf{x}^*)$, $i \in \mathcal{A}(\mathbf{x}^*)$ seja linearmente independente (*Linear Independence Constraint Qualification* -), haverá um vetor de multiplicadores Lagrangianos $\boldsymbol{\lambda}^*$, com elementos λ_i^* , $i \in \mathcal{E} \cup \mathcal{I}$, tal que as condições elencadas na Equação 11 são satisfeitas em $(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*)$:

$$\nabla_x \mathcal{L}(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*) = 0, \quad (11a)$$

$$c_i(\mathbf{x}^*) = 0, \quad \forall i \in \mathcal{E}, \quad (11b)$$

$$c_i(\mathbf{x}^*) \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{I}, \quad (11c)$$

$$\lambda_i^* \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{I}, \quad (11d)$$

$$\lambda_i^* c_i(\mathbf{x}^*) = 0, \quad \forall i \in \mathcal{I} \cup \mathcal{I}. \quad (11e)$$

As condições expressas na Equação 11 são conhecidas como *Condições Karush-Kuhn-Tucker* ou simplesmente *Condições*, e são ditas de primeira ordem por referirem-se ao gradiente (derivadas primeiras) das funções f e c_i (NOCEDAL; WRIGHR, 2006).

A Equação 11e expressa as condições de complementaridade que implicam em cada restrição i ser ativa ou $\lambda_i^* = 0$, ou possivelmente ambos. Os multiplicadores Lagrangianos relacionados a restrições inativas ($i \notin \mathcal{A}(\mathbf{x}^*)$) são sempre nulos (NOCEDAL; WRIGHR, 2006).

b. *Condições Complementares Estritas de Primeira Ordem*

Para um dado problema na forma da Equação 1 com uma solução x^* podem haver vários vetores $\boldsymbol{\lambda}^*$ que satisfaçam as condições KKT. No entanto, se a LICQ é assegurada o vetor de multiplicadores Lagrangianos $\boldsymbol{\lambda}^*$ é único. Isso é enunciado na definição de condições complementares estritas de primeira ordem.

Para uma dada solução local x^* e um vetor $\boldsymbol{\lambda}^*$ que satisfaça as condições KKT, diz-se que a condição estrita de complementaridade é respeitada se exatamente uma das λ_i^* e $c_i(x^*)$ for zero para cada índice $i \in \mathcal{I}$, ou seja, $\lambda_i^* > 0$ para cada $i \in \mathcal{I} \cap \mathcal{A}(x^*)$ (NOCEDAL; WRIGHR, 2006).

A satisfação das condições estritas de complementaridade usualmente tornam a determinação do conjunto de restrições ativas mais fácil para os algoritmos de otimização e a conversão para um ponto ótimo mais rápida.

c. *Condições Necessárias de Segunda Ordem*

Partindo-se de um ponto factível x e levando-se em conta o conjunto de restrições ativas $\mathcal{A}(x)$, o conjunto de direções factíveis pode ser escrito como na Equação 22.

$$\mathcal{F}(\mathbf{x}) = \left\{ \mathbf{d} \mid \begin{array}{l} \mathbf{d}^T \nabla c_i(\mathbf{x}) = 0, \quad \forall i \in \mathcal{L} \\ \mathbf{d}^T \nabla c_i(\mathbf{x}) \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{A} \cap \mathcal{I} \end{array} \right\} \quad (22)$$

Seja \mathbf{x}^* uma solução que satisfaça as condições KKT, qualquer movimentação ao longo de um vetor $\mathbf{w} \in \mathcal{F}(\mathbf{x}^*)$ faz com que a aproximação de primeira ordem da função objetivo torne-se maior ($\mathbf{w}^T \nabla f(x^*) > 0$) ou que mantenha o mesmo valor ($\mathbf{w}^T \nabla f(x^*) = 0$). Para as direções $\mathbf{w} \in \mathcal{F}(\mathbf{x}^*)$ em que $\mathbf{w}^T \nabla f(x^*) = 0$ as informações relativas às derivadas primeiras não dão subsídios para a definição da direção de crescimento ou decrescimento da função objetivo. Dessa forma a análise das derivadas segundas das expansões em séries de Taylor de f e c_i é realizada a fim de determinar o comportamento destas funções na direção indicada por \mathbf{w} (NOCEDAL; WRIGHR, 2006).

Supondo, então, que \mathbf{x}^* é uma solução local e que a LICQ é satisfeita, assim como λ^* é um vetor de multiplicadores Langrangianos que satisfaz as condições KKT, a *Condição Necessária de Segunda Ordem* é escrita como na Equação 23 e nos indica que a Hessiana do Lagrangiano ($\nabla_{xx}^2 \mathcal{L}(\mathbf{x}^*, \lambda^*)$) carrega consigo a curvatura ao longo das direções críticas:

$$\mathbf{w}^T \nabla_{xx}^2 \mathcal{L}(\mathbf{x}^*, \lambda^*) \mathbf{w} \geq 0, \quad \forall \mathbf{w} \in \mathcal{C}(\mathbf{x}^*, \lambda^*) \quad (23)$$

em que $\mathcal{C}(\mathbf{x}^*, \lambda^*)$ representa uma geometria crítica dentro da qual as restrições tendem a ser respeitadas. Tal geometria é definida como na Equação 24:

$$\mathcal{C}(\mathbf{x}^*, \lambda^*) = \{ \mathbf{w} \in \mathcal{F}(\mathbf{x}^*) \mid \nabla c_i(\mathbf{x}^*)^T \mathbf{w} = 0, \forall i \in \mathcal{A}(\mathbf{x}^*) \cap \mathcal{I}, \lambda_i^* > 0 \} \quad (24)$$

d. *Condições Suficientes de Segunda Ordem*

Suponha uma solução \mathbf{x}^* para a qual haja um vetor de multiplicadores Lagrangianos λ^* que satisfaça as condições KKT. O vetor \mathbf{x}^* será uma solução local estrita caso a condição descrita na Equação 25 for satisfeita.

$$\mathbf{w}^T \nabla_{xx}^2 \mathcal{L}(\mathbf{x}^*, \lambda^*) \mathbf{w} > 0, \forall \mathbf{w} \in \mathcal{C}(\mathbf{x}^*, \lambda^*), \mathbf{w} \neq 0 \quad (25)$$

2.2.2 ALGORITMOS DE SOLUÇÃO

Os algoritmos de minimização são métodos iterativos que, partindo de um ponto inicial x_0 , geram sequências de estimativas $\{x_k\}_{k=0}^{\infty}$ em que $f(x_k) \leq f(x_{k-1})$. O procedimento é encerrado quando a solução não pode mais ser melhorada ou ao se atingir um grau de acurácia satisfatória. As estratégias utilizadas para a transição entre uma iteração e a subsequente é o que difere um algoritmo do outro, e baseiam-se em informações provenientes da função objetivo e das restrições, avaliadas na iteração atual (k) ou em iterações anteriores ($k-1, k-2, k-i$) (NOCEDAL; WRIGHR, 2006).

A programação linear aliada ao método simplex de solução é a principal ferramenta de otimização aplicada em problemas de otimização lineares. Outro método de solução muito utilizado é o dos pontos interiores (NOCEDAL; WRIGHR, 2006). Para a solução com o método simplex a convergência é garantida para um local exato de solução com um número finito, que cresce exponencialmente com o tamanho do problema, de iterações. Algoritmos de pontos interiores por sua vez, tratando o problema através da introdução de termos não lineares, não chegam a uma solução em um número finito de passos, mas sim convergem gradativamente para uma solução (LUENBERGER; YE, 2008).

No entanto nem todos os problemas de otimização são de caráter linear, e assim algoritmos de solução capazes de lidar com as não linearidades se fazem necessários. Dentre os principais algoritmos destacam-se os baseados na região de confiança (*trust region*), no conjunto de restrições ativas (*active-set*) e no método dos pontos interiores (NOCEDAL; WRIGHR, 2006).

O método baseado na região de confiança define um passo transitório entre uma iteração e outra através da especificação de uma região, de raio Δ_k , ao redor de x_k . A partir daí, percorre-se a região de forma a escolher uma direção e um tamanho de passo tal que x_{k+1} minimize $f(x_{k+1})$ nesta região. O tamanho da região é um fator crítico na efetividade do algoritmo. Se a região é muito pequena, o algoritmo progride a passos curtos e lentamente em direção à solução do problema e, por outro lado, caso a região seja demasiada grande, o ponto de mínimo da problema pode se encontrar muito distante do ponto de mínimo da função objetivo na região, exigindo a diminuição do tamanho da região e uma nova tentativa. Para superar tal dificuldade, o tamanho da região é definida

com base no desempenho do algoritmo em iterações sucessivas (NOCEDAL; WRIGHR, 2006).

O método *active-set* por sua vez baseia-se na divisão das inequações restritivas em dois grupos: as que são tratadas como ativas e as que são tratadas como inativas. A cada iteração um conjunto de restrições, subconjunto das restrições efetivamente ativas no ponto atual, referenciado como conjunto de trabalho, é definido. Então o algoritmo percorre a superfície de trabalho definida pelos restrições do conjunto de trabalho a procura de um ponto x_{k+1} tal que $f(x_{k+1}) \leq f(x_k)$. A partir daí o conjunto de trabalho é novamente definido e a operação se repete até encontrar-se a solução do problema (LUENBERGER; YE, 2008).

Por fim, o método dos pontos interiores, 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; YE, 2008).

Segundo Nocedal e Wrihr (2006) os métodos dos pontos interiores têm se mostrado bem sucedidos em aplicações tanto lineares quanto não lineares. Um problema não linear padrão, como o apresentado na Equação 1, pode ser escrito como na Equação 26:

$$\min_{x,s} f(x) \quad s. a. \quad \begin{cases} c_E(x) = 0 \\ c_I(x) - s = 0 \\ s \geq 0. \end{cases} \quad (26)$$

em que as inequações $c_I(x)$ são transformadas em equações através da introdução do vetor s de variáveis de folga.

As condições KKT para o problema não linear da Equação 26 podem ser escritas como na Equação 27:

$$\nabla f(x) - A_E^T(x)y - A_I^T(x)z = 0, \quad (27a)$$

$$Sz - \mu e = 0, \quad (27b)$$

$$c_E(x) = 0, \quad (27c)$$

$$c_I(x) - s = 0. \quad (27d)$$

com $\mu = 0$, $s \geq 0$ e $z \geq 0$.

Na Equação 27, $A_E(x)$ e $A_I(x)$ são as matrizes Jacobianas das funções c_E e c_I , respectivamente, e y e z são seus multiplicadores Lagrangianos. S é uma matriz diagonal

cujos elementos da diagonal principal são os elementos de s e e é um vetor coluna unitário.

O sistema primal-dual do sistema não linear da Equação 27 pode ser obtido através do método de Newton tal como na Equação 36 (NOCEDAL; WRIGHR, 2006):

$$\begin{bmatrix} \nabla_{xx}^2 \mathcal{L} & 0 & -A_E^T(x) & -A_I^T(x) \\ 0 & Z & 0 & S \\ A_E(x) & 0 & 0 & 0 \\ A_I(x) & -I & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_s \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla f(x) - A_E^T(x)y - A_I^T(x)z \\ Sz - \mu e \\ c_E(x) \\ c_I(x) - s \end{bmatrix} \quad (36)$$

em que Z é uma matriz diagonal cujos elementos da diagonal principal são os elementos de z . \mathcal{L} denota a Lagrangiana das restrições do problema da Equação 26:

$$\mathcal{L}(x, s, y, z) = f(x) - y^T c_E(x) - z^T (c_I(x) - s). \quad (37)$$

Após a definição do passo $p = (p_x, p_s, p_y, p_z)$ ser determinado através do sistema da Equação 36, uma nova iteração (x^+, s^+, y^+, z^+) pode ser computada como na Equação 38:

$$\begin{aligned} x^+ &= x + \alpha_s^{max} p_x \\ s^+ &= s + \alpha_s^{max} p_s \\ y^+ &= y + \alpha_z^{max} p_y \\ z^+ &= z + \alpha_z^{max} p_z \end{aligned} \quad (38)$$

onde,

$$\begin{aligned} \alpha_s^{max} &= \max \{ \alpha \in (0, 1] : s + \alpha p_s \geq (1 - \tau)s \} \\ \alpha_z^{max} &= \max \{ \alpha \in (0, 1] : z + \alpha p_z \geq (1 - \tau)z \} \end{aligned} \quad (39)$$

em que $\tau \in (0, 1)$.

O algoritmo para o método dos pontos interiores é definido como a seguir (NOCEDAL; WRIGHR, 2006):

1. Escolha um x_0 e $s_0 > 0$, e calcule os valores iniciais dos multiplicadores Lagrangianos y_0 e z_0 .
2. Selecione valores iniciais para o parâmetro $\mu_0 > 0$ e para os parâmetros σ e $\tau \in (0, 1)$;
3. Faça $k \leftarrow 0$;

4. **Enquanto** um critério de parada não for satisfeito

Enquanto $E(x_k, s_k, y_k, z_k; \mu_k) \leq \mu_k$

Obtenha o passo $p = (p_x, p_s, p_y, p_z)$ através da solução do sistema da Equação 36;

Calcule α_s^{max} e α_z^{max} através da Equação 39;

Calcule a nova iteração $(x_{k+1}, s_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1})$ através da Equação 38;

Faça $\mu_{k+1} \leftarrow \mu_k$ e $k \leftarrow k + 1$;

Fim

Escolha um novo valor para $\mu_k \in (0, \sigma \mu_k)$;

Fim

2.3 OTIMIZAÇÃO E CONTROLE NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

Sistemas de controle são de extrema importância e amplamente aplicados em processos dos mais diversos setores industriais visando aumentar desempenhos, suprir requisitos técnico operacionais e maximizar o retorno financeiro (CRAIG et al., 2011).

De acordo com Craig et al. (2011), os impactos técnicos são observados especialmente em processos que, por si só, se apresentam instáveis, os quais não seriam operacionais sem a aplicação de técnicas de controle. Já os impactos econômicos são observados em situações em que os sistemas básicos de controle já encontram-se operantes, mantendo o processo estável, e sistemas avançados de controle, baseados em modelos de otimização de processos, são então aplicados visando trabalhar nos limites operacionais maximizando desempenho e minimizando os custos. Suas aplicações, na indústria petrolífera, vão desde a perfuração de poços, passando pelo processo exploratório até o refino.

Foss (2012) discute a importância de metodologias de modelagem, estimação, otimização e controle no desenvolvimento da indústria do petróleo. O autor exemplifica destacando os desafios encontrados para realizar o controle de pressão em procedimentos de perfuração e controle de golfadas em escoamentos multifásicos. Craig et al. (2011) cita a aplicação de técnicas de otimização e controle avançado em processos relacionados à destilação, ao craqueamento catalítico, aos separadores multifásicos e a sistemas de injeção de gás (*gas-lift*).

Estudos de sistemas de otimização e o controle de processos em torres de destilação de petróleo bruto são realizados usando teorias de redes neurais *wavelet*, algoritmos

de competição *line-up* (SHI et al., 2017), algoritmos evolucionários, funções de base radial (SHI et al., 2016) e métodos heurísticos como análise *Pinch* (ALHAMMADI, 2008), visando ganhos qualitativos, quantitativos e econômicos.

Outro grande desafio de otimização observado em refinarias de petróleo são as unidades de craqueamento catalítico. Tais plantas apresentam processos complexos, com dinâmica não linear e de difícil modelagem (ALVAREZ-RAMIREZ et al., 2004). A grande interação entre os diferentes processos existentes na unidade é destacada por Iancu et al. (2012) e Karthika et al. (2012), e se apresenta como um elemento dificultador. A aplicação de técnicas de análise e otimização a fim de se verificar todas as restrições do sistema, identificar as variáveis do processo e definir estruturas de controle é apresentada por Popa (2014).

Técnicas de otimização e controle são amplamente aplicadas em procedimentos de *gas-lift* visando maximizar a produção em campos de extração de petróleo. Muitos algoritmos de otimização de tal processo são apresentados na literatura visando definir qual é a melhor maneira de distribuir os recursos, que são limitados, de forma a se obter o valor máximo em termos de produtividade. Kosmidis et al. (2004), Wang et al. (2008), Sharma et al. (2012), Ribeiro et al. (2016) são exemplos de estudos de alocação da capacidade do sistema de *gas-lift*, levando em conta as limitações impostas pelos equipamentos instalados na plataforma, visando maximizar a produção.

Sistemas de controle multicamadas são apresentados por Helgestad (2010) e Shishavan et al. (2014). Tais trabalhos apresentam modelos matemáticos que descrevem fenômenos observados durante o procedimento de perfuração de poços de óleo e gás. Os modelos definidos são a base para a implementação da camada de otimização que, por sua vez fornece subsídios para a camada de supervisão. Através das informações obtidas pela aplicação de técnicas de otimização, o controle supervisor define quais são os melhores *set points* que devem ser utilizados nos laços de controle da camada de controle regulatório a fim de se obter o melhor modo de operação e garantir o ponto ótimo de operação.

As modelagens da taxa de penetração (- *Rate Of Penetration*), carregamento de cascalho, pressão de fundo de poço e potência e torque do motor responsável pelo movimento rotacional da coluna de perfuração são apresentadas em (HELGESTAD, 2010). O objetivo do modelo de otimização é minimizar o tempo gasto com o procedimento de perfuração maximizando a ROP e a vida útil da broca. Restrições operacionais foram definidas e valores ótimos foram calculados para as variáveis de decisão de forma a garantir pressão de fundo de poço dentro dos limites operacionais e a realização da perfuração o

mais rápido possível.

Shishavan et al. (2014) por sua vez, com um trabalho bastante semelhante ao apresentado em (HELGESTAD, 2010), incluem a funcionalidade de detecção e eliminação de *kicks* ao implementar, além de controle multicamadas, uma estratégia de controle baseada em prioridades. Em casos normais de operação o controle leva a maximização da ROP e, em casos de operação anormal o controlador opera de forma a controlar e eliminar a ameaça de fluxo de óleo ou gás para o interior do poço.

O problema de pressões de *surge* e *swab* induzidas por ondas em perfurações em alto mar é estudado, por Albert et al. (2015), em uma bancada experimental construída na Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia. Na mesma linha de pesquisa, Landet et al. (2012, 2013) apresentam um modelo matemático que descreve a dinâmica da pressão em um poço sujeito a distúrbios causados pela flutuação da sonda de perfuração em alto mar.

Modelos representativos a sistemas de perfuração MPD são apresentados por Zhou e Nygaard (2010), Stamnes et al. (2011), Reitsma e Couturier (2012), Nandan et al. (2014). Petersen et al. (2008), na busca por permitir aos operadores melhor conhecimento sobre a dinâmica do poço em perfuração e o uso deste conhecimento em ferramentas de medição e controle, desenvolveram um simulador de operações com sistema MPD. A ferramenta permite a avaliação de uma grande gama de possibilidades: ocorrência de escoamentos monofásicos ou multifásicos durante o processo; escoamentos em regime laminar, turbulento ou em regime de transição; presença de óleo, água, gás ou sólidos, provenientes da formação, misturados ao fluido de perfuração; utilização de fluido de perfuração base água ou base óleo; entre outras.

Stamnes et al. (2011), baseados em um modelo matemático obtido através das leis de conservação de massa e momento, desenvolvem um estimador adaptativo da pressão de fundo de poço em um sistema MPD. O estimador, levando em consideração as informações medidas de pressão e vazão na entrada e na saída do poço, adapta os valores dos parâmetros relacionados à densidade e as perdas por fricção, que são desconhecidos, de forma que a pressão de fundo de poço estimada convirja para a pressão de fundo real. Os dados provenientes do estimador foram comparados com dados de operações reais de perfuração e, uma análise de Lyapunov demonstrou que o erro de estimação converge para zero, atestando a eficiência do método.

Mahdianfar et al. (2013) apresentam uma proposta semelhante a apresentada em (STAMNES et al., 2011). No entanto utiliza uma topologia não linear do filtro de Kalman

para corrigir possíveis incertezas relacionadas à geometria do poço e estimar parâmetros como: perfil de temperatura, viscosidade e fator de compressibilidade do fluido e perdas por fricção.

Em seu trabalho, Kaasa et al. (2011) desenvolvem um modelo simplificado para fins de controle MPD. Neste modelo todos os fenômenos que são mais rápidos que o tempo de resposta dos atuadores são desconsiderados, bem como os que são extremamente lentos. Outra característica do modelo proposto é o tratamento conjunto de parâmetros que são difíceis de serem distinguidos ou calibrados separadamente. Desta forma, o trabalho apresenta a derivação, a partir de um modelo complexo, de um modelo simplificado dedicado a sistemas MPD, capaz de representar adequadamente a dinâmica dominante do sistema. Os autores destacam, ainda, formas de calibrar automaticamente o modelo, inferindo os valores de parâmetros desconhecidos com base em parâmetros passíveis de medição.

Um sistema que agrega quatro técnicas distintas para estimar a pressão de fundo de poço é apresentado por Sui et al. (2011). Cada uma das quatro técnicas é baseada em um conjunto de parâmetros que podem ou não ser utilizados nas demais. O principal benefício do sistema implementado está no fato de que o mesmo parâmetro atua de formas diferentes em cada uma das técnicas e, assim ao se analisar o sistema como um todo, o resultado não fica comprometido caso o valor do referido parâmetro seja incerto. Os estimadores implementados são baseados em filtro de Kalman, redes neurais, *support vector machines* e modelagem algébrica. A mediana dos resultados estimados por cada método é tomada como o valor da pressão de fundo de poço. Os valores estimados de pressão de fundo de poço com a aplicação dos quatro métodos combinados apresentaram ganho de acurácia próximo de 30% se comparados a resultados obtidos com a aplicação da melhor das técnicas aplicada separadamente.

Em seu trabalho Zamanipour (2015) apresenta a modelagem transiente das pressões *surge* e *swab* para fins de otimização de manobras de retirada total ou parcial da coluna de perfuração para instalação ou substituição de algum equipamento, e reinserção da coluna de perfuração no poço. De acordo com a autora esse tipo de operação contribui significativamente no tempo não produtivo em um procedimento de perfuração, no entanto não se observa trabalhos extensivos na busca de otimizá-las.

2.4 MODELAGEM DE GRADIENTES DE PRESSÕES EM MANOBRAS

Os efeitos dos gradientes positivos e negativos de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração são objeto de estudo desde a década de 30. Contudo,

somente nas décadas de 50 e 60, os primeiros modelos para prever as pressões *surge* e *swab* foram propostos (WOLSKI et al., 2014).

Tais modelos baseiam-se especialmente nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento e são amparados pela adoção de diferentes hipóteses e considerações, o que, inevitavelmente, leva a resultados distintos. Em uma classificação inicial, os modelos apresentados na literatura podem ser separados em dois principais grupos: modelos dinâmicos e modelos estacionários ou de regime permanente. A partir daí outras classificações podem ser realizadas avaliando-se elementos tais quais tipo do fluido e suas propriedades consideradas, tipo de escoamento considerado, configurações e considerações relacionadas à geometria do poço, entre outros.

Muitos são os autores que defendem o trabalho de Cannon et al. (1934) como o precursor nos estudos dos gradientes de pressão gerados pela movimentação axial da coluna de perfuração e os possíveis problemas associados. Alguns anos mais tarde, Horn et al. (1950) e Goins-Jr et al. (1951) apresentam suas contribuições na análise das pressões *surge* e *swab* e os problemas de perfuração decorrentes destas. Tais estudos concluem que a incorreta manipulação da velocidade axial da coluna de perfuração pode levar a ocorrência de *kicks*, fratura da formação e perdas de circulação do fluido de perfuração.

As primeiras equações definidas descrevendo as variações de pressão resultantes da movimentação da coluna de perfuração foram propostas por Clark-Jr (1955) e são resultados de testes laboratoriais com fluido binghamiano e consideração sobre os efeitos inerciais e viscosos do escoamento.

O modelo matemático implementado por Burkhardt et al. (1961) a fim de prever as pressões *surge* e *swab* demonstra que os efeitos viscosos são mais impactantes que os inerciais na geração dos gradientes de pressão. Para Sampaio-Jr (2002) os efeitos inerciais são mais significativos em momentos onde a coluna se desloca em movimento acelerado enquanto os efeitos viscosos prevalecem quando em movimentação a velocidade constante.

Mais tarde, modelos que permitem a avaliação de novas situações foram propostos. Fontenot et al. (1974) inserem a possibilidade de mudança das propriedades do fluido de perfuração ao longo do tempo e da profundidade do poço, enquanto Bourgoyne et al. (1986) contempla uma situação em que a porção inferior da coluna de perfuração é tomada como aberta e em que o escoamento pode acontecer tanto no anular quanto no interior da coluna durante as manobras.

Modelos para poços inclinados e colunas de perfuração posicionadas de forma excêntrica com relação ao poço são apresentados por Bing et al. (1995), Yang e Chukwu

(1995) e demonstram que os gradientes de pressão são menores nessas situações. Srivastav et al. (2012) demonstram que a excentricidade pode significar reduções de até 40% nas pressões *surge* e *swab* observadas.

Um dos primeiros modelos dinâmicos para representação de pressões *surge/swab* foi implementado e apresentado por Lubinski et al. (1977) e demonstrou que a consideração de regime permanente em manobras não é viável tendo em vista as características compressíveis dos fluidos de perfuração e as propriedades elásticas tanto da coluna de perfuração quanto da formação.

O modelo dinâmico apresentado por Lal et al. (1983) permitiu a análise dos gradientes de pressão ao longo do tempo e a máxima velocidade axial da coluna de perfuração para diversas configurações de profundidade de poço e margem operacional de pressão. As informações de pressão e de vazão são obtidas, para cada instante de tempo e para cada posição axial, através da solução, pelo método das características e diferenças finitas (WYLIE et al., 1993), das equações de conservação de massa e quantidade de movimento.

Mitchell (1988) inovou a modelagem de pressões *surge/swab* considerando a variação das propriedades do fluido de perfuração em função da temperatura e pressão. Inseriu, ainda, no seu modelo dinâmico, as características elásticas da formação, do cimento e da coluna de perfuração. Seu modelo foi testado com dados reais por Wagner et al. (1993) e Samuel et al. (2003) demonstrando sua eficácia e boa representatividade.

Um modelo dinâmico para a predição das pressões *surge* e *swab* em poços horizontais é apresentado por Jorge e Santos (1995). O modelo prevê escoamento bifásico gás-líquido e possibilita a simulação de revestimento do poço. Os autores atestam a importância de um bom modelo reológico e destacam o quanto as propriedades do fluido impactam no comportamento das pressões no interior do poço.

A compressibilidade do fluido bem como as propriedades elásticas da coluna de perfuração e do poço são contemplados no trabalho de Bing e Kaiji (1996). Os resultados demonstram que comportamentos não verificados em modelos estacionários são evidenciados através de uma modelagem dinâmica, reafirmando a importância de uma análise transitória da operação.

Mais recentemente, Samuel (2010) destaca a importância do fator de atrito e sua relação com a movimentação da coluna de perfuração, enquanto Tarasevich et al. (2015) analisam os efeitos da aceleração da coluna de perfuração. Gjerstad et al. (2013a, 2013b), por sua vez, apresentam um modelo simplificado capaz de prever os gradientes de pressão resultantes de manobras com calibração em tempo real a partir dos dados de operação

medidos através de telemetria de pulso de fluido de perfuração, por exemplo.

Em seu trabalho, Oliveira (2011) modela a transmissão de pressão no interior da coluna de perfuração e ao longo do espaço anular em decorrência da movimentação axial e do reinício da circulação de fluidos newtonianos ou não newtonianos não gelificados. O modelo desenvolvido é baseado nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento resolvidas através do método das características. Os resultados obtidos são comparados a dados reais e validam o modelo proposto.

Finalmente, Zamanipour (2015) apresenta um modelo dinâmico para o cálculo das pressões *surge* e *swab*. Tal modelo utiliza-se da solução pelo método das características e contempla a modelagem dos efeitos elásticos da coluna de perfuração e das paredes do poço, possibilitando, ainda, a simulação de revestimentos. Os resultados obtidos através do modelo dinâmico são comparados a resultados de modelos estáticos para diferentes configurações de geometria de poço.

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO 2

No presente capítulo apresentou-se a base teórica referente a problemas de otimização, suas definições, classificações e formulações matemáticas. Os esforços recentemente realizados no intuito de modelagem e otimização de processos industriais, especificamente os relacionados à indústria petrolífera, são também abordados.

Verificou-se a aplicação, na indústria de petróleo e gás, de sistemas de controle avançado, onde aplicam-se técnicas de controle baseadas em modelos algébricos, a fim de não somente suprir necessidades técnicas mas também otimizar os resultados de forma a trabalhar nos limites operacionais minimizando os custos.

Por fim destaca-se que são muitas as soluções que têm sido apresentadas no sentido de modelar os gradientes de pressão resultantes de manobras. No entanto, poucos são os trabalhos destinados a otimização da movimentação axial da coluna de perfuração durante tais procedimentos, embora o tempo gasto neste tipo de operação represente uma grande parcela do tempo não produtivo na perfuração de poços.

O próximo capítulo apresentará a modelagem dos gradientes de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração, o qual servirá como base para o modelo de otimização de manobras desenvolvido neste trabalho.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Este capítulo apresenta um modelo matemático representativo do comportamento fluido-dinâmico resultante de um procedimento de manobra em um sistema de perfuração. Tal modelo, baseado nas equações de conservação de massa e da quantidade de movimento, é capaz de prever, através de solução pelo método das características e diferenças finitas, os gradientes de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração.

A seguir será realizada uma formulação do problema, suas equações governantes serão apresentadas e o método de solução descrito. Em seguida, o modo de implementação é apresentado, assim como resultados de simulação e análises de efeitos dos parâmetros que compõem o modelo.

3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Durante um procedimento de perfuração muitos são os eventos que exigem a realização de manobras. Nestas situações, a coluna de perfuração deve ser total ou parcialmente retirada do interior do poço e, posteriormente, recolocada no interior do mesmo. No decorrer de uma manobra, o nível de fluido no interior do poço é mantido constante de forma que a componente de pressão hidrostática seja constante. Desta forma, o gradiente de pressão resultante da movimentação da coluna de perfuração deve ser tal que os limites da janela operacional não sejam extrapolados.

Embora um procedimento real de perfuração seja realizado em seções de diferentes diâmetros, neste trabalho as geometrias, tanto da coluna de perfuração quanto do poço, serão consideradas constantes. A seção de teste, ilustrada na Figura 2, será composta por uma tubulação de diâmetro D_1 , representando a coluna de perfuração, conectada a um espaço anular concêntrico com diâmetro interno $D_{2,i}$ e diâmetro externo $D_{2,e}$. Tanto a coluna de perfuração quanto o espaço anular têm comprimento L , de forma que o domínio total do problema apresenta comprimento total $2L$. A Figura 2a apresenta a vista longitudinal do domínio bem como as coordenadas axial, radial e angular, representadas

por z , r e θ , respectivamente. A Figura 2b apresenta o corte transversal do poço com destaque para os diâmetros da geometria.

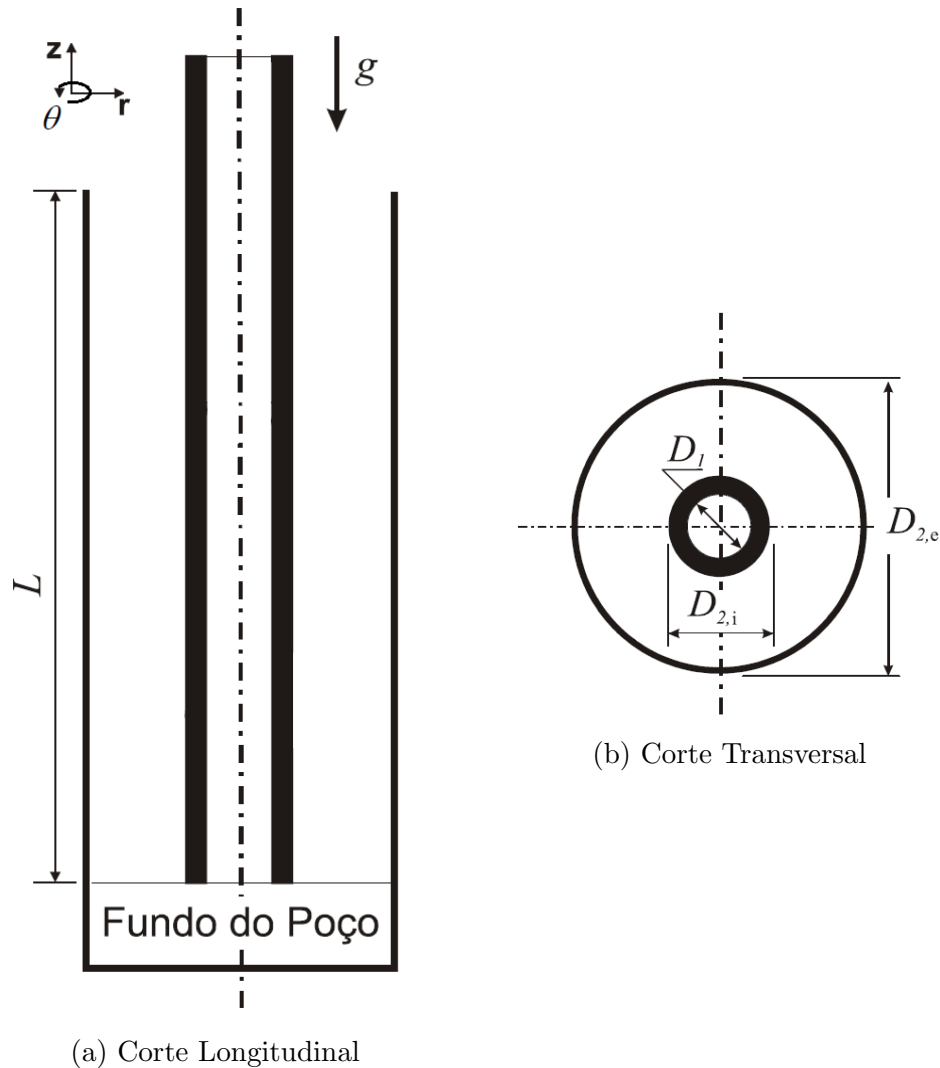


Figura 2: Representação da geometria do domínio definido

Fonte: Adaptado de Oliveira (2011)

Neste trabalho o fluido de teste será considerado newtoniano, de alta viscosidade e fracamente compressível. Como hipótese simplificadora, o escoamento será considerado unidimensional, laminar e isotérmico. Não será 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 ao longo do domínio do problema. A tensão de cisalhamento, que varia linearmente ao longo do raio, é calculada utilizando a abordagem de fator de atrito nas paredes da coluna de perfuração e do espaço anular.

3.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES DO PROBLEMA

3.2.1 EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DE MASSA

Adotando-se coordenadas cilíndricas, a equação diferencial de conservação de massa pode ser escrita como na Equação 40 (WHITE, 2010):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (40)$$

em que ρ é a massa específica do fluido e v_i são as componentes da velocidades de escoamento em cada uma das direções definidas pelo conjunto de coordenadas apresentado na Figura 2a.

Considerando o escoamento unidimensional na direção axial, as componentes normais (r , θ) à linha do principal de escoamento (z) serão desconsideradas e a equação da conservação de massa pode ser escrita como na Equação 41:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V)}{\partial z} = 0 \quad (41)$$

em que V é a velocidade de escoamento ao longo da área da seção transversal (A_s) do volume de controle. O índice s refere-se à região em análise, podendo assumir os valores 1 e 2 para representar a área interna da coluna ou a área do espaço anular, respectivamente.

Desconsiderando a variação da massa específica ao longo da direção axial e assumindo que esta responde a variações da pressão de acordo com $\partial \rho / \partial P = \rho \alpha$ (ANDERSON, 1990), pode-se chegar a uma relação entre velocidade de escoamento e pressão, tal qual apresentado na Equação 42 (OLIVEIRA, 2011):

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (42)$$

ou em termos da vazão volumétrica Q :

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{\alpha A_s} \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (43)$$

em que P é o valor médio de pressão ao longo da área A_s .

A_s representa a área da seção transversal da região na qual se aplica o conceito de conservação de massa e, desta forma, pode assumir o valor da área da seção transversal da coluna de perfuração ou do espaço anular.

3.2.2 EQUAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A aplicação de um balanço de quantidade de movimento a um volume de controle, com área de seção A_s , considerando-se escoamento unidimensional em z , com difusão axial desprezível e simetria angular resulta em (OLIVEIRA, 2011):

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho VV)}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{4}{D_h} \tau_w + \rho g = 0 \quad (44)$$

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 e o valor médio da tensão limite de cisalhamento na paredes da coluna ou do espaço anular é, por sua vez, representado por τ_w e calculada através do conceito de fator de atrito (ROHSENOW et al., 1985), tal qual na Equação 45:

$$\tau_w = \frac{f \rho V |V|}{2} \quad (45)$$

em que f é o fator de atrito de Fanning e depende da geometria, regime de escoamento e das propriedades do fluido em escoamento.

De acordo com Oliveira (2011), para fluidos de baixa compressibilidade, os efeitos do termo $\partial(\rho VV)/\partial z$ são muito pequenos e, a fim de simplificar a equação, podem ser negligenciados. Desta forma a Equação 44 pode ser reescrita como na Equação 46:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{2f \rho V |V|}{D_h} + \rho g = 0 \quad (46)$$

ou em termos da vazão volumétrica:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{A_s} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2f Q |Q|}{A_s^2 D_h} + g = 0 \quad (47)$$

3.3 SOLUÇÃO PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Através do método das características, equações diferenciais parciais, que não possuem uma solução geral, são convertidas em equações diferenciais totais, para que, submetidas a integração pelo método das diferenças finitas, possam ser resolvidas (WYLIE; STREETER, 1978).

As equações de conservação de massa e da quantidade de movimento, apresen-

tadas nas Equações 42 e 46, respectivamente, formam um par de equações diferenciais parciais hiperbólicas não lineares, cujas incógnitas são a velocidade média de escoamento V , e a pressão P , e as variáveis independentes são a posição axial z e o tempo t (WYLIE; STREETER, 1978).

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{2fV|V|}{D_h} + g = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (48)$$

Este par de equações pode ser combinado linearmente multiplicando-se a segunda delas por λ e somando com a primeira, tal qual na Equação 49:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{2fV|V|}{D_h} + g + \lambda \left[\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial V}{\partial z} \right] = 0 \quad (49)$$

Rearranjando:

$$\left[\frac{\lambda}{\alpha} \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial t} \right] + \lambda \left[\frac{1}{\rho\lambda} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial t} \right] + \frac{2fV|V|}{D_h} + g = 0 \quad (50)$$

Sabendo-se que $V = V(z, t)$ e $P = P(z, t)$, pode-se escrever as derivadas totais como nas Equações 51 e 52:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (51)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (52)$$

Comparando os termos da Equação 50 com as Equações 51 e 52, tomando $\alpha = 1/\rho c^2$, em que c é a velocidade de propagação da onda de pressão no fluido (ANDERSON, 1990), pode-se definir um valor para o multiplicador λ e reescrever a Equação 50 como na Equação 54:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\lambda}{\alpha} = \frac{1}{\rho\lambda} \Rightarrow \lambda^2 = \frac{\alpha}{\rho} = \frac{1}{\rho^2 c^2} \Rightarrow \lambda = \pm \frac{1}{\rho c} \quad (53)$$

$$\frac{dV}{dt} + \lambda \frac{dP}{dt} + \frac{2fV|V|}{D_h} + g = 0 \quad (54)$$

Da Equação 53 pode-se, ainda, definir a relação entre a velocidade de propagação da onda de pressão e a variação de sua posição com o tempo:

$$\frac{dz}{dt} = \pm c; \quad (55)$$

A substituição de λ na Equação 54 resulta em dois pares de equações diferenciais totais com duas restrições:

$$C^+ : \begin{cases} \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho c} \frac{dP}{dt} + \frac{2fV|V|}{D_h} + g = 0 \\ \frac{dz}{dt} = c \end{cases} \quad (56)$$

$$C^- : \begin{cases} \frac{dV}{dt} - \frac{1}{\rho c} \frac{dP}{dt} + \frac{2fV|V|}{D_h} + g = 0 \\ \frac{dz}{dt} = -c \end{cases} \quad (57)$$

É conveniente representar o problema em um formato espaço temporal, ilustrado na Figura 3, em que o comprimento total L 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, $\Delta t = \Delta z/c$. Destaca-se que o cálculo da pressão e da velocidade média de escoamento é realizado, para uma mesma posição axial, a cada $2\Delta t$.

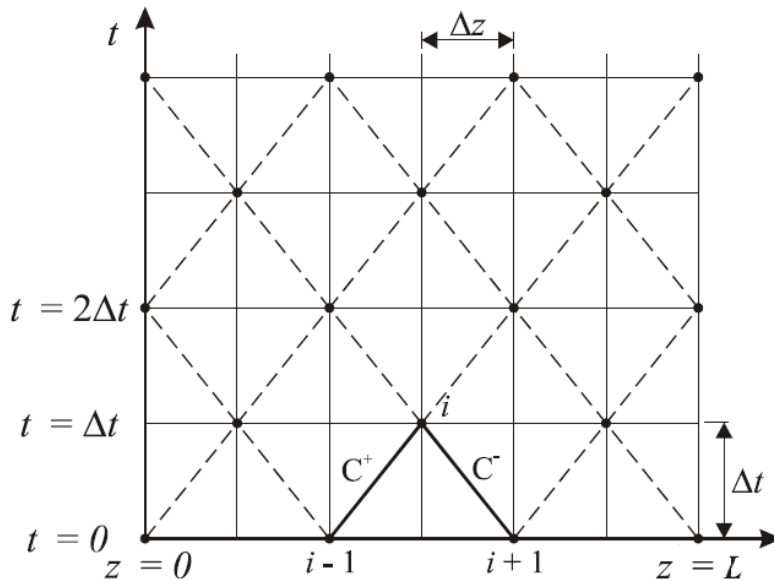


Figura 3: Malha espaço temporal para solução pelo método das características

Fonte: Adaptado de Oliveira (2011)

Os segmentos compreendidos entre os pontos $i-1$, i e $i+1$ são representados pelas retas característica C^+ e C^- e, das Equações 56 e 57, tem-se:

$$\frac{dV}{dt} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{dP}{dt} + \frac{2fV|V|}{D_h} + g = 0 \quad (58)$$

ou,

$$\rho c \frac{dV}{dt} \pm \frac{dP}{dt} + \frac{2\rho c f V |V|}{D_h} + \rho c g = 0 \quad (59)$$

Multiplicando a Equação 59 por dt/dz tem-se:

$$\rho c \frac{dV}{dt} \frac{dt}{dz} \pm \frac{dP}{dt} \frac{dt}{dz} + \frac{2\rho c f V |V|}{D_h} \frac{dt}{dz} + \rho c g \frac{dt}{dz} = 0 \quad (60)$$

ou, ainda,

$$\rho c \frac{dV}{dz} \pm \frac{dP}{dz} + \frac{2\rho c f V |V|}{D_h} \frac{dt}{dz} + \rho c g \frac{dt}{dz} = 0 \quad (61)$$

Para a linha C^+ , $dt/dz = 1/c$. Assim:

$$\rho c \frac{dV}{dz} + \frac{dP}{dz} + \frac{2\rho f V |V|}{D_h} + \rho g = 0 \quad (62)$$

Integrando a Equação 62 em z de z_{i-1} até z_i tem-se:

$$\rho c \int_{V_{i-1}}^{V_i} \frac{dV}{dz} dz + \int_{P_{i-1}}^{P_i} \frac{dP}{dz} dz + \frac{2\rho f}{D_h} \int_{z_{i-1}}^{z_i} V |V| dz + \rho g \int_{z_{i-1}}^{z_i} dz = 0 \quad (63)$$

$$\rho c (V_i - V_{i-1}) + (P_i - P_{i-1}) + \frac{2\rho f}{D_h} (z_i - z_{i-1}) V_i |V_{i-1}| + \rho g (z_i - z_{i-1}) = 0 \quad (64)$$

De forma análoga, para a curva C^- , com $dt/dz = -1/c$, tem-se:

$$\rho c \frac{dV}{dz} - \frac{dP}{dz} - \frac{2\rho f V |V|}{D_h} - \rho g = 0 \quad (65)$$

$$\rho c \int_{V_i}^{V_{i+1}} \frac{dV}{dz} dz - \int_{P_i}^{P_{i+1}} \frac{dP}{dz} dz - \frac{2\rho f}{D_h} \int_{z_i}^{z_{i+1}} V |V| dz - \rho g \int_{z_i}^{z_{i+1}} dz = 0 \quad (66)$$

$$\rho c (V_{i+1} - V_i) - (P_{i+1} - P_i) - \frac{2\rho f \Delta z}{D_h} (z_{i+1} - z_i) V_i |V_{i+1}| - \rho g (z_{i+1} - z_i) = 0 \quad (67)$$

Resolvendo as Equações 64 e 67 para P_i chega-se às Equações 68 e 69:

$$C^+ : \quad P_i = P_{i-1} - \rho c (V_i - V_{i-1}) - \frac{2\rho f \Delta z}{D_h} V_i |V_{i-1}| - \rho g \Delta z \quad (68)$$

$$C^- : \quad P_i = P_{i+1} + \rho c (V_i - V_{i+1}) + \frac{2\rho f \Delta z}{D_h} V_i |V_{i+1}| + \rho g \Delta z \quad (69)$$

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

Destaca-se que para situações em que a coluna de perfuração está em movimento, a velocidade de escoamento do fluido difere da sua velocidade média devido ao efeito de arrasto do fluido. A velocidade eficaz de escoamento (V_{ef}) pode ser definida como (BOURGOYNE et al., 1986):

$$V_{ef} = V + F_{ve} V_{ax} \quad (70)$$

em que V_{ax} é a velocidade de deslocamento da coluna de perfuração e F_{ve} é o fator de aderência do fluido na geometria em análise. Para o caso de escoamento pelo interior da coluna de perfuração o fator de aderência tem valor unitário, já para escoamento no espaço anular este é dado pela Equação 71:

$$F_{ve} = - \left(\frac{1}{2 \ln(\varepsilon)} + \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2} \right) ; \quad \varepsilon = \frac{D_{2,i}}{D_{2,e}} \quad (71)$$

Levando-se em consideração este efeito, as Equações 68 e 69 são reescritas como nas Equações 72 e 73:

$$C^+ : \quad P_i = F^+ - \rho c V_i - R_s V_{ef} |i| \quad (72)$$

$$C^- : \quad P_i = F^- + \rho c V_i + R_s V_{ef} |i| \quad (73)$$

com:

$$F^+ = P_{i-1} + \rho c V_{i-1} - \rho g \Delta z - R_s V_{ef} |i-1| \quad (74)$$

$$F^- = P_{i+1} - \rho c V_{i+1} + \rho g \Delta z + R_s V_{ef}|_{i+1} \quad (75)$$

em que R_s é o coeficiente de resistência da tubulação, definido como na Equação 76:

$$R_s = \frac{2\rho f \Delta z}{D_h} V \quad (76)$$

Para a coluna de perfuração, o fator de atrito de Fanning é dado por $f = 16/Re$, em que $Re = \rho V D_h / \mu$ é o número de Reynolds. Desta forma, o coeficiente de resistência para a coluna de perfuração é dada por:

$$R_1 = \frac{32\mu \Delta z}{D_1^2} \quad (77)$$

Já para o coeficiente de resistência do espaço anular, o termo de correção ζ se faz necessário (FONTENOT et al., 1974):

$$R_2 = \frac{32\mu \Delta z}{(D_{2,e} - D_{2,i})^2} \zeta \quad (78)$$

onde:

$$\zeta = \frac{(D_{2,e} - D_{2,i})^2}{D_{2,e}^2 + D_{2,i}^2 - \frac{D_{2,e}^2 - D_{2,i}^2}{\ln\left(\frac{D_{2,e}}{D_{2,i}}\right)}} \quad (79)$$

Subtraindo-se a Equação 72 da Equação 73 é possível definir a equação algébrica para o cálculo da velocidade de escoamento V_i :

$$V_i = \frac{F^+ - F^- - 2R_s F_{ve} V_{ax}}{2(\rho c + R_s)} \quad (80)$$

Já a pressão para esta mesma posição i é definida através da soma das Equações 72 e 73, e pode ser escrita como:

$$P_i = \frac{F^+ + F^-}{2} \quad (81)$$

Observa-se, na Figura 3, que para cálculos nas extremidades esquerda e direita da malha, apenas a reta C^- ou C^+ está disponível. Desta forma são necessárias mais duas equações que relacionem os valores de pressão e velocidade de escoamento nos pontos

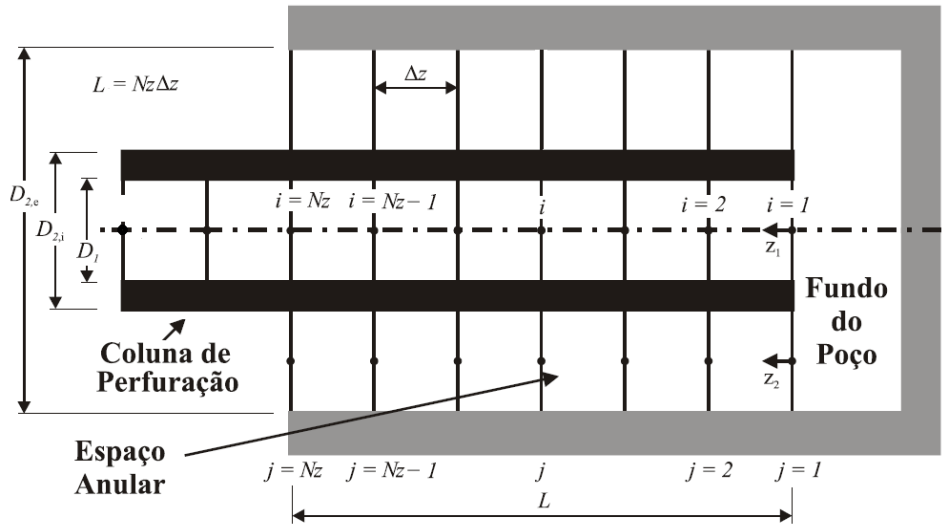


Figura 4: Representação do domínio do problema dividido em duas malhas: coluna de perfuração e espaço anular.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2011)

localizados nestas fronteiras para que os cálculos nestes pontos possam ser computados. Estas equações são obtidas através das condições de contorno do problema. A seção a seguir apresentará as condições de contorno na entrada da coluna de perfuração, na região de transição entre a coluna e o espaço anular, e as condições na saída do anular.

3.3.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para o sistema de perfuração implementado neste trabalho, considera-se que o fluxo segue em único sentido na extremidade inferior da coluna de perfuração, de forma que o fluido localizado no espaço anular não adentra a coluna de perfuração.

A Figura 4 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 $i = j = Nz$ e para a região de acoplamento, em que $i = j = 1$.

Uma manobra é dividida em duas operações distintas: retirada da coluna de perfuração e inserção da coluna de perfuração. Para cada uma das operações as condições de contorno são diferentes. Para a retirada da coluna de perfuração destaca-se que o fluxo de fluido do interior da coluna de perfuração para o espaço anular é permitido de

forma que as condições de contorno na superfície se resumem à pressão atmosférica. Para a mesma operação, a transição da coluna de perfuração para o espaço anular é tomada como uma simples mudança da área da seção transversal através da qual o escoamento ocorre. Já para a recolocação da coluna de perfuração ao interior do poço, uma válvula impede o fluxo de fluido para o interior da coluna de perfuração de forma que o domínio do problema é representado apenas pelo espaço anular. Para esta situação a condição de contorno de superfície continua sendo a pressão atmosférica e, a condição de fundo do poço, por sua vez, passa a ser uma vazão variante no tempo em função da velocidade axial da coluna de perfuração.

Observa-se, assim, a necessidade de equacionamento das situações em que a pressão é conhecida na superfície, em que a vazão é conhecida na extremidade inferior do espaço anular e, por fim, em situações onde existe a transição entre regiões com diferentes áreas de seção transversal.

3.3.1.1 PRESSÃO CONHECIDA NA SUPERFÍCIE

Para situações em que a pressão é conhecida nas seções superiores da coluna de perfuração ou do espaço anular tem-se:

$$P_{i=N_z} = P_{j=N_z} = P_{atm} \quad (82)$$

Da reta C^+ , Equação 72, pode-se calcular a velocidade de escoamento na entrada da coluna e saída do anular como nas Equações 83 e 84, respectivamente:

$$C^+ : \quad V_{i=N_z} = \frac{F_1^+ - P_{i=N_z} - R_1 V_{ax}}{\rho c + R_1} \quad (83)$$

$$C^+ : \quad V_{j=N_z} = \frac{F_2^+ - P_{j=N_z} - R_2 F_{ve} V_{ax}}{\rho c + R_2} \quad (84)$$

3.3.1.2 VAZÃO CONHECIDA NA EXTREMIDADE INFERIOR DO ANULAR

Quando a inserção da coluna de perfuração está sendo executada, a válvula instalada na extremidade inferior da coluna de perfuração impede o fluxo de fluido para o interior da mesma. Assim diz-se que a operação se dá com a coluna fechada e promove um deslocamento de fluido proporcional a área da seção transversal da coluna e função da velocidade axial, tal qual apresentado na Equação 85:

$$Q_{j=1} = \frac{\pi D_{2,i}^2}{4} V_{ax} \quad (85)$$

A velocidade média de escoamento em $j = 1$ é, desta forma:

$$V_{j=1} = \frac{Q_{j=1}}{A_2} \quad (86)$$

Da reta C^- , Equação 73, pode-se calcular a pressão na extremidade inferior do espaço anular tal qual na Equação 87:

$$C^- : \quad P_{j=1} = F_2^- + \rho c V_{j=1} + R_2 (V_{j=1} + F_{ve} V_{ax}) \quad (87)$$

3.3.1.3 REGIÃO DE ACOPLAMENTO ENTRE COLUNA E ESPAÇO ANULAR

Na região de transição da coluna de perfuração para o espaço anular desconsidera-se, neste trabalho, a existência de uma broca. Assim sendo define-se que a pressão nesta região não sofre alterações no momento da transição de um domínio para outro, de forma que:

$$P_{i=1} = P_{j=1} \quad (88)$$

A velocidade com que o fluido escoo nas duas regiões é diferente em função da diferença entre as áreas da seção transversal de cada referida região. As Equações 89 e 90 definem as velocidades de escoamento na saída da coluna de perfuração ($V_{i=1}$) e na entrada do espaço anular ($V_{j=1}$), respectivamente:

$$V_{i=1} = \frac{1}{A_1} \left[\frac{F_2^- - F_1^- + R_2 (F_{ve} V_{ax} + \Psi) - R_1 V_{ax} + \rho c \Psi}{\rho c \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) + \frac{R_1}{A_1} + \frac{R_2}{A_2}} \right] \quad (89)$$

$$V_{j=1} = \Psi - \frac{A_1}{A_2} V_{i=1} \quad (90)$$

em que Ψ é conhecido como termo fonte. A Equação 91 evidencia a quantidade volume de fluido deslocado como resultado da movimentação da coluna de perfuração:

$$\Psi = \frac{D_{2,i}^2 - D_1^2}{D_{2,e}^2 - D_{2,i}^2} V_{ax} \quad (91)$$

A Equação 92 apresenta a combinação algébrica para o cálculo da pressão na extremidade inferior do espaço anular:

$$P_{j=1} = \frac{F_1^- + F_2^- + \rho c (V_{i=1} + V_{j=1}) + R_1 (V_{i=1} + V_{ax}) + R_2 (V_{j=1} + F_{ve} V_{ax})}{2} \quad (92)$$

3.4 IMPLEMENTAÇÃO

O modelo matemático formulado nas seções anteriores foi implementado no *software* Matlab[®] a fim de se resolver os campos de pressão e velocidade média de escoamento ao longo do domínio do problema (índices i e j). Para cada instante de tempo (índice k), os cálculos são realizados de acordo com o seguinte procedimento:

1. Primeiramente são definidas as informações referentes à geometria, comprimento e diâmetros do poço e da coluna de perfuração, à reologia do fluido, viscosidade, massa específica, velocidade de propagação, bem como às condições operacionais. Dentre outros parâmetros, é nesta etapa que o usuário informa o número NZ de volumes de controle que irão compor as malhas espaço-temporais;
2. Posteriormente são inicializadas as variáveis do modelo matemático, realizada a locação de memória para os dados de saída. Nesta etapa é calculado o passo de tempo Δt e o número NT de passos a serem executados;
3. Cálculo dos campos de pressão e velocidade média de escoamento:
 - Caso a operação se trate de uma retirada da coluna de perfuração, calcula-se os valores de pressão e velocidade de escoamento para o interior da coluna de perfuração ($i = 2$ até $i = NZ - 1$) e do espaço anular ($j = 2$ até $j = NZ - 1$). Em seguida, com base nas condições de contorno, são calculados os valores de pressão e velocidade média de escoamento para as extremidades superiores ($i = j = NZ$) e inferiores ($i = j = 1$) dos mesmos.
 - Caso a operação se trate de uma inserção da coluna de perfuração, calcula-se os valores de pressão e velocidade de escoamento para o interior do espaço anular. Em seguida, com base nas condições de contorno, são calculados os valores de pressão e velocidade média de escoamento para as extremidades superior e inferior do mesmo.

Destaca-se que ora o início dos cálculos é realizado na posição 2, ora na posição 3. Isso se dá de maneira intercalada respeitando os pontos ilustrados na malha espaço-temporal apresentada na Figura 3. Dessa forma, observa-se que os cálculos são realizados para a mesma posição axial somente a cada $2\Delta t$;

4. Os campos de pressão e velocidade média de escoamento são gravados;
5. Verifica-se se o tempo máximo de execução foi atingido. Em caso positivo a simulação é concluída e em caso contrário a solução é novamente computada a partir do passo 3.

A Figura 5 apresenta o fluxograma representativo ao procedimento de cálculo.

3.5 SIMULAÇÃO DE MANOBRAS

Após a implementação do modelo matemático, simulou-se manobras de retirada e inserção da coluna de perfuração do poço bem como sua inserção no mesmo. Para tanto configurou-se um poço com $3km$ de profundidade e diâmetro de $25,4cm$. A coluna de perfuração foi definida como tendo $3km$ de comprimento, diâmetros interno de $12,7cm$ e externo de $15cm$. A viscosidade do fluido de perfuração foi definida como $0.05Pa \cdot s$ e a massa específica como $1000kg/m^3$. A velocidade de propagação da onda de pressão foi configurada para $1450m/s$.

Definiu-se um tempo de movimentação axial de 30 segundos, partindo-se do repouso e seguindo-se dois diferentes perfis de velocidade: parabólico e trapezoidal. O deslocamento total foi definido como sendo 27 metros.

A seguir são apresentados os resultados obtidos através de simulações em que a componente hidrostática de pressão é desconsiderada e apenas o gradiente de pressão resultante da movimentação da coluna de perfuração é analisado.

3.5.1 RETIRADA DA COLUNA DE PERFURAÇÃO

Para a simulação de um procedimento de retirada da coluna de perfuração do interior do poço configurou-se a velocidade axial como funções de formato parabólico e trapezoidal. Tais perfis podem ser observados na Figura 6a. A aceleração da coluna de perfuração e o deslocamento axial da mesma ao longo do tempo são apresentados nas Figuras 6b e 6c, respectivamente. A variação de pressão resultante da movimentação da coluna de perfuração é apresentado na Figura 7.

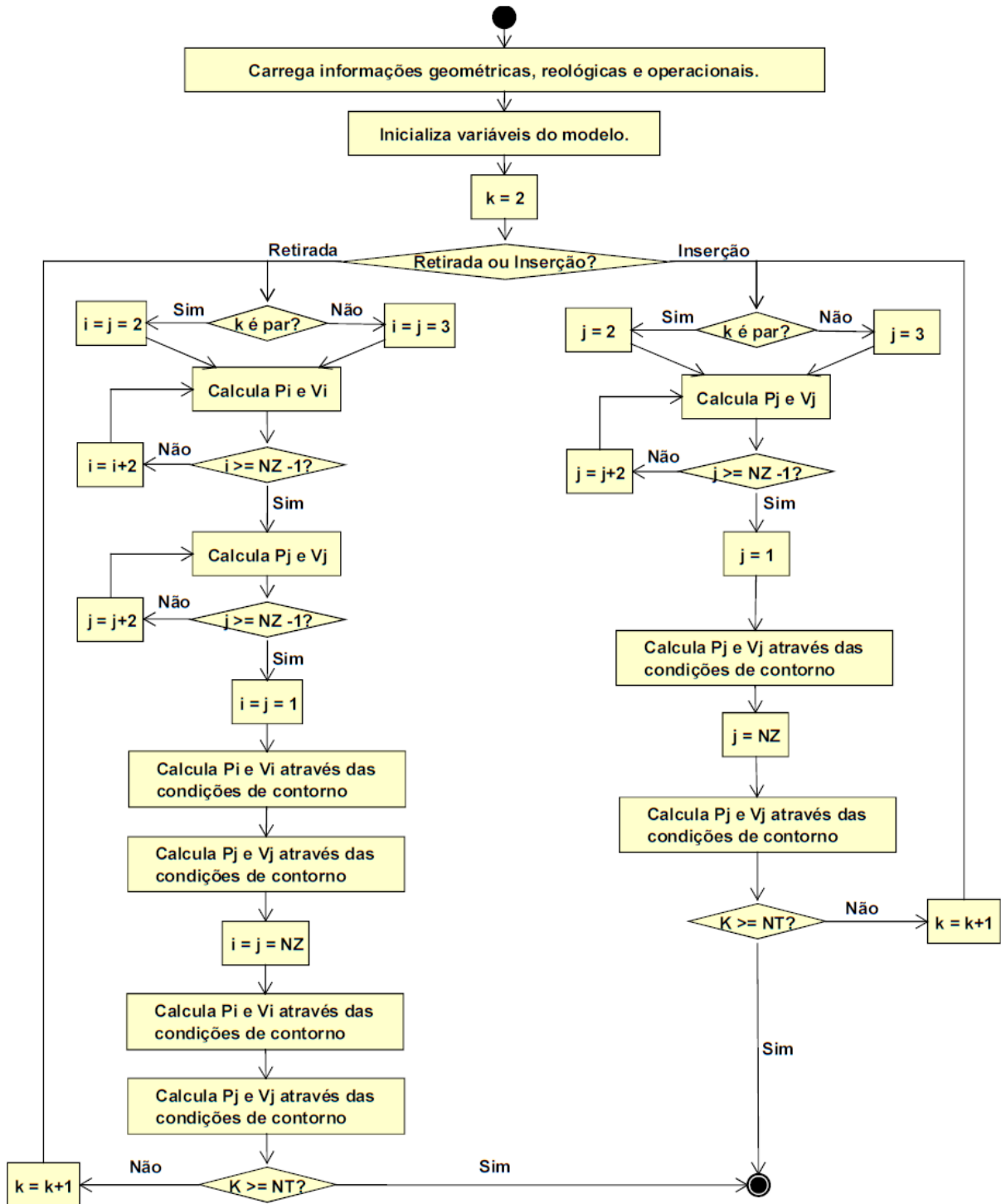


Figura 5: Fluxograma do procedimento de cálculo dos campos de pressão e velocidade média de escoamento pelo método das características e diferenças finitas.

Nota-se, na Figura 6, que, para um mesmo tempo total de operação e um mesmo deslocamento axial, os valores máximos de velocidade e aceleração diferem de acordo com o perfil de velocidade analisado. Para o perfil de velocidade parabólico, a velocidade atinge o valor máximo, em módulo, de $1,35m/s$, enquanto esse valor chega a $1,08m/s$ quando o perfil é trapezoidal. Já o valor máximo de aceleração assume os valores $0,18m/s^2$ e

$0,216m/s^2$ para os perfis parabólico e trapezoidal, respectivamente.

Analisando as curvas de variação de pressão, apresentadas na Figura 7, observa-se que a utilização dos diferentes perfis de velocidade axial da coluna de perfuração resultam em respostas de pressão também diferentes. Embora o perfil de velocidade parabólico atinja uma maior velocidade de pico, seu comportamento mais suave em termos de taxa de aceleração torna a resposta de pressão menos oscilante. Com perfil trapezoidal a velocidade de pico é atingida em menor tempo a custo de uma curva de aceleração com transições abruptas. Variações agressivas nas taxas de aceleração provocam grandes gradientes de pressão e promovem características mais oscilantes. Observa-se que enquanto a coluna se movimenta sem aceleração a pressão tende a um valor de regime. O mesmo acontece após a velocidade da coluna de perfuração retornar a zero.

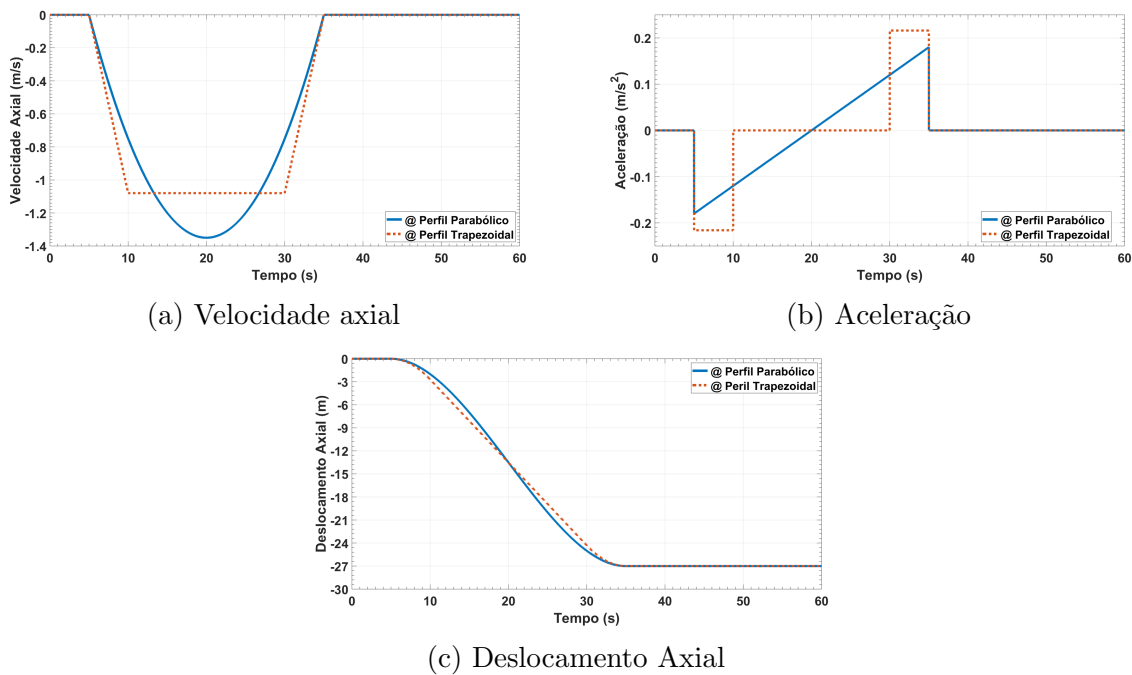


Figura 6: Simulação de retirada da coluna de perfuração com perfis parabólico e trapezoidal de velocidade axial. Curvas de (a) velocidade axial, (b) aceleração e (c) deslocamento axial da coluna de perfuração ao longo do tempo.

3.5.2 INSERÇÃO DA COLUNA DE PERFURAÇÃO

Os perfis de velocidade configurados para a simulação de um procedimento de inserção da coluna de perfuração ao interior do poço podem ser observados na Figura 8a. A aceleração da coluna de perfuração e o deslocamento axial da mesma ao longo do tempo são apresentados nas Figuras 8b e 8c, respectivamente. O gradiente de pressão resultante da movimentação da coluna de perfuração é apresentado na Figura 9.

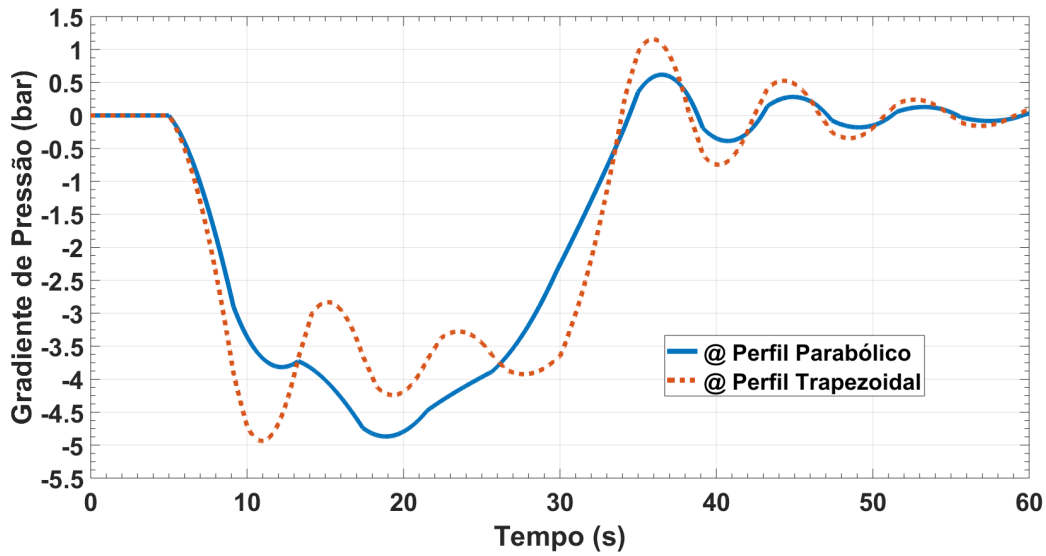


Figura 7: Gradiente de pressão resultante de uma manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis parabólico e trapezoidal de velocidade axial.

Assim como na simulação de uma retirada da coluna de perfuração, na inserção os valores máximos de velocidade e aceleração também diferem, resultando em resposta de pressão também diferentes.

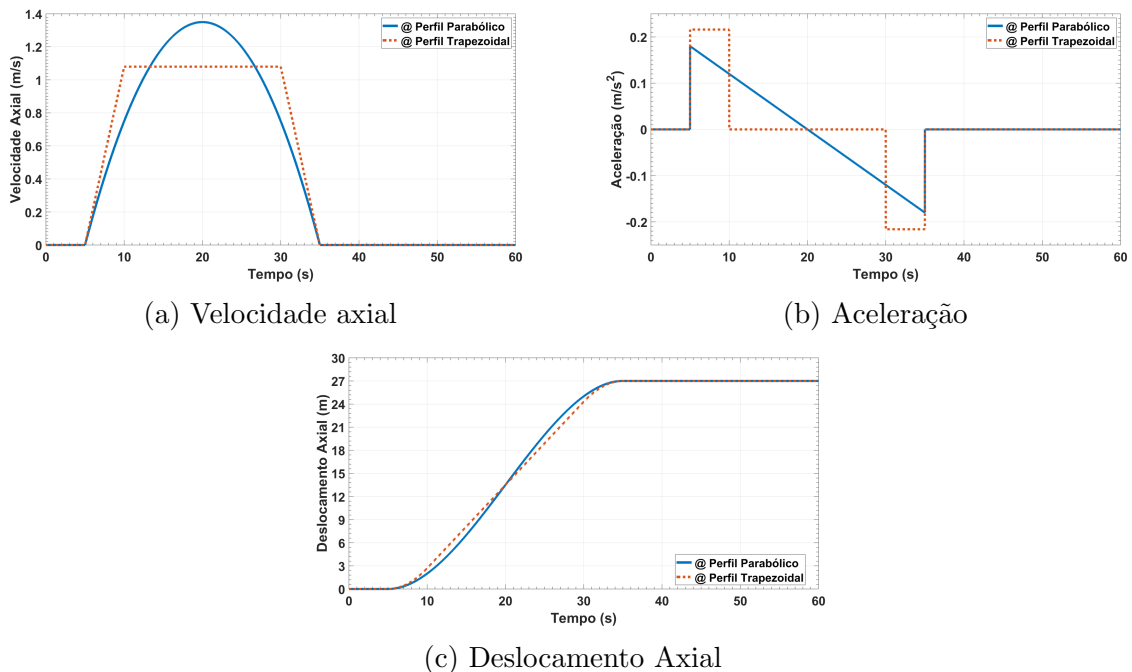


Figura 8: Simulação de inserção da coluna de perfuração com perfis parabólico e trapezoidal de velocidade axial. Curvas de (a) velocidade axial, (b) aceleração e (c) deslocamento axial da coluna de perfuração ao longo do tempo.

Nas seções a seguir são apresentadas avaliações dos efeitos dos valores de velocidade e aceleração nos gradientes de pressão experimentados. Efeitos de alterações em

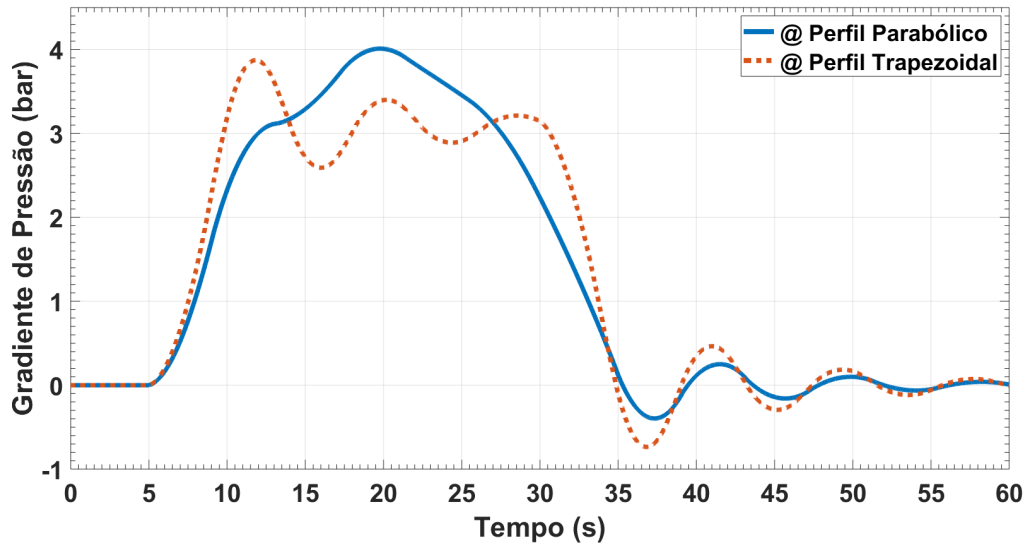


Figura 9: Gradiente de pressão resultante de uma manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis parabólico e trapezoidal de velocidade axial.

parâmetros geométricos e reológicos são também analisados.

3.5.3 EFEITOS DA VELOCIDADE DE PICO

A fim de verificar o efeito da máxima velocidade atingida pela coluna de perfuração realizaram-se simulações de movimentação da mesma mantendo-se as mesmas características em termos de aceleração e diferentes valores de picos de velocidade.

Os perfis de velocidade e aceleração utilizados são apresentados na Figura 10. Configurou-se a aceleração com valor de $0.5m/s^2$ e os valores máximos de velocidade como 0.5, 1.0 e $1.5m/s$. Desta forma realizaram-se deslocamentos em movimento acelerado com durações de 1, 2 e 3 segundos, respectivamente. Os resultados das simulações podem ser observados na Figura 11.

Tomando-se a curva em que a velocidade de pico (V_p) foi configurada para $0.5m/s$ como ponto de partida da análise, pode-se observar que ocorreram incrementos sucessivos de 100% em termos de velocidade máxima. Tais mudanças na velocidade máxima resultaram em alterações na resposta de pressão que são analisadas a seguir.

Nota-se, na Figura 11, que enquanto a coluna se desloca em movimento acelerado a taxa de variação da pressão de fundo de poço apresenta-se crescente. No entanto, quando a aceleração torna-se nula, ocorre uma inflexão e a taxa de aumento da pressão torna-se decrescente. Tal fato pode ser claramente observado nos pontos em que as curvas relativas à $V_p = 0.5m/s$ e $V_p = 1.0m/s$ deixam de seguir a trajetória da curva para a qual

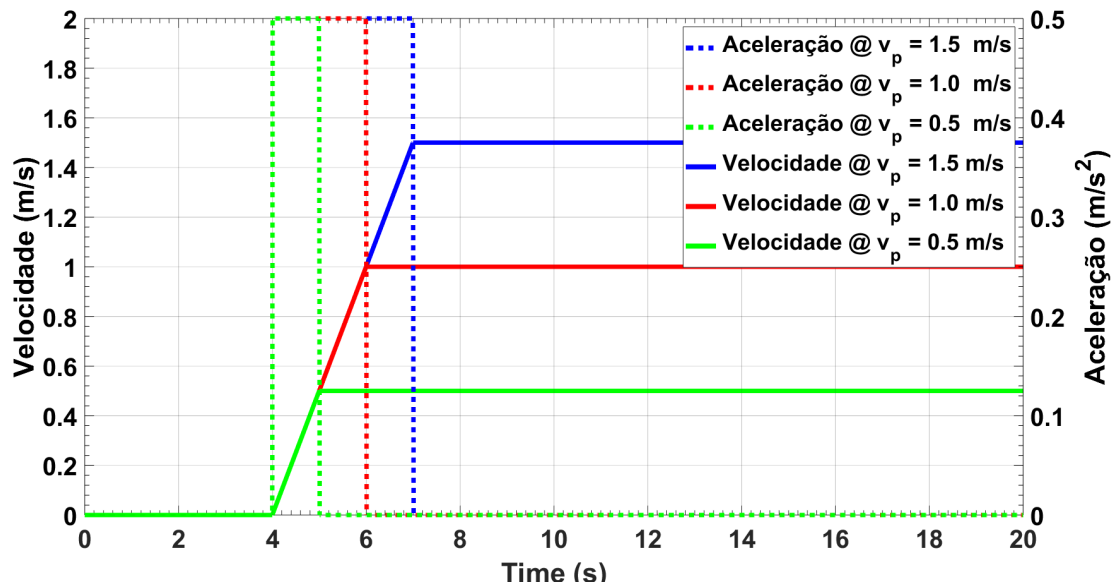


Figura 10: Análise dos efeitos da máxima velocidade. Simulações realizadas com mesmo pico de aceleração e diferentes velocidades de pico.

$V_p = 1.5m/s$, nos tempos 5s e 6s, respectivamente. Quando em velocidade constante a pressão tende a um valor de regime com a dissipação da energia da onda de pressão.

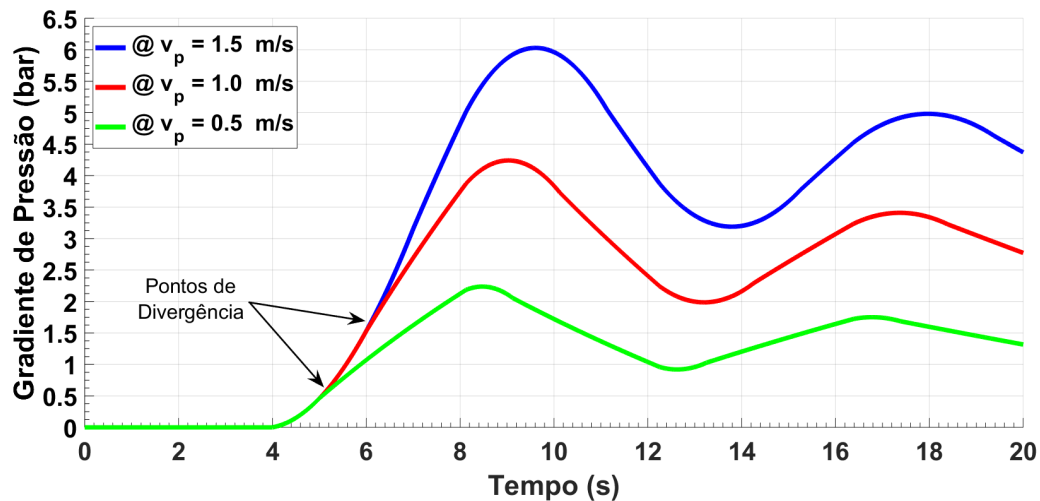


Figura 11: Gradiente de pressão para diferentes velocidade de pico. Aceleração de $0.4m/s^2$ e velocidades máximas de 0.5, 1.0 e 1.5m/s.

Avaliando-se os valores dos picos de pressão e relacionando seus incrementos aos incrementos nos valores de velocidade, se pode observar que o aumento de pressão não segue uma proporção constante. O incremento da velocidade de $0.5m/s$ para $1.0m/s$ (100%) resultou em um aumento do pico de pressão de aproximadamente 90%. Já para um aumento de 200% na velocidade máxima o resultado foi um incremento de pressão da

ordem de 170%.

Embora não apresentados na Figura 11, simulações para incrementos da velocidade em 300% e 400% foram realizados, resultando em aumentos de pressão da ordem de 240% e 300%, respectivamente. Isso demonstra que a taxa que relaciona o aumento da velocidade com o aumento de pressão decai com o aumento da magnitude da variação da velocidade. Esse comportamento é relacionado na Tabela 1:

Tabela 1: Taxa de transmissão Velocidade/Pressão

ΔV_p	ΔP_p	$\Delta P_p / \Delta V_p$
100%	90%	0.90
200%	170%	0.85
300%	240%	0.80
400%	300%	0.75

3.5.4 EFEITOS DO PICO DE ACELERAÇÃO

O efeito do pico de aceleração foi averiguado através de simulações em que configurou-se um valor constante de máxima velocidade. Diferentes valores de máxima aceleração foram testados, de forma que o tempo para que a velocidade máxima seja atingida se para cada teste.

Como se pode observar na Figura 12, os valores de pico de aceleração foram configurados para 0.25, 0.5 e 1.0m/s², enquanto o valor de máxima velocidade foi mantido em valor constante de 1.5m/s. Desta forma destaca-se que os deslocamentos em movimento acelerado perduraram por 6s, 3s e 1.5s, respectivamente. Os resultados em termos de gradientes de pressão resultantes podem ser observados na Figura 13.

Tomando-se como teste de referência aquele em que a aceleração de pico (a_p) foi configurada para 0.25m/s², curva em verde, nota-se que o máximo de aceleração foi aumentado, primeiramente, em 100% e, em um segundo momento, em 300%. Tais incrementos no valor de pico da aceleração provocam alterações no comportamento da pressão observada no fundo do poço, alterações estas analisadas a seguir.

Assim como nos testes realizados a fim de verificar o efeito do pico de velocidade, aqui também observa-se que a taxa de variação da pressão é crescente ao longo do tempo enquanto a coluna se desloca em movimento acelerado, bastando a aceleração cessar para que esta taxa se torne decrescente. Este efeito é um pouco mais evidente no tempo 5.5s, em que a curva relativa à $a_p = 1.0m/s^2$ apresenta uma mudança de tendência. O efeito é menos pronunciado nas demais curvas, no entanto destaca-se que acontecem nos tempos

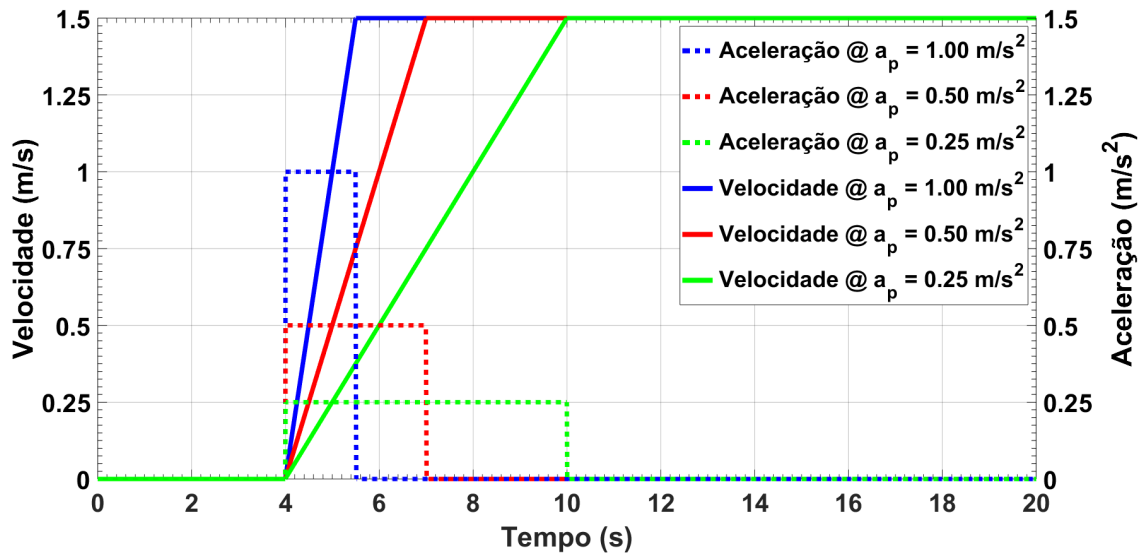


Figura 12: Análise dos efeitos do pico de aceleração. Simulações realizadas com mesmo valor de máxima velocidade e diferentes picos de aceleração.

7s e 10s, respectivamente.

Um dos principais efeitos a ser observado é que o incremento da aceleração de pico faz com que a pressão aumente mais rapidamente no fundo do poço. Comparando-se os três gradientes de pressão observados na Figura 13, destaca-se que o patamar de 1bar de pressão é atingido em 1.048s para a aceleração de maior magnitude, enquanto para a de menor aceleração o tempo necessário para alcançar o mesmo valor de pressão foi de 2.323s . Isso indica que quanto maior é a aceleração imposta à coluna de perfuração, maior é a energia da onda de pressão que se propaga ao longo do poço e do espaço anular.

Para confirmar a afirmação anterior, uma segunda análise temporal se mostra importante. Ela refere-se à diferença de tempo existente entre o final do movimento acelerado e o momento do pico de pressão. Para testes com aceleração de 0.25m/s^2 , esse tempo é de 1.4s , enquanto para aceleração de 1m/s^2 , é de 3.239s . Já que o coeficiente de amortecimento é o mesmo para todos os testes, o fato de a movimentação mais acelerada exigir maior tempo de dissipação evidencia que a energia da onda de pressão é maior.

Avaliando-se os valores dos picos de pressão e relacionando seus incrementos aos incrementos nos valores de aceleração, se pode observar que o aumento de pressão não segue uma proporção constante. O incremento da aceleração de 0.25m/s^2 para 0.5m/s^2 (100%) resultou em um aumento do pico de pressão de aproximadamente 19%. Já para um aumento de 300% no pico de aceleração resultou em um incremento de pressão da ordem de 29%.

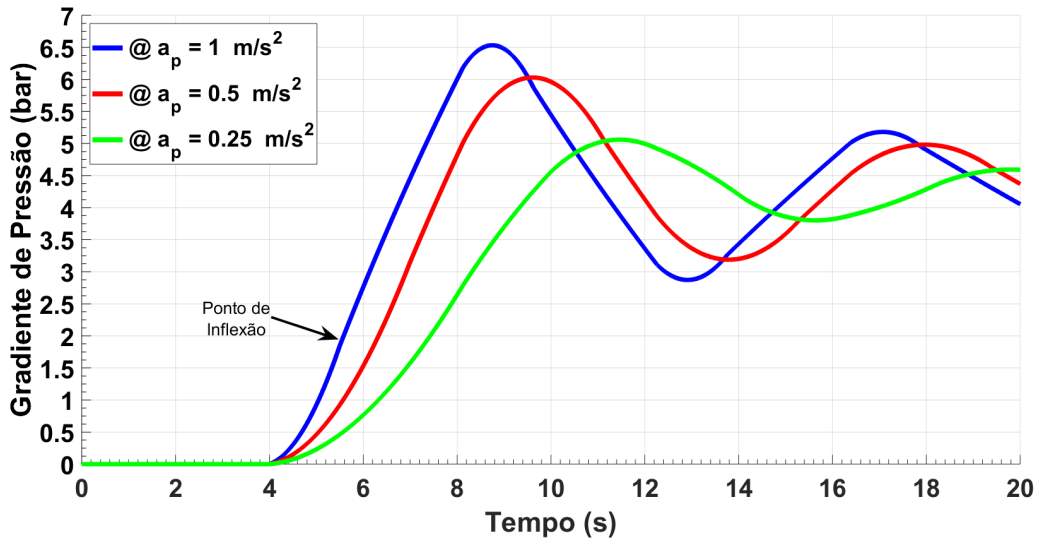


Figura 13: Gradiente de pressão para diferentes picos de aceleração. Valor de máxima velocidade configurado para 1m/s e máximos de aceleração 0.25, 0.5 e 1.0m/s².

Embora não apresentados na Figura 13, simulações para incremento da aceleração em 200% e 400% foram realizados, resultando em aumentos de pressão da ordem de 25% e 31%, respectivamente. Isso demonstra que a taxa que relaciona o aumento da aceleração com o aumento de pressão decai com o aumento da magnitude da variação da aceleração. Esse comportamento é relacionado na Tabela 2.

Tabela 2: Taxa de transmissão Aceleração/Pressão

Δa_p	ΔP_p	$\Delta P_p / \Delta a_p$
100%	19.17%	0.1917
200%	25.73%	0.1287
300%	29.11%	0.0970
400%	31.18%	0.0780

3.5.5 EFEITOS DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E REOLÓGICOS

A fim de verificar a resposta do modelo para alterações nos parâmetros geométricos e reológicos que o definem, simularam-se operações com diferentes valores de viscosidade do fluido de perfuração, profundidade do poço e relações de diâmetros para o espaço anular.

3.5.5.1 VISCOSIDADE

Para a análise do efeito da viscosidade no gradiente de pressão causado pela realização de manobras simulou-se operações de inserção da coluna de perfuração mantendo-

se todos os demais parâmetros constantes e variando-se a viscosidade de $0.01 Pa \cdot s$ até $0.32 Pa \cdot s$. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 14 e demonstram que, quanto mais viscoso for o fluido, maior será o gradiente de pressão observado como resultado das manobras.

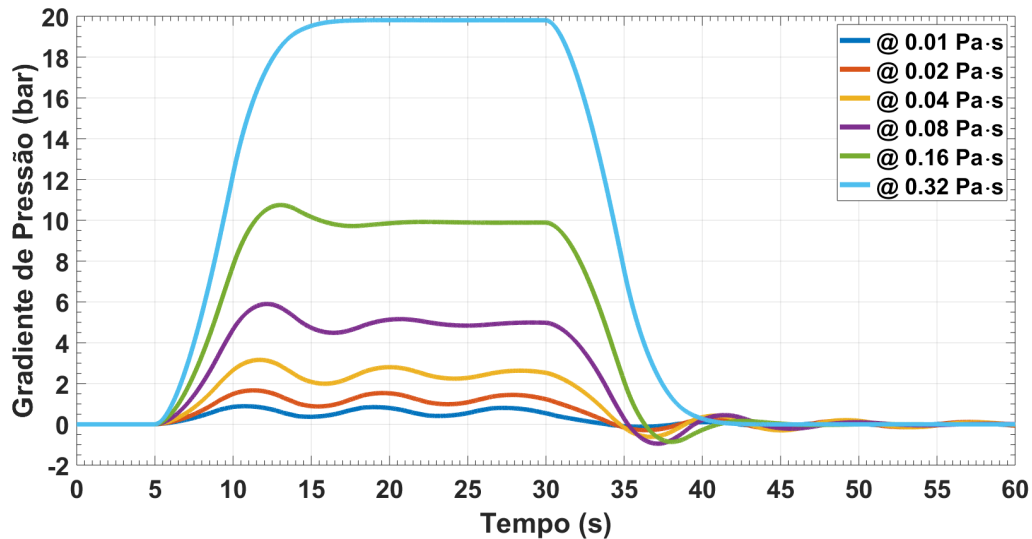


Figura 14: Análise de efeitos da viscosidade do fluido em manobras de inserção da coluna de perfuração. Variação de viscosidade para $0.01 Pa \cdot s$ à $0.32 Pa \cdot s$.

Observa-se, ainda, que com o aumento da viscosidade do fluido a resposta em termos de pressão se apresenta cada vez menos oscilante, evidenciando uma relação diretamente proporcional entre a viscosidade e a dissipação de energia da onda de pressão gerada pela movimentação da coluna de perfuração.

3.5.5.2 PROFUNDIDADE

A análise do efeito da profundidade do poço na resposta de pressão observada foi realizada de forma a variar a profundidade e manter as demais configurações constantes. A profundidade foi configurada inicialmente para $1 km$ e incrementada até se atingir o valor de $8 km$. A Figura 15 apresenta os resultados obtidos através da simulação de manobras de inserção.

Assim como no caso da viscosidade, o aumento da profundidade faz com que o gradiente de pressão observado seja maior. Isso se deve ao aumento área de contato entre fluido de perfuração e as superfícies da coluna e do poço, resultando em maiores perdas por fricção. Outra característica observada é o aumento da dissipação da energia da onda de pressão com o aumento da profundidade.

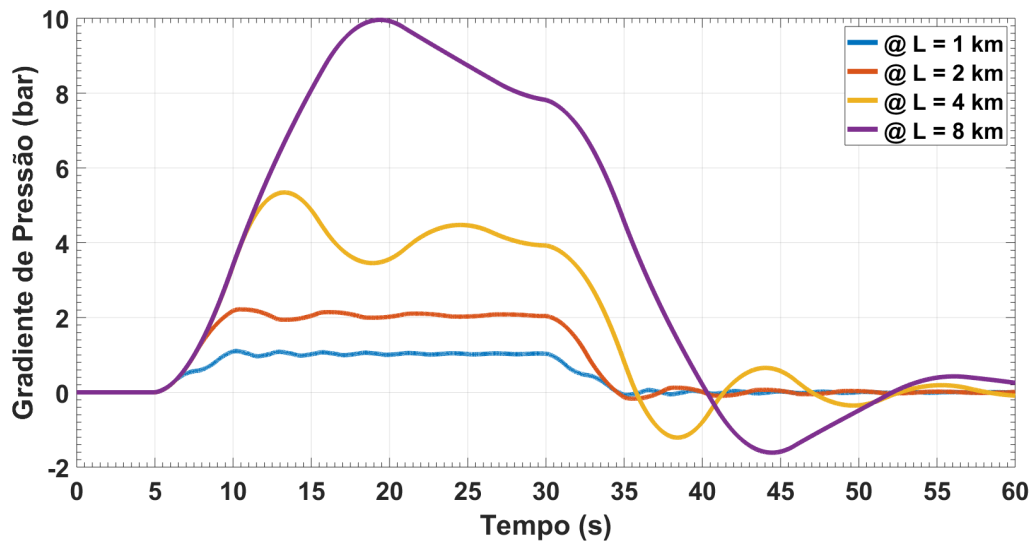


Figura 15: Análise de efeitos da profundidade do poço em manobras de inserção da coluna de perfuração.

3.5.5.3 ESPAÇAMENTO ANULAR

O espaçamento anular, denotado por ε , é definido como sendo a razão entre o diâmetro externo da coluna de perfuração pelo diâmetro do poço. Assim sendo, quando o espaço anular se estreita (aumento de ε), a área da seção transversal deste diminui, aumentando a restrição ao escoamento nesta região e, conseqüentemente, a perda de carga.

Os resultados obtidos para manobras de inserção da coluna de perfuração podem ser observados na Figura 16. Observa-se que, para mesmos valores incrementais do parâmetro ε , o gradiente de pressão aumenta em diferentes proporções. Nota-se, ainda, observando a característica oscilatória da resposta de pressão, que o aumento de ε faz com que a energia das frentes de onda que se propagam ao longo do poço seja mais rapidamente absorvida.

3.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO 3

No presente capítulo foi apresentada a modelagem matemática de manobras em procedimentos de perfuração de poços de petróleo, bem como sua implementação e testes. As equações do modelo foram descritas, hipóteses simplificadoras foram adotadas e as condições de contorno discutidas. A solução das equações foi realizada através do método das características e diferenças finitas. A implementação se deu através do *software* Matlab.

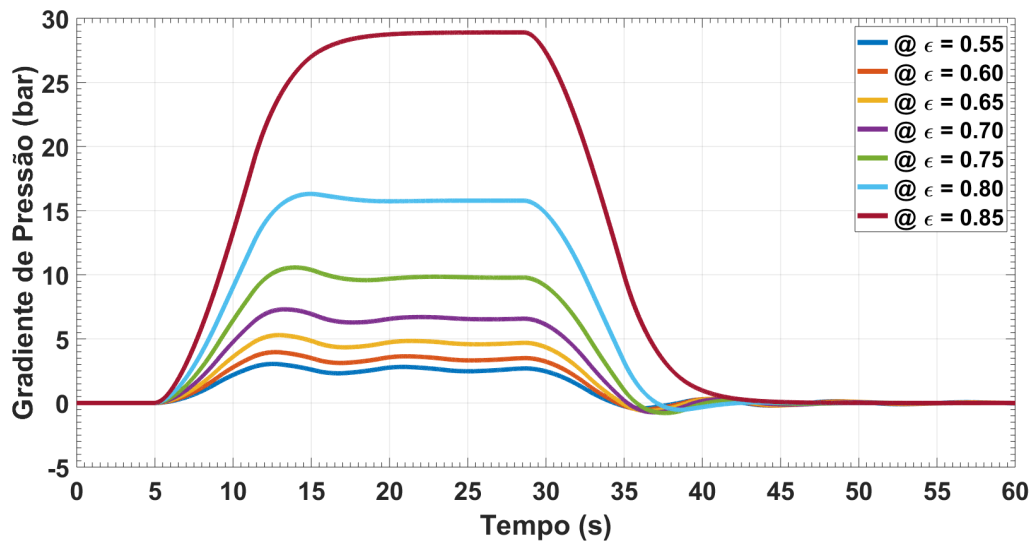


Figura 16: Análise de efeitos do espaçamento anular em manobras de inserção da coluna de perfuração. Simulações realizadas com ϵ variando de 0.55 à 0.85.

Após a implementação, 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, a 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, também leva a um aumento destes gradientes. 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.

No próximo capítulo (Capítulo 4), será apresentada a otimização de manobras em processos de perfuração de poços na indústria de petróleo e gás, visando a redução do tempo não produtivo, resultando na redução dos custos operacionais, através da minimização do tempo gasto na retirada e inserção da coluna de perfuração ao interior do poço.

4 MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE MANOBRAS

Não só na indústria de petróleo e gás, mas em todos os setores industriais, existe o objetivo de maximizar o desempenho produtivo e a qualidade dos produtos ou serviços ofertados, tudo isso ao menor custo possível. Contudo, o processo de tomada de decisões que levem a este objetivo nem sempre é simples, especialmente em operações complexas em que o relacionamento entre os elementos do sistema não é totalmente conhecido. Neste cenário, o desenvolvimento de modelos de otimização tem possibilitado avaliações mais criteriosas e melhor entendimento do processo modelado, auxiliando na identificação de tendências não evidentes e na definição de procedimentos que maximizam o desempenho dos processos industriais.

A seguir, com base nos conhecimentos adquiridos com relação à otimização de sistemas e a manobras em procedimentos de perfuração de poços, será definido um modelo de otimização, com seus parâmetros e variáveis de decisão, seu conjunto de restrições e sua função de avaliação, visando otimizar o processo. A metodologia de implementação do modelo de otimização e os resultados obtidos a partir de sua aplicação são, também, abordados neste capítulo.

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. Os 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 3 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%.

Para a otimização de manobras, tomou-se a velocidade axial da coluna de perfura-

Tabela 3: 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 · s]	0.219
Densidade [kg/m ³]	1235.1
Velocidade de Propagação [m/s]	1450

ção como variável de decisão. No entanto, destaca-se que esta variável é função do tempo, 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 93:

$$V_{ax}(t) = at^2 + bt \quad (93)$$

em que a e b são os coeficientes da equação de segundo grau descrevendo a parábola.

Caso o perfil de velocidade utilizado seja o trapezoidal, a curva de velocidade é definida como na Equação 94 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.

$$V_{ax}(t) = \begin{cases} V_p/t_a \cdot t & \text{se } 0 \leq t \leq t_a \\ V_p & \text{se } t_a \leq t \leq t_a + t_c \\ -V_p/t_a(t - 2t_a - t_c) & \text{se } t_a + t_c \leq t \leq 2t_a + t_c \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (94)$$

4.2 CONJUNTO DE RESTRIÇÕES

As restrições as quais o sistema está sujeito referem-se principalmente a limitações operacionais e de segurança. Neste trabalho são cinco 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 95:

$$\Delta P_{max}^- \leq \Delta P \leq \Delta P_{max}^+ \quad (95)$$

Caso o máximo gradiente negativo de pressão (P_{max}^-) não seja respeitado a pressão de fundo de poço ficará abaixo da pressão de poro o que pode causar o fluxo indesejado de hidrocarbonetos provenientes da zona reservatória para o interior do poço. Por outro lado, se o gradiente de pressão superar o máximo gradiente positivo admitido (P_{max}^+), a pressão de fundo de poço irá superar a pressão de fratura da formação e o fluido de perfuração fluirá para o interior do reservatório poroso. Em ambas situações, além da perda de fluido de perfuração, a formação rochosa é contaminada e sua estrutura danificada.

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 em 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 96:

$$\int_0^{t_f} V_{ax}(t) dt = 27 \quad (96)$$

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 97:

$$|V_p| = \max(|V_{ax}(t)|) \leq V_{max} \quad (97)$$

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 98:

$$|a_P| = \max \left(\left| \frac{dV_{ax}(t)}{dt} \right| \right) \leq a_{max} \quad (98)$$

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 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 devem ser escritas dependendo do perfil utilizado.

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 93) 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 99:

$$\min t_{op} = \frac{-b}{a} \quad (99)$$

Já para perfil de velocidade trapezoidal a função objetivo pode ser escrita como na Equação 100, e se resume ao tempo de deslocamento em movimento uniforme somado aos tempos em movimento uniformemente acelerado.

$$\min t_{op} = t_c + 2t_a \quad (100)$$

4.4 IMPLEMENTAÇÃO

O problema definido nas seções anteriores foi implementado com a utilização da ferramenta de otimização do *software* Matlab. A função utilizada foi a *fmincon* que trabalha de forma a minimizar uma função multivariável com restrições na forma da Equação 101:

$$\min_x f(x) \text{ s. a. } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases} \quad (101)$$

A chamada da função *fmincon* é realizada com o comando:

$$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{nonlcon}, \text{options})$$

em que:

- *fun* é a função a ser minimizada. Aceita um vetor x de variáveis de decisão e retorna um escalar f tal que $f = \text{fun}(x)$;
- $x0$ é o ponto de partida em busca da solução do problema;
- A e Aeq são as matrizes de coeficientes das restrições lineares, associadas com os respectivos vetores b e beq de termos independentes;
- lb e ub são os limites inferiores e superiores do conjunto de valores nos quais x está contido;
- *nonlcon* é a função que computa as equações ($ceq(x) = 0$) e inequações ($c(x) \leq 0$) restritivas não lineares. Aceita um vetor x de variáveis de decisão e retorna os vetores c e ceq . O vetor c contém as desigualdades não lineares avaliadas em x enquanto ceq contém as igualdade não lineares avaliadas em x ;
- *options* é um parâmetro que possibilita a especificação de alguns detalhes do procedimento de solução: algoritmos, tolerâncias, critérios de parada, entre outros.

A função *fmincon*, além da solução ótima, pode retornar uma série de informações referentes ao procedimento de otimização:

$$[x, f, \text{exit flag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}, \text{hessian}] = \text{fmincon}(\dots)$$

em que:

- x é o vetor contendo a solução ótima;

- f é um escalar resultante da avaliação da função objetivo em x ;
- *exit flag* é um inteiro que identifica a razão pela qual o procedimento de otimização foi interrompido;
- *output* é estrutura que contém informações quanto ao procedimento de solução: número de iterações e de avaliações da função, algoritmo utilizado, tamanho do passo de busca, máximo de violação das restrições, medida de otimalidade, entre outros;
- *lambda* é uma estrutura contendo os multiplicadores lagrangianos referentes a cada grupo de restrições implementadas;
- *grad* é o gradiente da função objetivo em x ;
- *hessian* é a matriz hessiana da função objetivo em x .

Caso existirem dúvidas com relação ao uso das ferramentas de otimização recomenda-se a leitura dos manuais *optimization toolbox* na plataforma de ajuda do *software* Matlab.

A seguir são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo de otimização implementado e cuja a solução é realizada através do método dos pontos interiores.

4.5 RESULTADOS

Duas formas diferentes de aplicações foram realizadas. Em ambas considerou-se a velocidade axial de movimentação da coluna de perfuração a variável a ser otimizada de forma que a manobra fosse realizada no menor tempo possível observando-se as restrições operacionais e de segurança definidas. As abordagens diferem quanto ao número de restrições utilizadas. Na primeira abordagem optou-se por utilizar apenas as restrições referentes à janela operacional de gradiente de pressão e ao deslocamento total da coluna de perfuração (três restrições). Já na segunda abordagem, as limitações de máxima velocidade e máxima aceleração foram adicionadas ao modelo de otimização (cinco restrições). Os resultados obtidos para procedimentos de retirada e inserção da coluna de perfuração no poço são apresentados a seguir.

4.5.1 RETIRADA DA COLUNA DE PERFURAÇÃO

Para manobras de retirada da coluna de perfuração, perfis de velocidade parabólicos, em que apenas os coeficientes a e b são otimizados, e trapezoidais, em que as variáveis ta e tc são otimizadas, foram testados.

Destaca-se que para esta manobra os gradientes de pressão são negativos, assim sendo o máximo gradiente negativo de pressão é 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. Tanto para os testes com três e cinco restrições, 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 $-4bar$. Para os testes com cinco restrições, a máxima velocidade axial foi definida como $1m/s$ e a máxima aceleração, por sua vez, foi configurada como $0.1m/s^2$. Destaca-se que tais valores estão na faixa operacional de procedimentos reais de perfuração e são apropriados do ponto de vista de validação do modelo de otimização.

4.5.1.1 RETIRADA DA COLUNA COM TRÊS RESTRIÇÕES IMPLEMENTADAS

Os testes apresentados nesta seção foram realizados de forma a otimizar o perfil de velocidade axial da coluna de perfuração para que realize o deslocamento de 27 metros o mais rápido possível, sem que os gradientes de pressão resultantes da movimentação desta ultrapassem os limites impostos por ΔP_{max}^+ e ΔP_{max}^- . Nenhuma restrição de velocidade ou aceleração da coluna de perfuração encontra-se ativa, entretanto seus valores serão, ainda assim, analisados a fim de se verificar a factibilidade da solução encontrada.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a otimização do perfil parabólico de velocidade para as diferentes configurações de máximo gradiente negativo de pressão. Nesta observam-se os valores otimizados para os coeficientes a e b que descrevem a curva de velocidade axial. Os valores referentes aos tempos de operação (t_{op}), velocidades (V_p) e acelerações (a_p) de pico, gradientes positivos (ΔP^+) e negativos (ΔP^-) de pressão são também apresentados.

Nota-se, na Tabela 4, que para todas as configurações testadas, do caso 1 ao caso 5, o máximo gradiente negativo observado na solução ótima coincide com o máximo gradiente negativo admitido. Desta forma, destaca-se que a restrição de máximo gradiente negativo de pressão se mostrou ativa no processo de otimização.

Tabela 4: Manobra de retirada da coluna de perfuração. Otimização do perfil parabólico de velocidade em caso de três restrições.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
ΔP_{max}^+ [bar]	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
ΔP_{max}^- [bar]	-20.00	-16.00	-12.00	-8.00	-4.00
t_{op} [s]	30.39	37.83	50.29	75.27	150.34
a	0.00576	0.00299	0.00127	0.00037	0.00004
b	-0.11753	-0.1131	-0.0641	-0.0284	0.0072
$ V_P $ [m/s]	1.33	1.07	0.80	0.54	0.27
$ a_P $ [m/s ²]	0.1752	0.1131	0.0640	0.0285	0.0072
ΔP^+ [bar]	1.24	0.81	0.47	0.21	0.05
ΔP^- [bar]	-20.00	-16.00	-12.00	-8.00	-4.00

A Figura 17 apresenta os perfis parabólicos ótimos de velocidade para cada um dos diferentes testes realizados. Observa-se que para maiores valores de ΔP_{max}^- menores são os tempos necessários para a realização da operação. Isto fica mais evidente na Figura 18a, a qual apresenta o deslocamento da coluna de perfuração ao longo do tempo. Observa-se que nos casos em que o intervalo da janela operacional é maior, menores tempos são necessários para o deslocamento total dos 27 metros de coluna. Destaca-se ainda, observando-se a inclinação das curvas de velocidade, uma maior aceleração da coluna de perfuração nestes casos. Isso também ser observado na Figura 18b, a qual ilustra as curvas de aceleração da coluna de perfuração para os procedimentos de otimização realizados e sumarizados na Tabela 4.

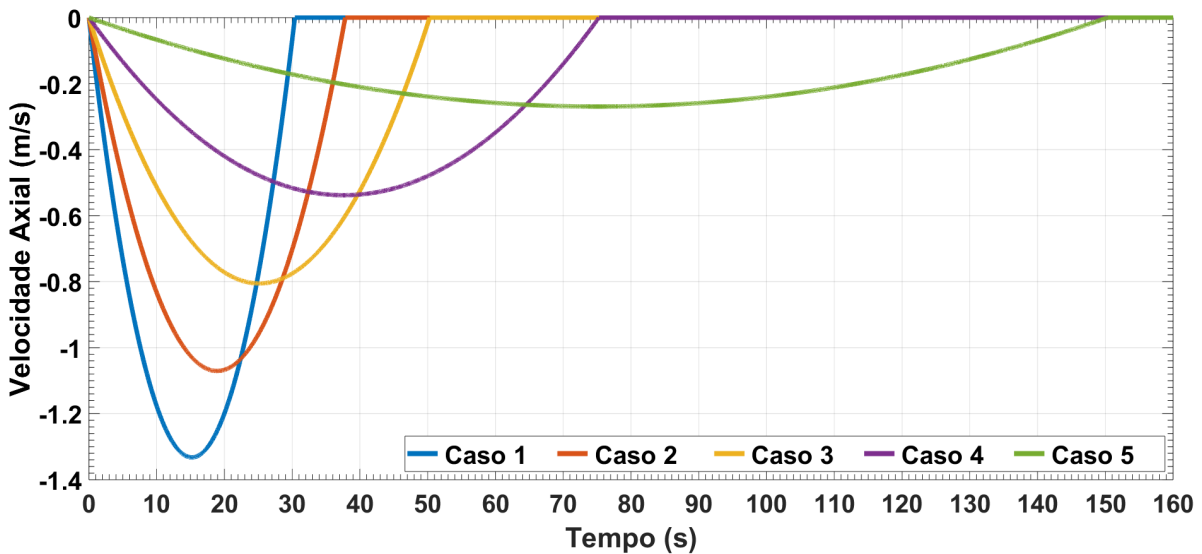


Figura 17: Perfis parabólicos ótimos de velocidade para manobras de retirada da coluna de perfuração em casos de três restrições.

A Figura 19 apresenta os gradientes de pressão resultantes da movimentação da coluna de perfuração para cada uma das configurações testadas. Nela se pode notar que os

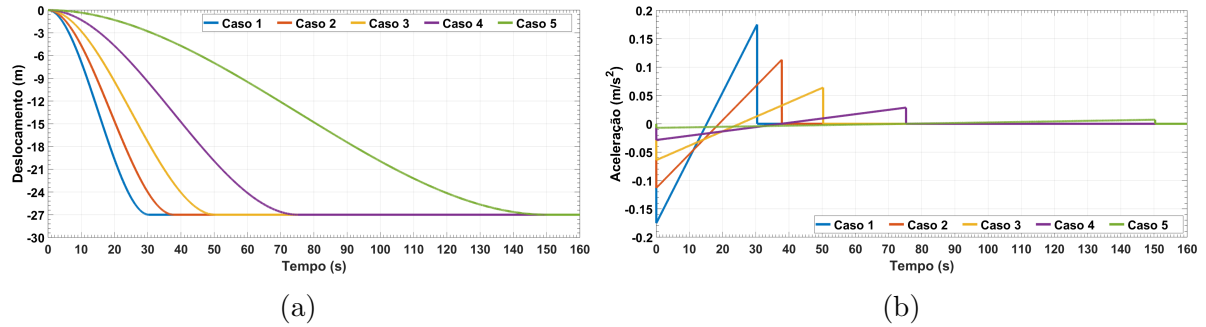


Figura 18: Otimização de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis parabólicos de velocidade e três restrições. Apresentação do (a) deslocamento e da (b) aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo.

máximos gradientes negativos de pressão admitidos são alcançados para todos os testes, entretanto as restrições de máximos gradientes negativos, assim como os positivos, são efetivamente respeitados.

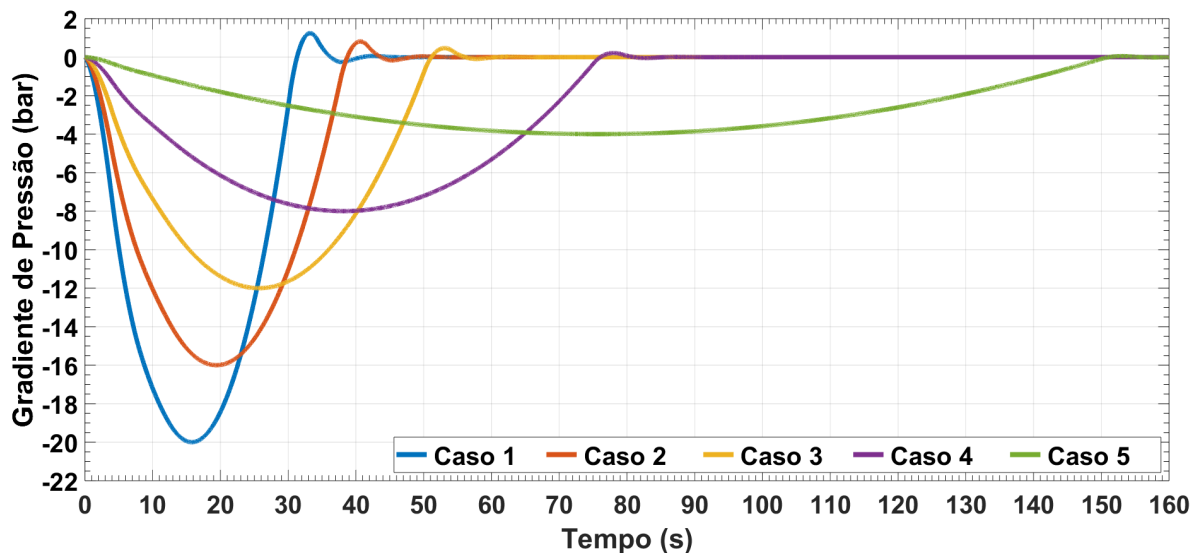


Figura 19: Gradientes de pressão resultantes de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis parabólicos otimizados de velocidade para caso de três restrições.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtido para a otimização do perfil trapezoidal de velocidade para as diferentes configurações de ΔP_{max}^- . Os tempos em movimento uniformemente acelerado (ta) e em movimento uniforme (tc) foram otimizados. A velocidade de pico foi definida com base na restrição de deslocamento total, de forma que a área sob a curva de velocidade seja igual a 27. Os valores referentes aos tempos de operação, velocidades e acelerações de pico, gradientes positivos e negativos de pressão são também apresentados.

Assim como nos resultados para perfil parabólico, na otimização de perfis trape-

Tabela 5: Manobra de retirada da coluna de perfuração. Otimização do perfil trapezoidal de velocidade em caso de três restrições.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
ΔP_{max}^+ [bar]	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
ΔP_{max}^- [bar]	-20.00	-16.00	-12.00	-8.00	-4.00
t_{op} [s]	27.73	32.93	42.53	65.50	114.58
t_a [s]	5.46	4.31	4.97	0.005	7.76
t_c [s]	16.79	24.31	32.59	65.49	99.05
$ V_P $ [m/s]	1.21	0.94	0.72	0.41	0.25
$ a_P $ [m/s ²]	0.221	0.218	0.144	49.81	0.032
ΔP^+ [bar]	2.00	2.00	1.33	1.88	0.25
ΔP^- [bar]	-20.00	-16.00	-12.00	-8.00	-4.00

zoidais de velocidade, os gradientes negativos atingiram os máximos valores permitidos em cada um dos testes. O máximo gradiente positivo de pressão foi atingido em dois dos testes, diferentemente dos testes com perfil parabólico. Isso está relacionado a maior liberdade de representação do perfil de velocidade trapezoidal em detrimento do parabólico.

Os perfis trapezoidais ótimos de velocidade podem ser observados na Figura 20, enquanto o deslocamento e a aceleração da coluna de perfuração e os gradientes de pressão resultantes da movimentação podem ser observados nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

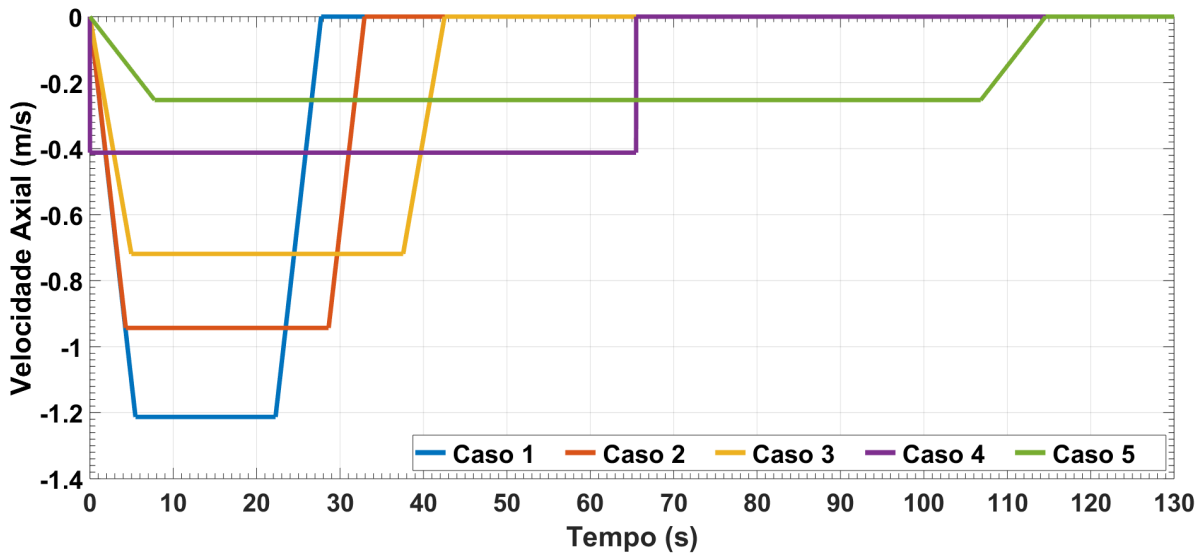


Figura 20: Perfis trapezoidais ótimos de velocidade para manobras de retirada da coluna de perfuração em casos de três restrições.

Mais uma vez nota-se que menores tempos de manobra e maiores picos de velocidade são observados em testes com janelas operacionais de pressão mais largas. No entanto nada se pode afirmar com relação aos máximos valores de aceleração resultantes

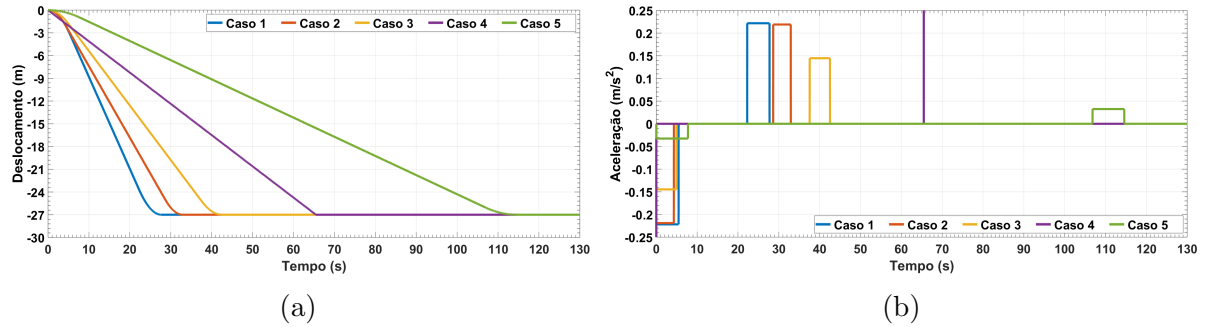


Figura 21: Otimização de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis trapezoidais de velocidade e três restrições. Apresentação do (a) deslocamento e da (b) aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo.

do processo de otimização do perfil trapezoidal de velocidade. Testes com janela operacional mais estreita apresentaram picos de aceleração significativamente maiores que testes com janela operacional mais larga. O pico de aceleração para o caso 4, por exemplo, foi de aproximadamente $50m/s^2$, enquanto os demais testes resultaram em picos de aceleração menores que $0.25m/s^2$.

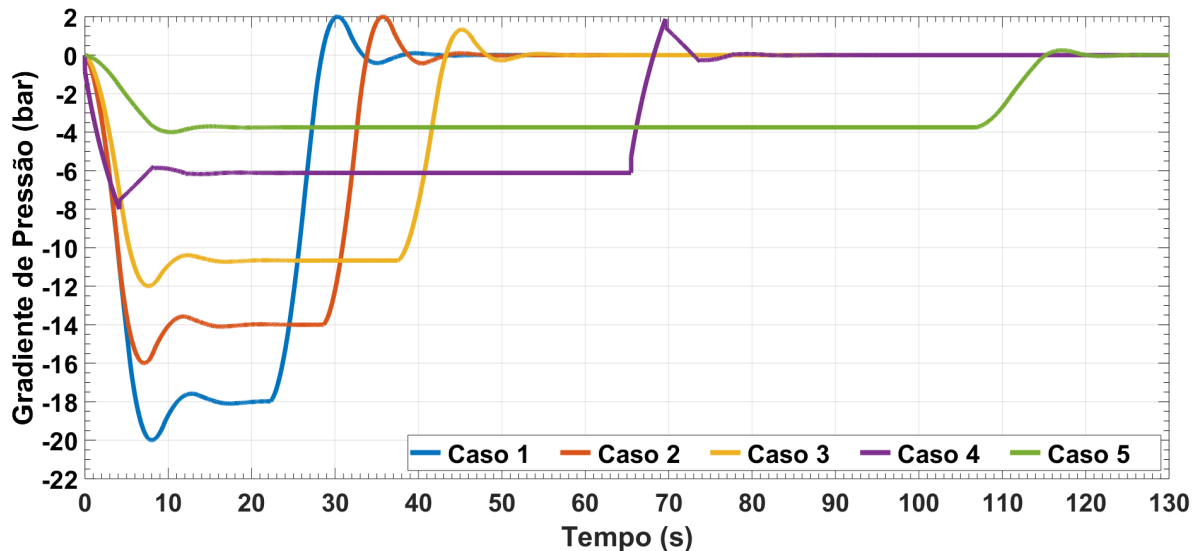


Figura 22: Gradientes de pressão resultantes de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis trapezoidais otimizados de velocidade para caso de três restrições.

Embora as restrições de deslocamento total e máximos gradientes de pressão tenham sido respeitadas (observar Figuras 21a e 22), nota-se que valores inactíveis de velocidade ou aceleração podem ser obtidos como resposta ótima. Assim sendo observa-se a necessidade de se implementar novas restrições a fim de limitar o espaço de busca e obter soluções factíveis. Neste contexto, adicionou-se ao modelo de otimização as restrições referentes às máximas velocidade axial e aceleração da coluna de perfuração. Os resultados

obtidos são apresentados a seguir.

4.5.1.2 RETIRADA DA COLUNA COM CINCO RESTRIÇÕES IMPLEMENTADAS

Ao modelo de otimização foram inseridas as restrições referentes aos máximos valores operacionais de velocidade e aceleração e, a partir daí, os testes foram refeitos. As valores configurados para os máximos gradientes de pressão foram mantidos os mesmos que para os testes realizados com T restrições, enquanto a velocidade máxima foi definida como $1m/s$ e a máxima aceleração configurada para $0.1m/s^2$.

Os resultados obtidos para a otimização de perfis parabólicos de velocidade são apresentados na Tabela 6 e nela observa-se que a velocidade axial de pico foi limitada para os casos 1 e 2. Ao contrário dos demais testes, em que a restrição ativa é a de máximo gradiente negativo de pressão, para estes dois casos a restrição ativa é a de máxima velocidade operacional possível.

Tabela 6: Manobra de retirada da coluna de perfuração. Otimização do perfil parabólico de velocidade em caso de cinco restrições.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
$\Delta P_{max}^+[bar]$	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
$\Delta P_{max}^- [bar]$	-20.00	-16.00	-12.00	-8.00	-4.00
$V_{max}[m/s]$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$a_{max}[m/s^2]$	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
$t_{op}[s]$	40.50	40.50	50.29	75.27	150.34
a	0.00240	0.00240	0.00130	0.00037	0.00004
b	-0.0988	-0.0988	-0.0641	-0.0286	0.0072
$ V_P [m/s]$	1.00	1.00	0.80	0.54	0.27
$ a_P [m/s^2]$	0.0987	0.0987	0.0640	0.0285	0.0072
$\Delta P^+[bar]$	0.71	0.71	0.47	0.21	0.05
$\Delta P^- [bar]$	-14.93	-14.93	-12.00	-8.00	-4.00

Ainda sobre os resultados apresentados na Tabela 6, nota-se que os picos de aceleração não atingiram o valor limite especificado, evidenciando que tal restrição não atuou ativamente nas respostas do modelo. Com relação aos testes que não foram limitados em velocidade, destaca-se que os resultados foram os mesmos obtidos para os testes em que apenas três restrições foram aplicadas.

As Figuras 23 a 25 ilustram graficamente os dados apresentados na Tabela 6. Na Figura 23 são apresentados os perfis de velocidade axial da coluna de perfuração resultantes da otimização realizada com as cinco restrições elencadas neste trabalho. As Figuras 24a e 24b apresentam, respectivamente, o deslocamento total da coluna de per-

furação e a aceleração desta ao longo do tempo. Os gradientes de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração podem ser observados na Figura 25.

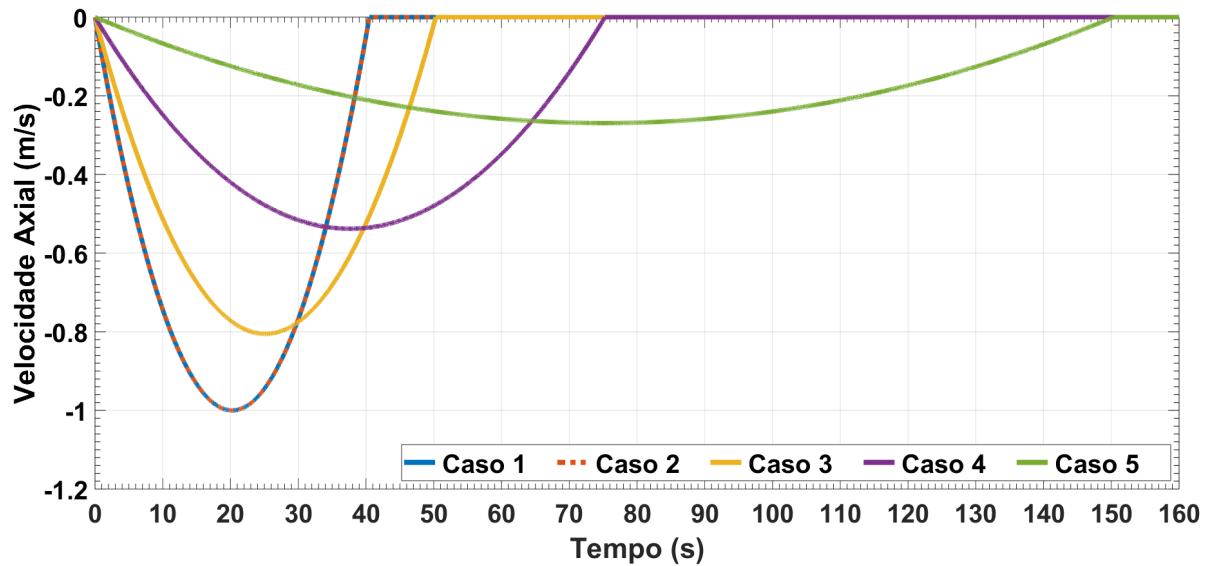


Figura 23: Perfis parabólicos ótimos de velocidade para manobras de retirada da coluna de perfuração em casos de cinco restrições.

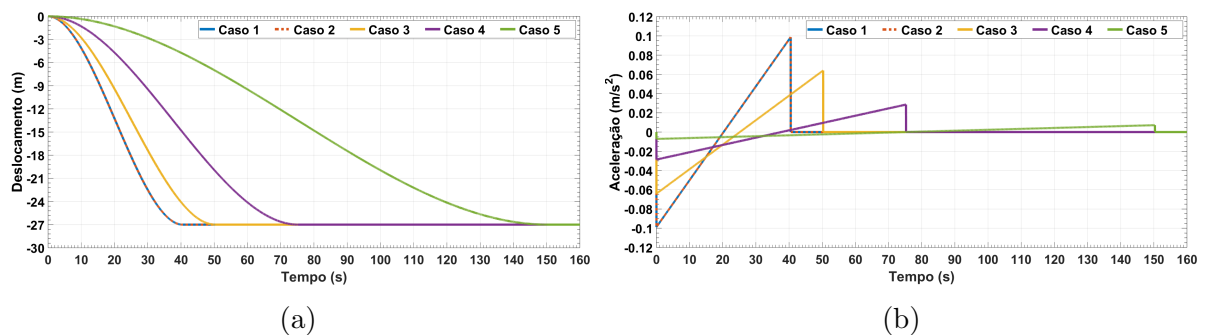


Figura 24: Otimização de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis parabólicos de velocidade e restrições. Apresentação do (a) deslocamento e da (b) aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo.

Nota-se que para ambos os testes limitados em velocidade, embora as larguras das janelas operacionais de pressão sejam diferentes, as respostas do modelo de otimização foram idênticas. Isso pode ser verificado observando-se a sobreposição das curvas relativas a estes testes nas Figuras 23, 24 e 25.

Destaca-se que para o perfil parabólico de velocidade, tanto a velocidade de pico quanto a aceleração de pico são dependentes somente dos coeficientes a e b , desta maneira a limitação de uma das grandezas invariavelmente acarretará na limitação da outra. Assim sendo, verifica-se que a limitação da velocidade resultou em uma redução do pico de aceleração apresentado. Seguindo este raciocínio conclui-se que se a máxima aceleração

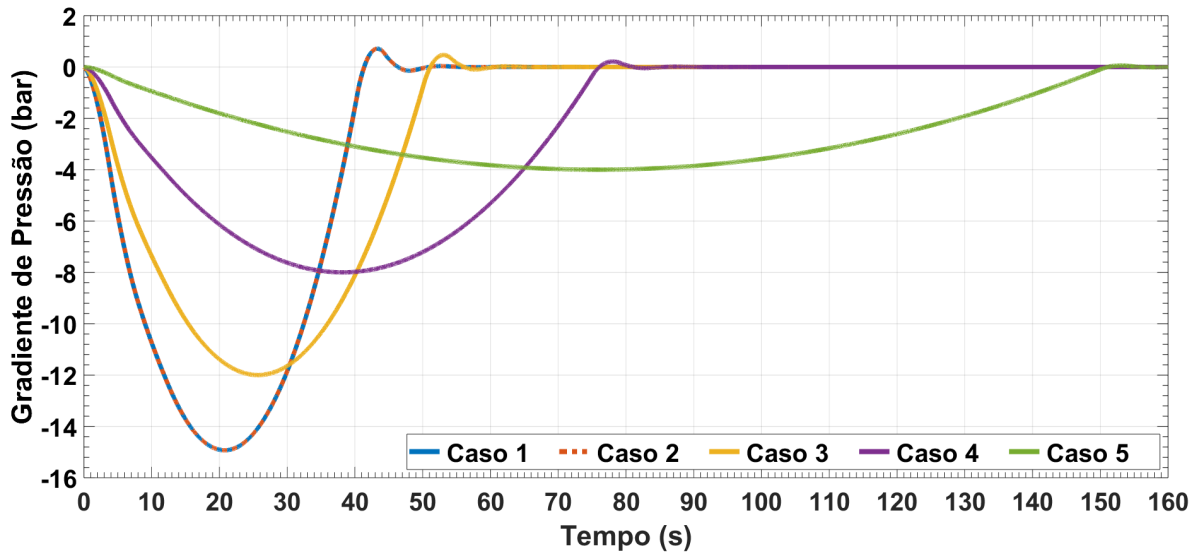


Figura 25: Gradientes de pressão resultantes de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis parabólicos otimizados de velocidade para caso de cinco restrições.

operacional fosse configurada para valores inferiores a $0.0987m/s^2$, o módulo da velocidade não atingiria o valor de $1m/s$ e a restrição ativa, neste caso, seria a máxima aceleração operacional.

De modo geral, em termos de tempo necessário para a realização de uma manobra com perfil parabólico de velocidade, a inserção de restrições operacionais de velocidade e aceleração atuam de forma a definir um tempo limite, abaixo do qual não é possível trabalhar mesmo em situações onde grandes gradientes de pressão são permitidos.

Os testes realizados para otimização de perfis trapezoidais de velocidade em manobras de retirada da coluna de perfuração apresentaram resultados ligeiramente diferentes dos obtidos para perfis parabólicos. Tais resultados podem ser observados na Tabela 7.

Mais uma vez observa-se a limitação da velocidade de pico para os testes com as duas maiores janelas operacionais. Entretanto, diferentemente dos resultados observados para perfis parabólicos de velocidade, nota-se, aqui, a ação da restrição de máxima aceleração operacional em três dos testes realizados. Destaca-se que nos testes em que ΔP_{max}^- assume valores de $-20bar$ e $-16bar$, casos 1 e 2, ambas as restrições, de velocidade e de aceleração, se apresentam ativas. Situação semelhante acontece para o caso 3 onde as restrições de máxima aceleração e máximo gradiente negativo de pressão atuam concomitantemente.

Um fato interessante de se ressaltar é a relação independente entre a velocidade de pico e a aceleração de pico. Para os dois primeiros testes, casos 1 e 2, a resposta

Tabela 7: Manobra de retirada da coluna de perfuração. Otimização do perfil trapezoidal de velocidade em caso de cinco restrições.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
$\Delta P_{max}^+[bar]$	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
$\Delta P_{max}^-[bar]$	-20.00	-16.00	-12.00	-8.00	-4.00
$V_{max}[m/s]$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$a_{max}[m/s^2]$	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
$t_{op}[s]$	37.00	37.00	43.26	63.02	114.98
$ta[s]$	10.00	10.00	7.57	10.56	6.96
$tc[s]$	17.00	17.00	28.12	41.89	101.06
$ V_P [m/s]$	1.00	1.00	0.75	0.51	0.25
$ a_P [m/s^2]$	0.100	0.100	0.100	0.048	0.035
$\Delta P^+[bar]$	0.73	0.73	0.77	0.36	0.29
$\Delta P^-[bar]$	-15.50	-15.50	-12.00	-8.00	-4.00

do modelo proporcionou velocidade de pico de $-1m/s$ aliado a uma aceleração de pico de $0.1m/s^2$. Em contrapartida, para um mesmo valor de máxima aceleração, o pico de velocidade obtido para o caso 3 é de $0.75m/s$. Isso sugere a possibilidade de se ajustar a velocidade sem alterar a aceleração, ou vice-versa.

As Figuras 26 a 28 apresentam os resultados de otimização obtidos para manobra de retirada da coluna de perfuração com perfil de velocidade trapezoidal em casos de cinco restrições implementadas. Enquanto a Figura 26 apresenta os perfis trapezoidais ótimos resultantes, as Figuras 27a e 27b apresentam, respectivamente, o deslocamento e a aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo de operação. Os gradientes de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração são apresentados na Figura 28.

Analisando a Figura 27b percebe-se que a ocorrência de altos valores de aceleração foi suprimida de forma que seus valores de pico foram limitados a $0.1m/s^2$. Comparando os resultados obtidos para $\Delta p_{max}^- = -8bar$ com cinco restrições com aqueles obtidos para três restrições implementadas verifica-se que a limitação da aceleração levou a uma melhor solução, reduzindo o tempo de operação de $65.5s$ para $63.02s$.

4.5.2 INSERÇÃO DA COLUNA DE PERFURAÇÃO

Para manobras de inserção da coluna de perfuração, perfis de velocidade parabólicos e trapezoidais foram testados. Inicialmente apenas as restrições referentes aos máximos gradientes de pressão permitidos e ao deslocamento total da coluna de perfuração foram implementadas. Em um segundo momento as restrições operacionais de máxima

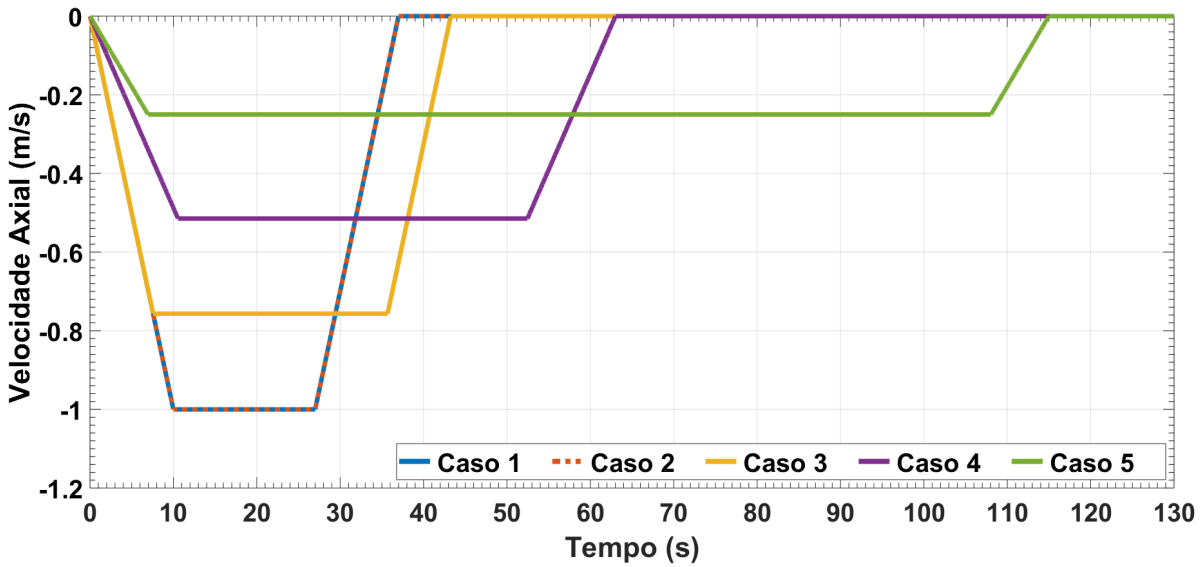


Figura 26: Perfis trapezoidais ótimos de velocidade para manobras de retirada da coluna de perfuração em casos de cinco restrições.

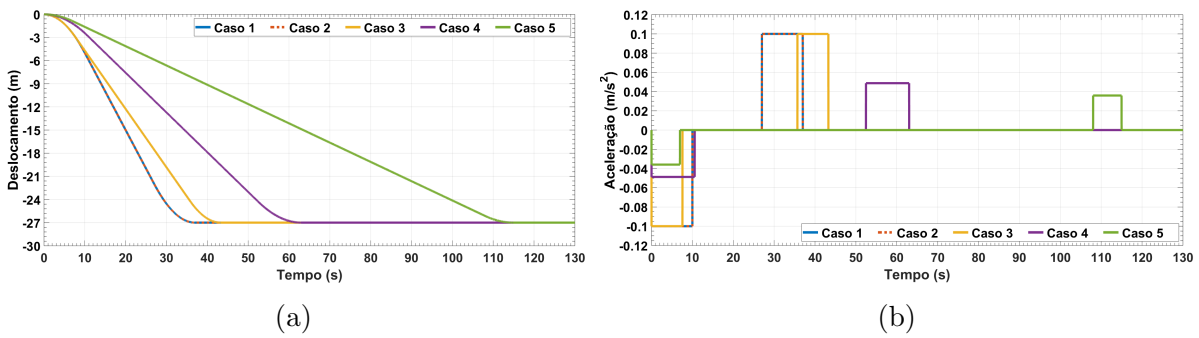


Figura 27: Otimização de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis trapezoidais de velocidade e cinco restrições. Apresentação do (a) deslocamento e da (b) aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo.

velocidade axial e máxima aceleração foram introduzidas e os testes refeitos. Em todos os testes realizados o máximo gradiente negativo foi mantido com valor constante de $-2bar$ e o máximo gradiente positivo foi configurado a cada novo teste com um valor menor que o anterior, promovendo desafios operacionais cada vez maiores. Nos testes nos quais as cinco restrições foram consideradas, a velocidade operacional máxima foi configurada para $1m/s$ enquanto a máxima aceleração permitida foi de $0.1m/s^2$. A seguir são apresentados os resultados obtidos.

4.5.2.1 INSERÇÃO DA COLUNA COM TRÊS RESTRIÇÕES IMPLEMENTADAS

Na Tabela 8 são sumarizados os resultados do procedimento de otimização de uma manobra de inserção da coluna de perfuração com perfil parabólico de velocidade. Tais resultados foram obtidos através de um modelo de otimização que leva em consideração as

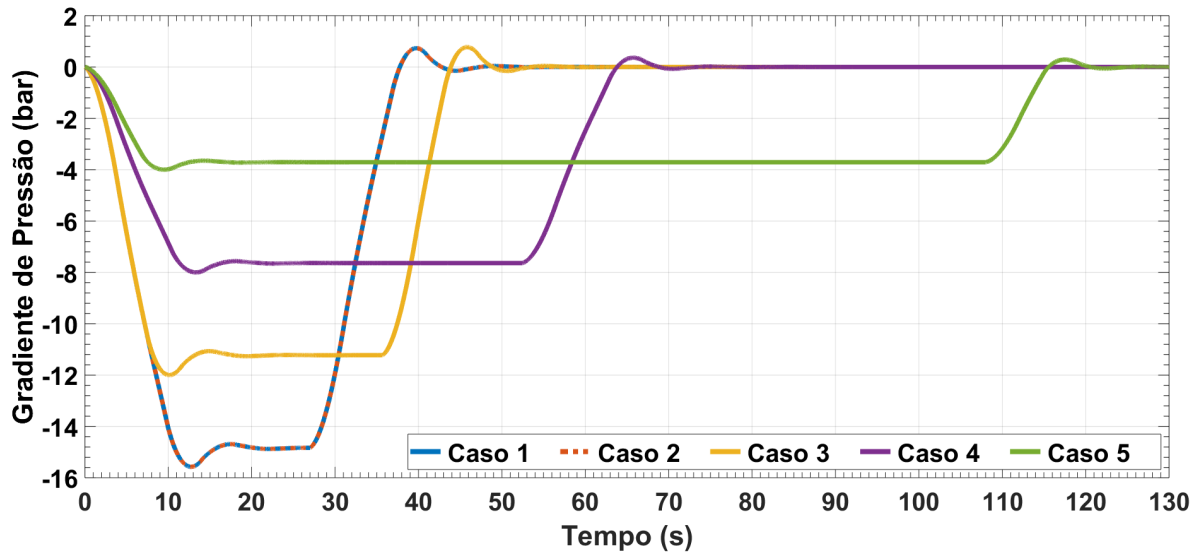


Figura 28: Gradientes de pressão resultantes de manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis trapezoidais otimizados de velocidade para caso de cinco restrições.

restrições de deslocamento total constante e igual a 27 metros, bem como as de limitação dos valores máximos dos gradientes positivos e negativos de pressão.

Para cada um dos testes são apresentados os valores ótimos para os coeficientes que descrevem a curva de velocidade (a e b), bem como o tempo necessário para a execução da manobra. A máxima velocidade atingida e o pico de aceleração também são disponibilizados. Os máximos e mínimos valores de pressão atingidos em decorrência da movimentação da coluna de perfuração são destacados na duas últimas linhas da Tabela 8. Os resultados do processo de otimização ao longo do tempo são graficamente apresentados nas Figuras 29 a 31.

Tabela 8: Manobra de inserção da coluna de perfuração. Otimização do perfil parabólico de velocidade em caso de três restrições.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
ΔP_{max}^+ [bar]	20.00	16.00	12.00	8.00	4.00
ΔP_{max}^- [bar]	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00
t_{op} [s]	25.53	31.87	42.41	63.53	126.95
a	-0.00973	-0.00500	-0.00213	-0.00063	-0.00008
b	0.2484	0.1594	0.0900	0.0401	0.0100
$ V_P $ [m/s]	1.58	1.27	0.95	0.63	0.32
$ a_P $ [m/s ²]	0.2483	0.1594	0.0900	0.0401	0.0100
ΔP^+ [bar]	20.00	16.00	12.00	8.00	4.00
ΔP^- [bar]	-0.86	-0.56	-0.32	-0.14	-0.04

Os perfis parabólicos ótimos de velocidade são apresentados na Figura 29 e, mais

uma vez, observa-se que para configurações em que são permitidos maiores gradientes de pressão os valores de velocidade e aceleração de pico são maiores, resultando em menores tempos de operação. Analisando-se a Figura 30a é possível visualizar a diferença entre os tempos necessários para o deslocamento de 27 metros para cada uma das configurações.

A Figura 30b apresenta a taxa de aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo, enquanto a Figura 31 destaca os gradientes de pressão resultantes da inserção da coluna de perfuração para o interior do poço.

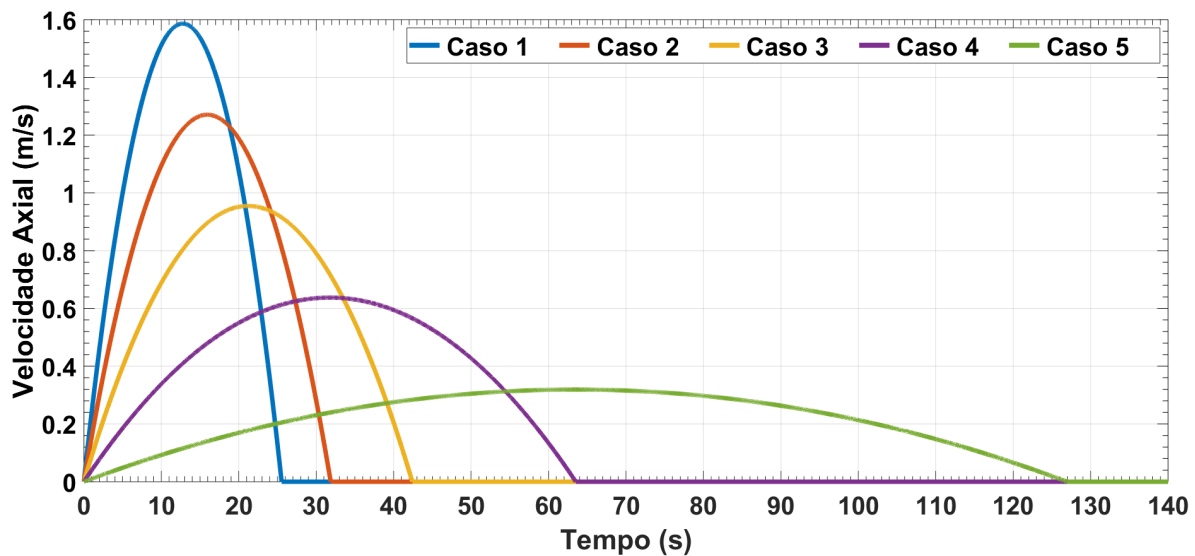


Figura 29: Perfis parabólicos ótimos de velocidade para manobras de inserção da coluna de perfuração em casos de três restrições.

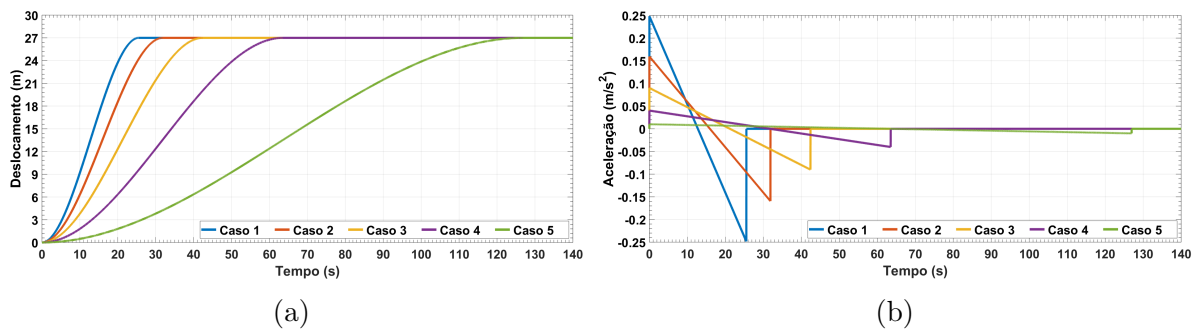


Figura 30: Otimização de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis parabólicos de velocidade e três restrições. Apresentação do (a) deslocamento e da (b) aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo.

Ao se observar os resultados apresentados na Figura 31 e na Tabela 8 nota-se que os limites especificados por ΔP_{max}^+ são atingidos em todos os testes, o que define a restrição de máximo gradiente positivo como ativa no processo de otimização.

Os resultados obtidos para testes com perfis trapezoidais de velocidade, em que as variáveis t_a e t_c são otimizadas, são apresentados na Tabela 9. Os tempos necessários para

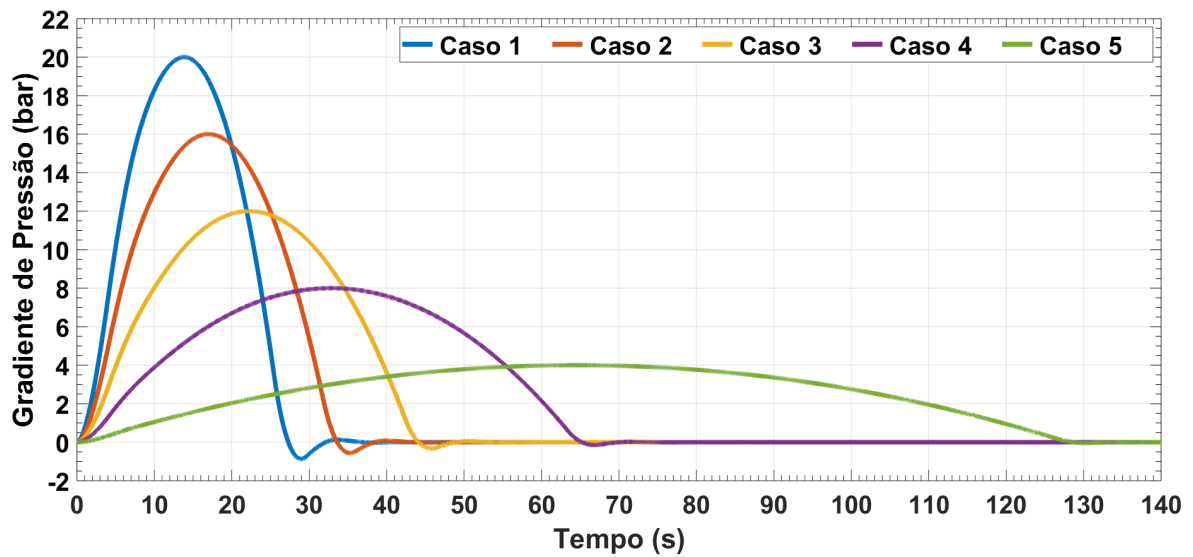


Figura 31: Gradientes de pressão resultantes de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis parabólicos otimizados de velocidade para caso de três restrições.

que cada manobra seja realizada, bem como os valores de pico de velocidade, aceleração e gradientes de pressão são apresentados.

Um fato recorrente nos resultados apresentados, e aqui não é diferente, é a possibilidade de execução das manobras de forma mais rápida quanto maior for a janela operacional. Os perfis trapezoidais ótimos de velocidade obtidos através do modelo de otimização com três restrições são apresentados na Figura 32.

Tabela 9: Manobra de inserção da coluna de perfuração. Otimização do perfil trapezoidal de velocidade em caso de três restrições.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
$\Delta P_{max}^+[bar]$	20.00	16.00	12.00	8.00	4.00
$\Delta P_{max}^- [bar]$	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00
$t_{op}[s]$	21.21	24.27	32.31	49.32	95.35
$ta[s]$	2.34	0.14	0.11	2.24	6.07
$tc[s]$	16.54	23.98	32.07	44.85	83.21
$ V_P [m/s]$	1.43	1.12	0.83	0.57	0.30
$ a_P [m/s^2]$	0.6117	7.8638	7.2686	0.2561	0.0498
$\Delta P^+[bar]$	19.93	16.00	12.00	8.00	4.00
$\Delta P^- [bar]$	-2.00	-1.97	-1.48	-0.81	-0.21

Os deslocamentos da coluna de perfuração ao longo do tempo e as curvas de aceleração desta são apresentadas na Figura 33, enquanto os gradientes de pressão resultantes da movimentação da coluna de perfuração são ilustrados na Figura 34. Nota-se, ao se observar os gradientes de pressão e o deslocamento total da coluna de perfuração,

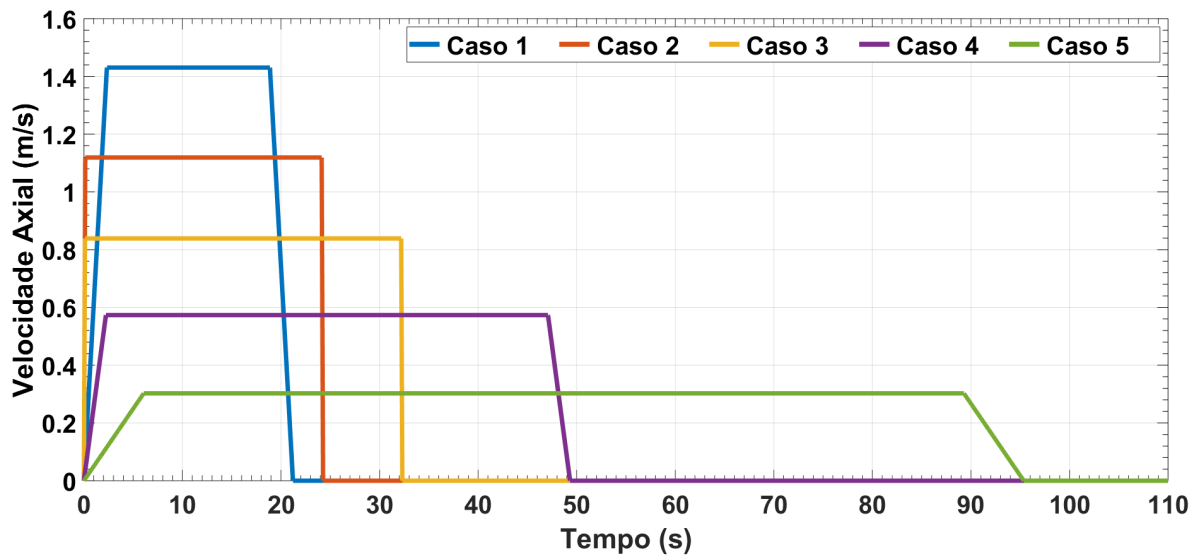


Figura 32: Perfis trapezoidais ótimos de velocidade para manobras de inserção da coluna de perfuração em casos de três restrições.

que ambas as restrições são respeitadas em todos os testes. No entanto, verifica-se, na Figura 33b, que grandes valores de aceleração são obtidos como resultado para alguns dos testes. Tais valores podem não ser operacionalmente factíveis, de forma que a implementação de restrições que tornem os resultados mais realísticos é necessária. A otimização de manobras de inserção da coluna de perfuração com restrições de velocidade e aceleração da coluna de perfuração serão apresentados a seguir.

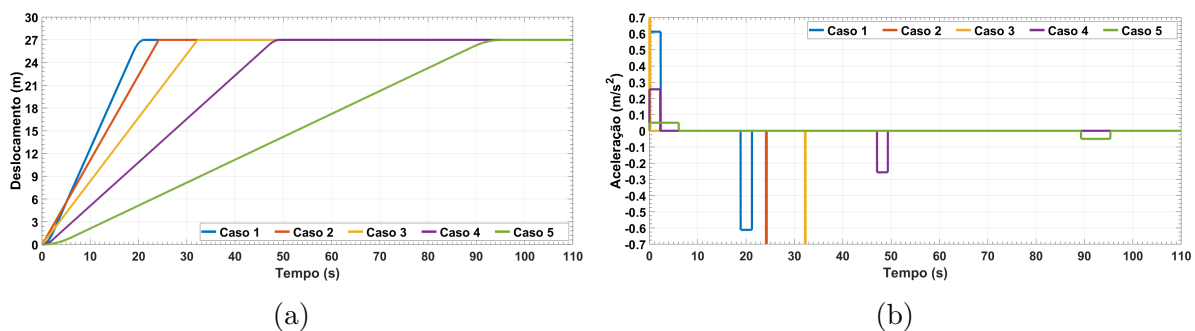


Figura 33: Otimização de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis trapezoidais de velocidade e três restrições. Apresentação do (a) deslocamento e da (b) aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo.

4.5.2.2 INSERÇÃO DA COLUNA COM CINCO RESTRIÇÕES IMPLEMENTADAS

As restrições referentes às máximas velocidade e aceleração operacionais foram novamente ativadas, agora a fim de testar suas influências em manobras de inserção da coluna de perfuração no interior do poço. A restrição referente ao deslocamento total da coluna de perfuração foi mantida inalterada, assim como os valores dos máximos gradientes

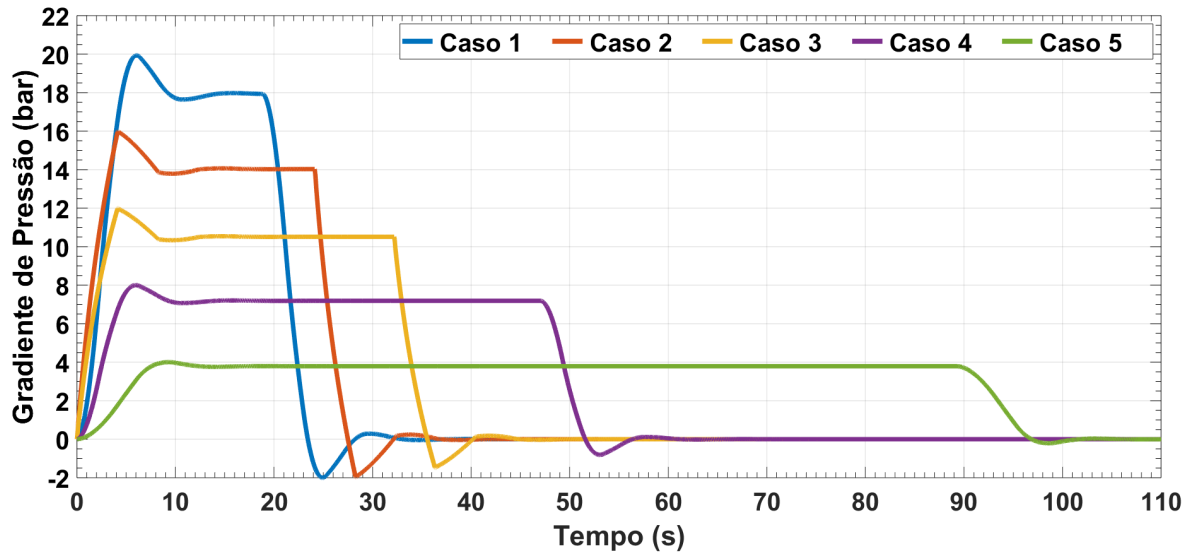


Figura 34: Gradientes de pressão resultantes de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis trapezoidais otimizados de velocidade para caso de três restrições.

de pressão permitidos. A velocidade axial da coluna de perfuração foi limitada a $1m/s$ enquanto a aceleração desta pode chegar ao valor máximo de $0.1m/s^2$.

Primeiramente realizaram-se testes com perfis parabólicos de velocidade. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10 e nas Figuras 35 a 37.

Tabela 10: Manobra de inserção da coluna de perfuração. Otimização do perfil parabólico de velocidade em caso de cinco restrições.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
$\Delta P_{max}^+[bar]$	20.00	16.00	12.00	8.00	4.00
$\Delta P_{max}^-[bar]$	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00
$V_{max}[m/s]$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$a_{max}[m/s^2]$	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
$t_{op}[s]$	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

Na Tabela 10 observa-se que a velocidade foi limitada para os testes em que o máximo gradiente positivo assume os valores de $16bar$ e $20bar$, casos 1 e 2. Como o valor de pico da velocidade é definido pelos coeficientes a e b e pela restrição de área sob a curva, destaca-se que para um mesmo valor de pico, mantendo-se a área sob a curva constante, tais coeficientes serão sempre os mesmos. Com isso nota-se que para esses dois testes os

resultados são os mesmos que para uma operação de retirada da coluna de perfuração, diferindo apenas nos gradientes de pressão gerados (Tabela 6).

Com relação às restrições ativas em cada um dos testes pode-se afirmar que a de máximo gradiente positivo de pressão se mostrou decisiva nos casos 3 a 5. Nos outros dois casos, como já destacado, a restrição ativa foi a de máxima velocidade operacional, como pode ser observado na Figura 35.

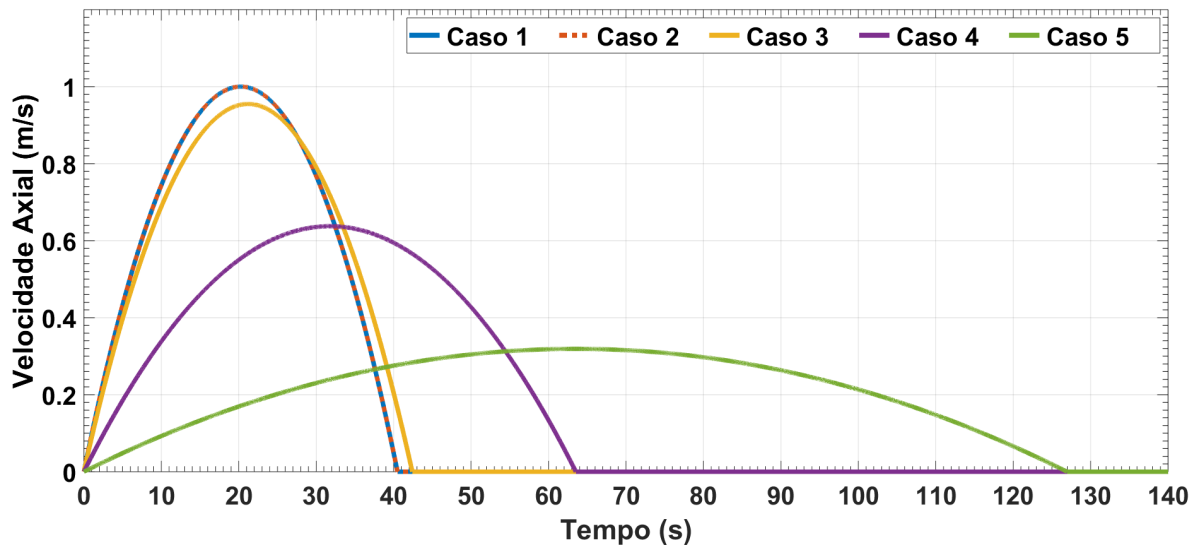


Figura 35: Perfis parabólicos ótimos de velocidade para manobras de inserção da coluna de perfuração em casos de cinco restrições.

A Figura 35 apresenta os perfis de velocidade resultantes do procedimento de otimização. Nota-se que em dois testes a velocidade de operação atinge o valor máximo. Para estes testes, embora as janelas operacionais de pressão sejam diferentes, as respostas obtidas através do modelo de otimização são idênticas.

Assim como observado nos testes de retirada da coluna de perfuração com perfil parabólico de velocidade, para a inserção os testes em que a limitação de velocidade não ocorreu também se mantiveram os mesmos que os obtidos em testes com apenas três restrições implementadas.

As Figuras 36a e 36b apresentam, respectivamente, o deslocamento axial e a aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo. Embora as restrições de aceleração não se mostrem efetivamente ativas, destaca-se que a relação entre as variáveis faz com que a aceleração seja diminuída com a redução da velocidade.

Os gradientes de pressão resultantes da realização da manobra podem ser observados na Figura 37 onde verifica-se que as restrições relativas aos gradientes de pressão

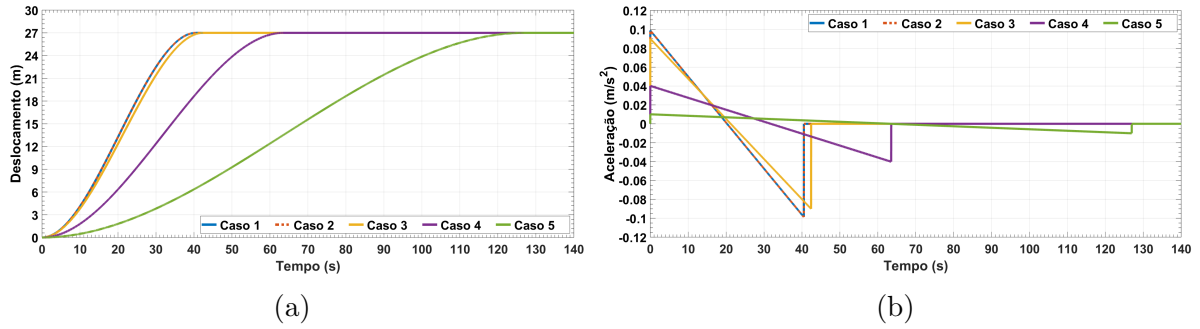


Figura 36: Otimização de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis parabólicos de velocidade e cinco restrições. Apresentação do (a) deslocamento e da (b) aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo.

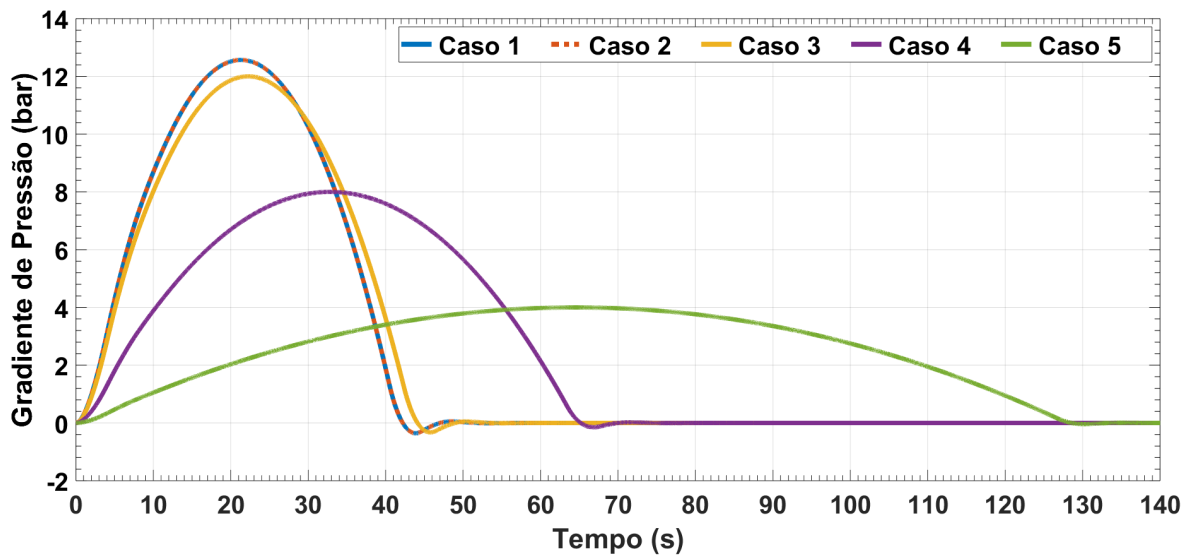


Figura 37: Gradientes de pressão resultantes de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis parabólicos otimizados de velocidade para caso de cinco restrições.

são satisfeitas.

Os resultados obtidos para a otimização de manobras de inserção da coluna de perfuração com perfis trapezoidais de velocidade são apresentados na Tabela 11 e nas Figuras 38 a 40.

Pode-se observar na Tabela 11 que nos testes realizados dois deles forem limitados em velocidade, quatro em aceleração e três em gradiente de pressão.

A Figura 39a e 39b ilustram o deslocamento axial da coluna de perfuração e sua aceleração ao longo do tempo, enquanto os gradientes de pressão resultantes desta movimentação são apresentados na Figura 40. Nesta última, destaca-se que os testes não limitados em velocidade atingem os limites de máximo gradiente positivo de pressão estipulados.

Tabela 11: Manobra de inserção da coluna de perfuração. Otimização do perfil trapezoidal de velocidade em caso de cinco restrições.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
ΔP_{max}^+ [bar]	20.00	16.00	12.00	8.00	4.00
ΔP_{max}^- [bar]	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00
V_{max} [m/s]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
a_{max} [m/s ²]	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
t_{op} [s]	37.00	37.00	38.39	50.75	95.37
t_a [s]	10.00	10.00	9.27	6.10	5.85
t_c [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
ΔP^+ [bar]	12.91	12.91	12.00	8.00	4.00
ΔP^- [bar]	-0.37	-0.37	-0.37	-0.41	-0.22

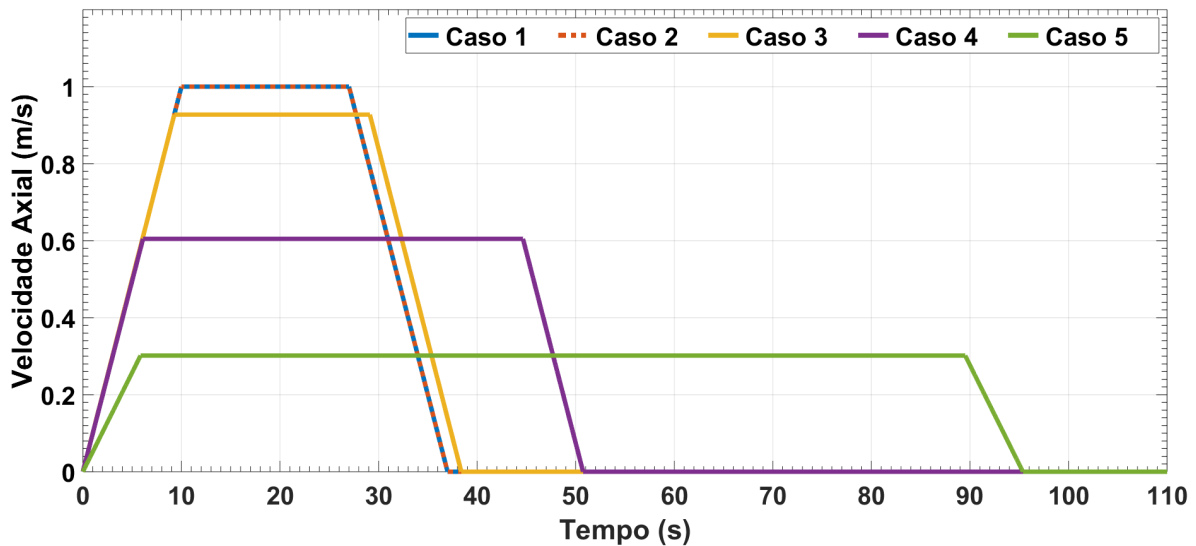


Figura 38: Perfis trapezoidais ótimos de velocidade para manobras de inserção da coluna de perfuração em casos de cinco restrições.

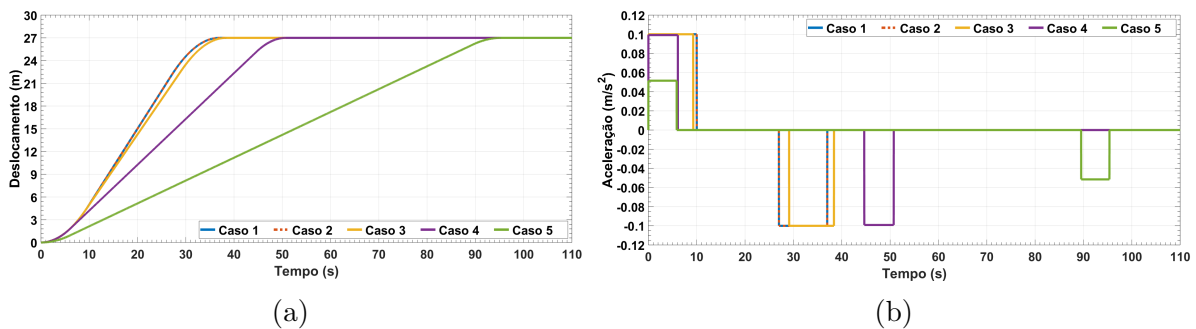


Figura 39: Otimização de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis trapezoidais de velocidade e cinco restrições. Apresentação do (a) deslocamento e da (b) aceleração da coluna de perfuração ao longo do tempo.

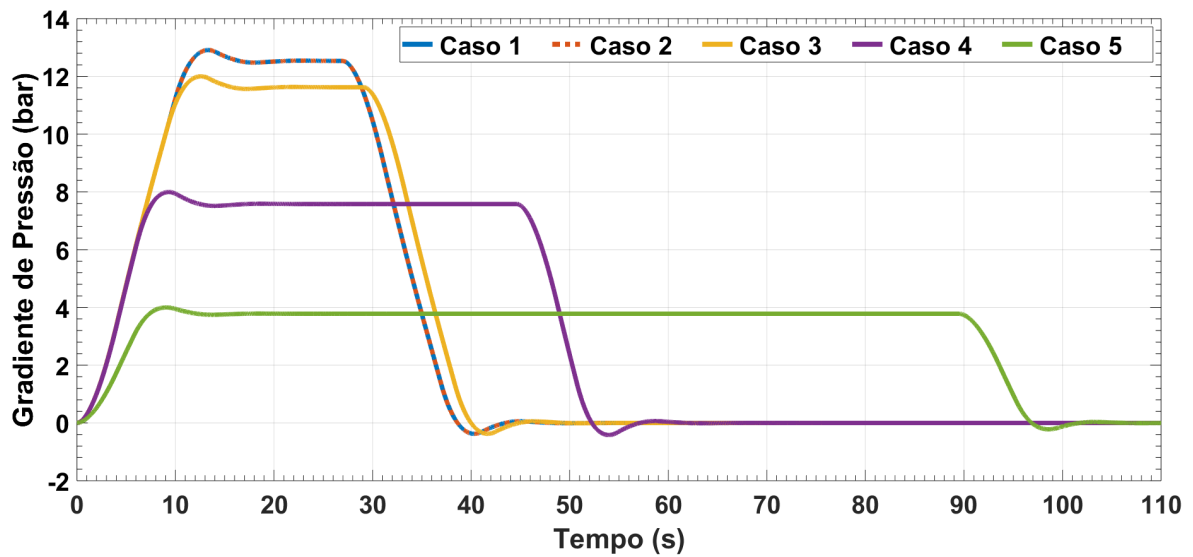


Figura 40: Gradientes de pressão resultantes de manobra de inserção da coluna de perfuração com perfis trapezoidais otimizados de velocidade para caso de cinco restrições.

4.5.3 ANÁLISE DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Esta seção se destina a apresentar os dados referentes ao procedimento de otimização em termos de solução através das ferramentas de otimização. Dentre as informações apresentadas destaca-se o número de iterações necessárias para que o ponto ótimo fosse alcançado a partir de um ponto inicial definido aleatoriamente, o número de avaliações da função objetivo, o quanto as restrições foram violadas, o grau de otimalidade da resposta e o tempo total de processamento para cada um dos casos otimizados. Todos os procedimentos foram realizado com o uso de um computador Dell Inspiron 5448 cujo processador é um Intel Core i7-5500U CPU @ 2.40GHz.

A Tabela 12 apresenta as informações referentes à manobra de retirada da coluna de perfuração com perfis parabólicos de velocidade. Dos cinco casos ensaiados observa-se que o caso 3 foi o que requiriu o maior número de iterações e avaliações da função objetivo. Conseqüentemente este foi o caso que exigiu maior tempo de processamento. O caso que menos exigiu processamento computacional foi o quinto, com 14 iterações e 312 segundos para chegar ao ponto ótimo. O tempo total de processamento para os cinco casos apresentados é de aproximadamente dez horas e 47 minutos.

Dentre os casos apresentados na Tabela 12, destaca-se que o que apresentou o melhor indicativo de otimalidade é o segundo caso, em que a otimalidade de primeira ordem apresentou o menor valor ($1.76e - 07$). A resposta que ficou mais distante do ponto ótimo é apresentada no caso 5. Este caso é, também, o qual apresentou a maior

violação relativa das restrições implementadas.

Tabela 12: Manobra de retirada da coluna de perfuração. Dados de otimização do perfil parabólico de velocidade.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
Iterações	173	49	201	32	14
Avaliações da função obj.	1669	479	2154	297	49
Violação das Restrições	2.13e-14	1.77e-13	2.13e-14	9.23e-14	9.17e-12
Otimalidade de 1ª Ordem	8.58e-07	1.76e-07	5.70e-06	7.45e-05	2.23e-05
Tempo de Processamento [s]	1.01e+04	1.38e+03	1.28e+04	1.84e+03	3.12e+02

Já a Tabela 13 apresenta os dados referentes aos procedimentos de otimização para a retirada da coluna de perfuração com um perfil trapezoidal de velocidade. Nela observa-se que o número de iterações necessárias, assim como as avaliações da função objetivo e os tempos de operação, se apresentam menores que para os perfis parabólicos avaliados anteriormente. Outra característica que merece destaque é a não violação das restrições em quatro dos cinco casos otimizados. Outra informação que merece destaque é a ocorrência de indicadores de otimalidade bem distantes do valor ideal zero. Isso sugere que os resultados obtidos em termos de otimização dos perfis de velocidade axial encontram-se distantes dos valores ótimos para os casos 1 e 5.

Tabela 13: Manobra de retirada da coluna de perfuração. Dados de otimização do perfil trapezoidal de velocidade.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
Iterações	26	19	71	42	36
Avaliações da função obj.	129	69	235	208	144
Violação das Restrições	6.96e-06	0	0	0	0
Otimalidade de 1ª Ordem	10.76	9.30e-09	4.00e-05	1.83e-06	0.2114
Tempo de Processamento [s]	8.27e+02	4.45e+02	1.58e+03	1.38e+03	9.99e+02

O tempo total de processamento, para otimização dos perfis trapezoidais de velocidade forma cerca de dez vezes menores que para os perfis parabólicos, para o mesmo tipo de manobra, totalizando aproximadamente uma hora e 30 minutos de processamento. Assim, destaca-se que mais de 12 horas de processamento se mostraram necessárias para a otimização de dez diferentes procedimentos de retirada da coluna de perfuração. Um total de 663 iterações e 5433 avaliações da função objetivo foram executadas.

As informações referentes aos procedimentos de otimização de manobras de inserção da coluna de perfuração são, por sua vez, apresentadas nas Tabelas 14 e 15.

Na Tabela 14 encontram-se os dados referentes aos procedimentos de otimização com perfis parabólicos de velocidade, e nela observa-se que muitas iterações e avaliações

foram necessárias nos casos 1 e 2. Por outro lado destaca-se que o caso 3 requiriu apenas duas iterações para atender os critérios de parada dos algoritmos de otimização. Entretanto observa-se, através do indicador de otimalidade que a resposta encontrada no caso 3 se encontra muito distante do ponto ótimo. O tempo total de processamento para a otimização dos cinco casos apresentados com perfis parabólicos é de aproximadamente quatro horas, o que é menos de 40% do tempo gasto para a otimização da retirada com perfis da mesma forma.

Tabela 14: Manobra de inserção da coluna de perfuração. Dados de otimização do perfil parabólico de velocidade.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
Iterações	112	271	2	13	10
Avaliações da função obj.	1110	2912	40	47	35
Violação das Restrições	2.13e-14	7.10e-15	6.11e-09	1.38e-12	1.03e-11
Otimalidade de 1ª Ordem	1.58e-06	1.16e-05	1.56e+04	1.40e-06	2.39e-05
Tempo de Processamento [s]	3.76e+03	9.91e+03	1.38e+02	1.71e+02	1.20e+02

Por fim, a Tabela 15 apresenta as informações dos procedimentos de otimização da inserção da coluna de perfuração com perfis trapezoidais de velocidade. Mais uma vez observa-se que o número de iterações e de avaliações da função objetivo são menores, assim como os tempos de operação. Destaca-se que os resultados obtidos para os casos 4 e 5 apresentam os piores indicativos de otimalidade. O tempo total de processamento para os cinco casos apresentados é de aproximadamente 23 minutos.

Tabela 15: Manobra de inserção da coluna de perfuração. Dados de otimização do perfil trapezoidal de velocidade.

-	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
Iterações	15	11	12	38	9
Avaliações da função obj.	84	65	47	146	55
Violação das Restrições	0	0	0	0	0
Otimalidade de 1ª Ordem	3.35e-09	9.82e-07	1.77e-06	0.7808	0.0999
Tempo de Processamento [s]	2.95e+02	2.29e+02	1.64e+02	5.09e+02	1.94e+02

A fim de verificar a influência do ponto inicial no tempo total de processamento, realizaram-se otimizações com diferentes valores de x_0 mantendo-se os demais parâmetros constantes. Conhecendo-se o ponto ótimo, em que $t_{op} = 63.5392s$, configuraram-se pontos iniciais que distanciavam 50%, 30% e 10%, para mais e para menos, com relação a este. Os resultados destes testes são sumarizados na Tabela 16.

Os resultados apresentados na Tabela 16 evidenciam que para pontos iniciais superiores ao ponto ótimo, a demanda computacional é muito maior. Isso deixa claro que a escolha certa do ponto inicial de busca reflete em tempo final de processamento.

Tabela 16: Inserção da coluna de perfuração. Testes com diferentes pontos iniciais (x_0).

-	50%	80%	90%	110%	130%	150%
Iterações	11	9	9	54	124	83
Avaliações da função ob.	39	32	31	512	1301	864
Violação das Restrições	1.7e-12	1.7e-12	8.7e-13	4.0e-13	2.2e-13	1.2e-12
Otimalidade de 1^a Ordem	3.2e-06	1.3e-05	3.1e-05	7.6e-05	1.0e-04	1.5e-04
Tempo de Processamento	1.3e+02	1.1e+02	1.1e+02	1.9e+03	4.6e+03	2.9e+03

4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO 4

No presente capítulo definiu-se o modelo de otimização, com seus parâmetros, suas variáveis de decisão, restrições e função objetivo. O modelo foi implementado utilizando-se as bibliotecas de otimização do *software* Matlab[®]. Testes de manobras de retirada e inserção da coluna de perfuração ao interior do poço foram realizados. Primeiramente apenas restrições referentes aos gradientes de pressão e ao deslocamento total da coluna de perfuração foram consideradas. Em seguida implementaram-se as restrições de máximos valores operacionais de velocidade e aceleração da coluna de perfuração e, então, os testes foram refeitos.

Os resultados de otimização demonstram que quanto mais larga é janela operacional de pressão, mais rápida pode ser executada a manobra. Demonstram, ainda, que em casos onde os limites de velocidade e aceleração não foram definidos, as respostas do modelo, embora as restrições fossem obedecidas, geraram valores operacionalmente infactíveis. A inserção de restrições de velocidade e aceleração tornaram o espaço de buscas melhor limitado as respostas do modelo mais confiáveis do ponto de vista operacional.

Analisando as informações referentes aos procedimentos de otimização verificou-se que a escolha por perfis trapezoidais de velocidade significam menores tempos de processamento. A definição de pontos iniciais menores que os possíveis pontos de operação ótimos se mostrou mais eficiente em termos de redução dos tempos de processamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi desenvolvido um modelo de otimização de processos com o intuito de minimizar o tempo 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 realização de manobras. A implementação foi realizada utilizando-se das ferramentas de otimização do *software* Matlab[®].

A solução do problema é baseada na aplicação do método das características e diferenças finitas para a resolução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento. A geometria é considerada constante de forma que o domínio do problema é representado por duas tubulações de diâmetros distintos posicionadas concêntricamente. Tanto o escoamento no interior da coluna de perfuração quanto no espaço anular são representados. Não considera-se a existência de broca ou equipamentos instalados ao longo da coluna, de forma que as perdas de carga localizadas são negligenciadas. As extremidade superiores da coluna de perfuração e do espaço anular são considerados abertos para a atmosfera e o nível de fluido no interior do poço é dito constante ao longo de todo o processo.

O fluido é considerado newtoniano de alta viscosidade. As características de compressibilidade, viscosidade e tensão limite de escoamento são tomadas como constantes ao longo do domínio do problema e ao longo do tempo. O escoamento é modelado como unidimensional, laminar e isotérmico em que os efeitos viscosos são avaliados através do conceito de fator de atrito. A existência de cascalhos ou influxos de hidrocarbonetos é desconsiderada, de forma que a densidade da lama é constante em todo o domínio.

O modelo matemático desenvolvido possibilita o estudo dos gradientes de pressão resultantes da movimentação axial da coluna de perfuração. Simulações de retirada e inserção da coluna podem ser realizadas utilizando-se perfis parabólicos ou trapezoidais

de velocidade axial. Procedimentos de otimização, em que o tempo de operação é minimizado, podem ser realizados informando-se o tipo de manobra a ser executado, o perfil de velocidade desejado e os limites de máximos gradientes positivos e negativos permitidos. Restrições operacionais de máxima velocidade axial e máxima aceleração da coluna de perfuração também devem ser configuradas.

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. Enquanto em movimento uniformemente acelerado, a taxa de variação da pressão apresenta-se crescente e, no momento em que a aceleração cessa, passando-se para uma condição de movimento uniforme, esta taxa torna-se decrescente, tendendo a zero, e a um valor de pressão de regime permanente.

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 estreitamento do espaço anular resultam em maiores gradientes de pressão e maiores taxas de dissipação de energia. Esses aumentos são associados 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 espaço 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. Testes foram realizados com três ou cinco restrições implementadas. Os testes realizados com apenas três restrições levavam em consideração apenas os gradientes positivos e negativos de pressão admitidos e o deslocamento total da coluna de perfuração. Para testes com cinco restrições, acrescentaram-se às restrições originais, as limitações operacionais em termos de máxima velocidade axial e máxima aceleração da coluna de perfuração.

Os procedimentos de otimização com três restrições se apresentaram efetivos e não ocorreram violação destas. No entanto soluções ineficazes em termos de aceleração da coluna de perfuração foram encontradas, especificamente para perfis trapezoidais de velocidade. Com isso, a necessidade de restrições que descrevessem melhor o processo e de um espaço de busca das soluções mais refinado ficou evidente. A inserção de novas restrições fez com que as respostas obtidas com o procedimento de otimização se tornassem factíveis e mais confiáveis.

Por fim, conclui-se que o modelo de otimização desenvolvido e apresentado neste documento pode ser efetivo na minimização dos tempos de operação em manobras e auxiliar na redução do tempo não produtivo em procedimentos de perfuração de poços de petróleo. Os resultados obtidos pelo modelo podem ser utilizados por operadores sendo ferramenta de auxílio para sistemas de controle avançado em processos automatizados de perfuração.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Consideração de fluidos de perfuração não newtonianos;
- Consideração da broca e de equipamentos instalados ao longo da coluna de perfuração, bem como alterações de geometria do poço;
- Consideração das propriedades elásticas da coluna de perfuração e das paredes do poço (formação);
- Reformulação do modelo de otimização para possibilitar avaliação de variáveis de folga para as restrições implementadas;
- Realizar a otimização funcional da velocidade, permitindo que a ferramenta de otimização defina a forma de onda desta.

APÊNDICE A – INTERFACE GRÁFICA

Uma interface gráfica foi implementada com o objetivo de facilitar ao usuário a utilização da ferramenta de simulação e otimização desenvolvida ao longo da realização deste trabalho. Para tanto utilizou-se a ferramenta GUIDE do *software* Matlab. A Figura 41 apresenta a interface como um todo e nela se pode configurar todas os parâmetros do modelo, simular e otimizar manobras de inserção e retirada da coluna de perfuração, bem como observar os resultados destas operações.

No quadro denominado *Parâmetros Operacionais* o usuário poderá definir se a manobra realizada será uma operação de retirada ou uma inserção da coluna de perfuração. Poderá, ainda, definir o perfil de velocidade a ser utilizado: trapezoidal ou parabólico.

A geometria do poço deverá ser configurada no quadro denominado *Parâmetros Geométricos*. Nele o usuário definirá a profundidade do poço através do parâmetro L , o diâmetro interno da coluna de perfuração (D_{col}) e os diâmetros interno ($D_{anul_{int}}$) e externo ($D_{anul_{ext}}$) do espaço anular. De forma similar as informações referentes à reologia do fluido, são elas densidade, viscosidade e velocidade característica de propagação da onda de pressão no fluido, deverão ser informadas nos campos correspondentes no quadro *Parâmetros Reológicos*.

Parâmetros referentes ao processo de solução pelo método das características também devem ser configurados. O número de volumes de controle que irão compor o domínio da solução é definido através do parâmetro NZ . Observa-se que quanto maior for o número de volumes de controle mais precisa é a resposta em termos de gradientes de pressão. No entanto, quanto maior for este número maior será a carga computacional e mais demorado será o procedimento de simulação ou otimização. Destaca-se que a utilização de em torno de 150 volumes de controle para cada mil metros de profundidade do poço resulta em uma boa relação de precisão e tempo de processamento.

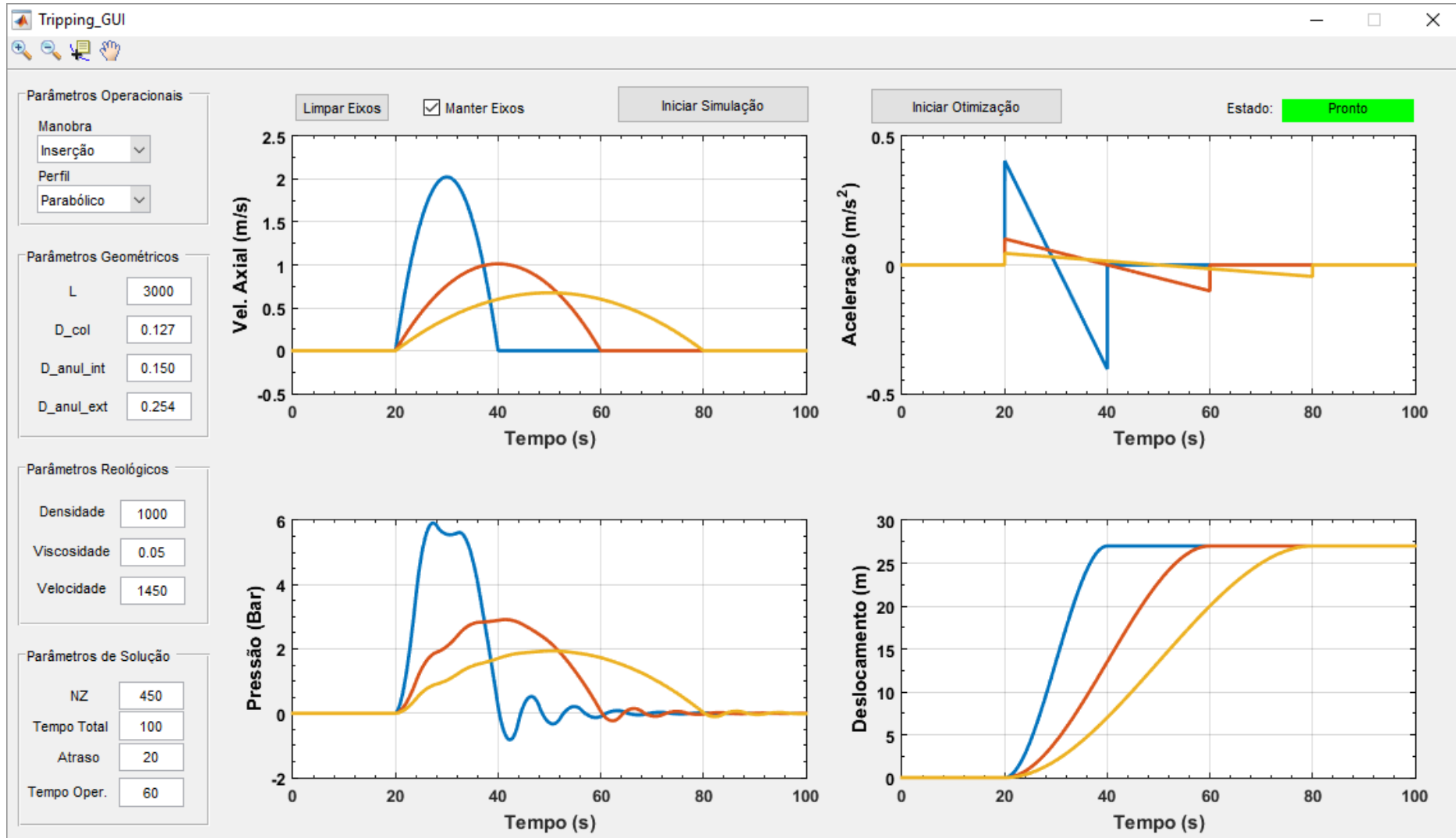


Figura 41: Interface gráfica da ferramenta de simulação e otimização de manobras.

Além do número de volumes de controle o usuário deverá também configurar o tempo total de simulação, o tempo de atraso, caso seja de seu interesse, e o tempo de operação.

Com relação ao tempo de operação destaca-se que tem funções diferentes em procedimentos de simulação e de otimização. Em simulações de manobras, o valor definido no parâmetro *Tempo Oper* definirá o tempo gasto para a realização de uma manobra e definirá o perfil de velocidade simulado. Já no modo de otimização, o valor contido em *Tempo Oper* será utilizado para definir a semente, chute inicial, do procedimento de otimização.

Após a configuração dos parâmetros, procedimentos de simulação ou otimização de manobras podem ser realizados clicando-se nos botões *Iniciar Simulação* ou *Iniciar Otimização*, respectivamente. Ao fim de cada procedimento os resultados serão apresentados em quatro gráficos, um trassando o perfil de velocidade axial da coluna de perfuração, outros sua aceleração e seu deslocamento ao longo do tempo. Por fim, a apresentação do gradiente de pressão resultante da movimentação da coluna de perfuração é realizada. Caso deseje-se observar os resultados de duas ou mais simulações consecutivas basta marcar o campo *Manter Eixos*. Já para apagar os resultados de simulações ou otimizações realizadas anteriormente, o usuário deverá clicar no botão *Limpar Eixos*.

Em caso da realização de um procedimento de otimização de manobra ser solicitado através do botão *Iniciar Otimização*, uma segunda janela surgirá (Figura 42), e nela o usuário deverá informar as restrições operacionais do processo.

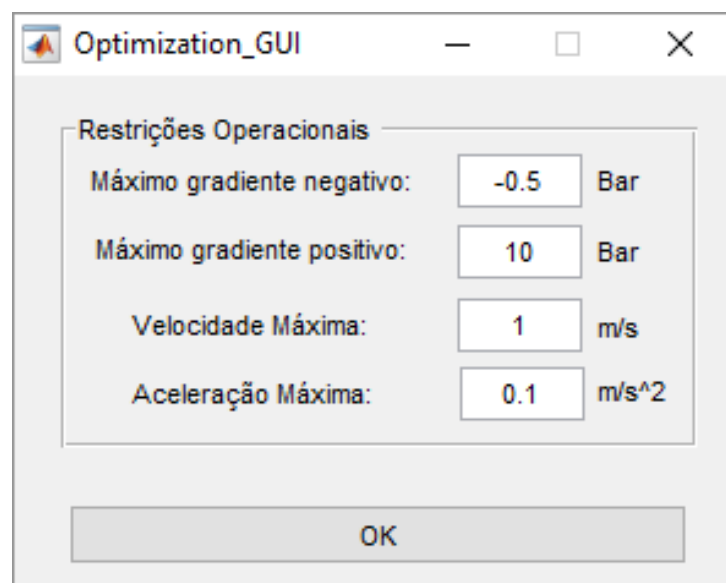


Figura 42: Janela de configuração das restrições operacionais.

Campos para a definição dos máximos gradientes negativo e positivo de pressão estarão disponíveis, bem como campos para a informação dos máximos valores operacionais de velocidade axial e aceleração da coluna de perfuração. Ao se clicar no botão *OK* o procedimento de otimização será iniciado e os resultados apresentados nos gráficos da janela principal da ferramenta em forma de curvas pontilhadas.

Na extremidade superior esquerda encontram-se ferramentas através das quais se pode aplicar *zoom* aos gráficos, ferramenta cursor e de arrasto. Na extremidade superior direita encontra-se o indicador do estado atual da ferramenta. São três os possíveis estados: simulando, otimizando e pronto.

REFERÊNCIAS

- ALBERT, A. et al. Suppressing pressure oscillations in offshore drilling: Control design and experimental results. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, IEEE, v. 23, n. 2, p. 813–819, 2015.
- ALHAMMADI, H. Y. A systematic procedure for optimizing crude oil distillation systems. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 25, p. 169 – 174, 2008. ISSN 1570-7946. 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering.
- ALVAREZ-RAMIREZ, J.; VALENCIA, J.; PUEBLA, H. Multivariable control configurations for composition regulation in a fluid catalytic cracking unit. **Chemical Engineering Journal**, v. 99, n. 3, p. 187 – 201, 2004. ISSN 1385-8947.
- ANDERSON, J. **Modern Compressible Flow: With Historical Perspective**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1990. (McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering). ISBN 9780070016736.
- BING, Z.; KAIJI, Z. Dynamic model predicts well bore surge and swab pressures. **Oil and Gas Journal**, Tulsa, Okla.: Petroleum Pub. Co., [1910?-, v. 94, n. 53, p. 74–77, 1996.
- BING, Z.; KAIJI, Z.; QIJI, Y. Equations help calculate surge and swab pressures in inclined wells. **Oil and Gas Journal**, v. 93, n. 38, 1995.
- BOURGOYNE, A. J. et al. **Applied drilling engineering**. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, 1986.
- BURKHARDT, J. et al. Wellbore pressure surges produced by pipe movement. **Journal of petroleum technology**, Society of Petroleum Engineers, v. 13, n. 06, p. 595–605, 1961.
- CANNON, G. E. et al. Changes in hydrostatic pressure due to withdrawing drill pipe from the hole. In: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Drilling and Production Practice**. [S.l.], 1934.
- CLARK-JR, E. Bottom-hole pressure surges while running pipe. **Pet. Eng. Int**, v. 27, 1955.
- COKER, I. C. et al. Managed pressure drilling applications index. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. **Offshore Technology Conference**. [S.l.], 2004.
- CRAIG, I. et al. Control in the process industries. **The impact of control technology**, IEEE Control Systems Society, 2011.
- FONTENOT, J. E.; CLARK, R. et al. An improved method for calculating swab and surge pressures and circulating pressures in a drilling well. **Society of Petroleum Engineers Journal**, Society of Petroleum Engineers, v. 14, n. 05, p. 451–462, 1974.

FOSS, B. Process control in conventional oil and gas fields: Challenges and opportunities. **Control Engineering Practice**, Elsevier, v. 20, n. 10, p. 1058–1064, 2012.

GJERSTAD, K. et al. Automatic prediction of downhole pressure surges in tripping operations. In: **IPTC 2013: International Petroleum Technology Conference**. [S.l.: s.n.], 2013.

GJERSTAD, K. et al. A medium-order flow model for dynamic pressure surges in tripping operations. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE/IADC Drilling Conference**. [S.l.], 2013.

GOINS-JR, W. et al. Down-the-hole pressure surges and their effect on loss of circulation. In: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Drilling and Production Practice**. [S.l.], 1951.

HELGESTAD, D.-E. **The Drilling Process: A Plantwide Control Approach**. [S.l.]: June, jun. 2010.

HORN, A. et al. Well blowouts in california drilling operations causes and suggestions for prevention. In: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Drilling and Production Practice**. [S.l.], 1950.

IADC. **Oil & Gas Drilling Glossary**. 2015. International Association of Drilling Contractors. Disponível em: <<http://www.iadclericon.org/glossary/>>.

IANCU, M.; CRISTEA, M. V.; AGACHI, P. S. An advanced control solution for a fluid catalytic cracking unit: distributed model predictive control. **Computer Aided Chemical Engineering**, Elsevier, London, jun. 2012. 22th European Symposium on Computer Aided Process Engineering.

JORGE, N. d. M.; SANTOS, O. **An unsteady state model for estimating swab pressure and gas production when tripping in horizontal wells**. [S.l.], 1995.

KAASA, G.-O. et al. Intelligent estimation of downhole pressure using simplified hydraulic model. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference & Exhibition**. [S.l.], 2011.

KARTHIKA, V.; BRIJET, Z.; BHARATHI, N. Design of optimal controller for fluid catalytic cracking unit. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 38, p. 1150–1160, 2012.

KHAN, A. **Riserless drilling (managed pressure drilling)**. Dissertação (Mestrado) — University of Stavanger, Norway, 2012.

KOSMIDIS, V. D.; PERKINS, J. D.; PISTIKOPOULOS, E. N. Optimization of well oil rate allocations in petroleum fields. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, ACS Publications, v. 43, n. 14, p. 3513–3527, 2004.

LAL, M. et al. Surge and swab modeling for dynamic pressures and safe trip velocities. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **IADC/SPE Drilling Conference**. [S.l.], 1983.

- LANDET, I. S. et al. Modeling for mpd operations with experimental validation. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition**. [S.l.], 2012.
- LANDET, I. S.; PAVLOV, A.; AAMO, O. M. Modeling and control of heave-induced pressure fluctuations in managed pressure drilling. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1340–1351, 2013.
- LUBINSKI, A.; HSU, F. H.; NOLTE, K. G. Transient pressure surges due to pipe movement in an oil well. **Revue de l'Institut Français du Pétrole**, v. 32, n. 3, p. 307–348, 1977.
- LUENBERGER, D. G.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming**. 4th. ed. [S.l.]: Springer, 2008.
- MAGATÃO, L. **Programação matemática aplicada à otimização das operações de um poço**. Tese (Doutorado) — Dissertação. Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- MAGATÃO, L. **Otimização de Sistemas**. Curitiba-PR, 2017.
- MAHDIANFAR, H.; PAVLOV, A.; AAMO, O. M. Joint unscented kalman filter for state and parameter estimation in managed pressure drilling. In: IEEE. **Control Conference (ECC), 2013 European**. [S.l.], 2013. p. 1645–1650.
- MALLOY, K. P. et al. Managed-pressure drilling: What it is and what it is not. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. [S.l.], 2009.
- MITCHELL, R. Dynamic surge/swab pressure predictions. **SPE (Society of Petroleum Engineers) Drill. Eng.; (United States)**, v. 3:3, Sep 1988.
- NANDAN, A.; IMTIAZ, S.; BUTT, S. Robust control of managed pressure drilling. In: IEEE. **Oceans-St. John's, 2014**. [S.l.], 2014. p. 1–8.
- NOCEDAL, J.; WRIGHR, S. J. **Numerical Optimization**. 2nd. ed. [S.l.]: Springer, 2006.
- OLIVEIRA, G. M. d. **Modelagem da propagação de pressão no reinício do escoamento de fluidos de perfuração não gelificados**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.
- PETERSEN, J. et al. A general dynamic model for single and multi-phase flow operations during drilling, completion, well control and intervention. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition**. [S.l.], 2008.
- POPA, C. Application of plantwide control strategy to the catalytic cracking process. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 69, p. 1469–1474, 2014.
- REITSMA, D. G.; COUTURIER, Y. New choke controller for managed pressure drilling. **IFAC Proceedings Volumes**, Elsevier, v. 45, n. 8, p. 223–230, 2012.

RIBEIRO, C. et al. Model predictive control with quality requirements on petroleum production platforms. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Elsevier, v. 137, p. 10–21, 2016.

ROHANI, M. R. Managed pressure drilling: Techniques and options for improving operational safety and efficiency. **Petroleum & Coal**, v. 54, n. 1, 2012.

ROHSENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; GANIC, E. N. **Handbook of heat transfer fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1985.

SAMPAIO-JR, J. Aplicativo para estimativa de surge e swab para cenários udw/formações frágeis. **Relatório Técnico-CT TEP**, v. 22, p. 2002, 2002.

SAMUEL, G. R. et al. Field validation of transient swab-surge response with real-time downhole pressure data. **SPE drilling & completion**, Society of Petroleum Engineers, v. 18, n. 04, p. 280–283, 2003.

SAMUEL, R. Friction factors: What are they for torque, drag, vibration, bottom hole assembly and transient surge/swab analyses? **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Elsevier, v. 73, n. 3-4, p. 258–266, 2010.

SCHLUMBERGER. **Oilfield Glossary**. 2017. Disponível em: <<http://www.glossary.oilfield.slb.com/>>.

SHARMA, R.; FJALESTAD, K.; GLEMMESTAD, B. Optimization of lift gas allocation in a gas lifted oil field as non-linear optimization problem. **Modeling, Identification and Control**, Norsk Forening for Automatisering (NFA), v. 33, n. 1, p. 13, 2012.

SHI, B.; YANG, X.; YAN, L. Optimization of a crude distillation unit using a combination of wavelet neural network and line-up competition algorithm. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, 2017. ISSN 1004-9541.

SHI, X.; TONG, C.; WANG, L. Evolutionary optimization with adaptive surrogates and its application in crude oil distillation. In: **2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–8.

SHISHAVAN, R. A. et al. Multivariate control for managed pressure drilling systems using high speed telemetry. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. [S.l.], 2014.

SRIVASTAV, R. et al. Surge and swab pressures in horizontal and inclined wells. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **Spe latin america and Caribbean petroleum engineering conference**. [S.l.], 2012.

STAMNES, Ø. N.; KAASA, G.-O.; AAMO, O. M. Adaptive estimation of downhole pressure for managed pressure drilling operations. In: IEEE. **Intelligent Control (ISIC), 2011 IEEE International Symposium on**. [S.l.], 2011. p. 989–995.

SUI, D. et al. Ensemble methods for process monitoring in oil and gas industry operations. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, Elsevier, v. 3, n. 6, p. 748–753, 2011.

TARASEVICH, V. et al. Modelling of pressure fluctuations in a wellbore while tripping. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. [S.l.], 2015. p. V010T11A035–V010T11A035.

THOMAS, J. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. [S.l.]: Interciência, 2004. ISBN 9788571930995.

WAGNER, R. et al. Surge field tests highlight dynamic fluid response. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE/IADC Drilling Conference**. [S.l.], 1993.

WANG, P.; LITVAK, M. et al. Gas lift optimization for long-term reservoir simulations. In: ENGINEERING, S. R. E. . (Ed.). **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. [S.l.], 2008. p. 147 – 153.

WHITE, F. **Mecânica dos Fluidos - 6.ed.:** [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2010. ISBN 9788580550092.

WOLSKI, A.; JUNQUEIRA, S. L.; AO, C. O. N. A steady-state approach for evaluation of surge and swab pressures in flows with free surface boundary conditions. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 122, p. 208 – 215, 2014. ISSN 0920-4105.

WYLIE, E.; STREETER, V. **Fluid transients**. [S.l.]: McGraw-Hill International Book Co., 1978. (Advanced book program, v. 1977).

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L.; SUO, L. **Fluid transients in systems**. [S.l.]: Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1993.

YANG, L.; CHUKWU, G. A. Couette flow of non-newtonian power-law fluids in narrow eccentric annuli. **Industrial & engineering chemistry research**, ACS Publications, v. 34, n. 3, p. 936–942, 1995.

ZAMANIPOUR, Z. **Automation of Tripping Operations in Directional Wellbores**. Tese (Doutorado) — University of Tulsa, 2015.

ZHOU, J.; NYGAARD, G. Control and estimation of downhole pressure in managed pressure drilling operations. In: IEEE. **Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), 2010 4th International Symposium on**. [S.l.], 2010. p. 1–6.