UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Engenharia Mecânica

Leopoldo Marques Manzatto

**Análise dinâmica de colunas de perfuração de poços de petróleo
usando controle de velocidade não-colocalizado.
(*Dynamic Analysis of Oilwell Drillstring Using Non-colocated Linear
Velocity Control*)**

São Carlos
2011

Leopoldo Marques Manzatto

**Análise dinâmica de colunas de perfuração de poços de petróleo
usando controle linear de velocidade não-colocalizado.**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Concentração – Dinâmica de Máquinas e Sistemas.

Orientador: Professor Doutor Marcelo Areias Trindade

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL
ENCONTRA-SE DISPONÍVEL
JUNTO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA
EESC-SP.

São Carlos
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP.

M296a	<p>Manzatto, Leopoldo Marques</p> <p>Análise dinâmica de colunas de perfuração de poços de petróleo usando controle linear de velocidade não-colocalizado / Leopoldo Marques Manzatto ; orientador Marcelo Areias Trindade. -- São Carlos, 2011.</p> <p>Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica das Máquinas e Sistemas) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.</p> <p>1. Perfuração de poços de petróleo. 2. Controle de vibrações torcionais. 3. Fenômeno de stick-slip. 4. Dinâmica de colunas de perfuração. 5. Controle de velocidade. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro LEOPOLDO MARQUES MANZATTO.

Dissertação defendida e julgada em 03/05/2011 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **MARCELO AREIAS TRINDADE** - (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Dr. **RODRIGO NICOLETTI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Dr. **JOSE MANOEL BALTHAZAR**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP/campus de Rio Claro)

Prof. Associado **MARCELO AREIAS TRINDADE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho aos meus pais Laerte e Marisa que sempre me incentivaram, ajudaram nos momentos corretos e acreditaram em mim e também a meu irmão Marcelo a quem gosto muito, me motiva, pois sempre haverá uma perspectiva diferente de ver as coisas.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a minha namorada Mariana que sempre esteve ao meu lado, incentivando e me permitiu dedicar um tempo precioso que com certeza nos trará frutos. Muito obrigado por estar ao meu lado.

Ao professor Marcelo não tenho com agradecer por todo o suporte, direcional e oportunidade de desenvolver este trabalho, ainda acima de tudo, pela paciência e instrução que foi essencial para a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer aos meus amigos de trabalho Paulo, Cesar e Valdinei que de uma forma ou de outra contribuíram com detalhes importantes e sugestões além de discussões preciosas. Agradeço também aos meus colegas, chefes e ex-chefes que mesmo sem saber contribuíram para esta realização, Francisco, Nilton, Fabio, Adriano, Evandro e Ângelo.

Agradeço as pessoas que participaram comigo nesta Jornada, em alguns momentos mais como ouvintes, porém essenciais, Moretti, Livia e Guilherme, meus tios Marcos e Nelson, que sempre me acompanharam e minha sogra Marise pelo apoio e incentivo.

Resumo

Manzatto, L. M. **Análise dinâmica de colunas de perfuração de poços de petróleo usando controle de velocidade não-colocalizado**. 2011. 111 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Este trabalho apresenta uma análise paramétrica da reposta dinâmica de colunas de perfuração de poços de petróleo com controle proporcional-integral de velocidade não colocalizado. A operação de perfuração de poços de petróleo e gás em águas profundas consiste na abertura de poços em solo rochoso através de uma broca cuja rotação é controlada por uma mesa rotativa na superfície. O torque imposto pela mesa é transmitido à broca por meio de uma coluna de perfuração. Particularmente no caso de perfuração em águas profundas, as colunas de perfuração podem ser muito extensas e, portanto, bastante flexíveis. As vibrações ocasionadas pela grande flexibilidade das colunas de perfuração são as principais responsáveis por falhas no processo de perfuração. Em particular, o fenômeno não-linear conhecido como stick-slip e relacionado às vibrações torcionais da coluna de perfuração, faz com que um sistema de controle projetado para manter a velocidade da mesa constante dê origem a grandes oscilações na velocidade da broca. Na prática, este fenômeno é amplificado pela inerente não-linearidade do contato entre broca e formação rochosa e pela forte não colocalização entre mesa rotativa e broca. Este trabalho tem por principal objetivo realizar uma análise paramétrica da dinâmica do processo de perfuração, usando um modelo de dois graus de liberdade para representar o conjunto mesa rotativa, coluna de perfuração e broca, para identificar condições nas quais uma lei de controle simples do tipo linear proporcional-integral pode fornecer um desempenho de perfuração estável e satisfatório.

Palavras-chave: Perfuração de poços de petróleo, controle de vibrações torcionais, fenômeno de stick-slip, dinâmica de colunas de perfuração, controle de velocidade.

Abstract

Manzatto, L. M. **Dynamics of oilwell drillstrings using non-colocated linear velocity control**. 2011. 111 p. Master's dissertation - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos.

This paper presents a parametric analysis of the dynamics of oilwell drillstrings with non-colocated proportional-integral velocity control. The drilling operation for oil and gas in deep waters consists of opening wells in rocky ground formation by a drill, whose angular speed is controlled by a rotary table at the surface. The torque applied by the table is transmitted to the drill-bit through the drillstring. Particularly in the deepwater drilling case, the drillstring can be very long and therefore very flexible. The vibrations caused by the great flexibility of drilling columns are mainly responsible for the failures in the drilling process. In particular, the nonlinear phenomenon known as stick-slip and related to the torsional vibration of the drillstring, makes that a control system designed to maintain a constant angular velocity at the table yield large variations at the drill-bit angular velocity. In practice, this phenomenon is amplified by the inherent nonlinearity of the contact between drill bit and rock formation and by the strong non-colocalization between rotary table and drill-bit. The main objective of this work is to perform a parametric analysis of the dynamics of the drilling process, using a two degrees of freedom model in order to represent the rotary table assembly, the drilling column and drill-bit, to identify conditions in which a simple control law, such as a linear proportional-integral velocity control, can provide a stable and satisfactory drilling performance

Key words: Oil well drilling, torcional vibration control, *stick-slip* phenomenon, drillstring dynamics, velocity control.

Sumário

CAPÍTULO 1	25
1 Introdução.....	25
1.1 O Que é a Perfuração.....	25
1.2 Principais Problemas na Perfuração	27
1.2.1 Modelos de Interação Entre a Broca e a Formação Rochosa.....	29
1.2.2 Modelos Dinâmicos de Perfuração	31
1.2.3 Técnicas de Controle de Vibrações na Perfuração.....	33
1.3 Motivação	38
1.4 Objetivos do Trabalho	38
CAPÍTULO 2.....	41
2 Modelo Dinâmico do Sistema.....	41
2.1 Interação Entre Broca e Formação Rochosa	42
2.2 Modelo Estrutural	44
2.3 Ajuste do Modelo Proposto.....	46
2.4 Descrição do Problema	49
2.5 Descrição da Estratégia de Controle.....	51
2.6 Validação do Modelo Proposto.....	52
2.7 Influência de Parâmetros Para Resposta do Sistema.....	54

CAPÍTULO 3	59
3 Análise Paramétrica	59
3.1 Dados de Entrada	59
3.2 Desvio Médio de Velocidade Angular na Broca	60
3.3 Taxa de Penetração Média Relativa.....	62
3.4 Tensão de Cisalhamento Máxima na Coluna.....	65
3.5 Desvio Máximo de Velocidade Angular na Broca.....	68
3.6 Torque Máximo na Broca	70
3.7 Potência Máxima Requerida do Motor	72
CAPÍTULO 4	77
4 Estratégias Para Melhoria do Desempenho de Perfuração	77
4.1 Identificação dos Padrões de Resposta no Tempo.....	77
4.2 Estratégias Para Melhoria do Desempenho de Perfuração	92
4.2.1 Variação de Parâmetros de Controle	95
4.2.2 Variação de Condições de Operação.....	97
4.2.3 Variação Conjunta de Parâmetros de Controle e Condições de Operação	100
4.2.4 Análise de Desempenho das Propostas Apresentadas.....	102
CAPÍTULO 5	105
5 Conclusão	105
Referências Bibliográficas.....	109

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores interpolados para utilização no modelo com 100 kN e 140 kN....	49
Tabela 2 – Valores numéricos de parâmetros típicos de perfuração	50
Tabela 3 – Principais conclusões de análise de critérios de desempenho.....	74
Tabela 4 – Valores de k_i e k_p para pontos selecionados.....	91
Tabela 5 – Taxa de penetração média (ROP) em m/h de pontos críticos escolhidos.	102

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema básico do sistema de perfuração de poços de petróleo. (Jansen e van den Steen, 1995)	26
Figura 2 – Vibrações de perfuração (Schlumberger, 2006).....	27
Figura 3 – Esquema demonstrativo de 1 GL para perfuração	42
Figura 4 – Modelo de atrito considerado para o torque na broca.	44
Figura 5 – Modelo 2 GDLs	45
Figura 6 - Curvas de torque versus velocidade angular obtidas com modelo proposto ajustado com parâmetros $a_2 = 1,5$, $a_1 = 0,7$, $\beta = 0,1$ e modelo de referência.....	47
Figura 7 – Curvas de torque versus velocidade angular obtidas com modelo proposto ajustado com parâmetros $a_2 = 1,2$, $a_1 = 0,9$, $\beta = 0,09$ e modelo de referência.....	48
Figura 8 - Curvas de torque versus velocidade angular obtidas com modelo proposto ajustado com parâmetros $a_2 = 1,65$, $a_1 = 0,55$, $\beta = 0,1$ e modelo de referência.....	49
Figura 9 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i = 100$ Nm e $k_p = 200$ Nms. Broca (tracejada) e mesa de rotativa (solida).....	52
Figura 10 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i = 100$ Nm e $k_p = 200$ Nms de Tucker e Wang (2003). Broca (tracejada) e mesa de torque (solida).....	53
Figura 11 - Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i = 100$ Nm e $k_p = 200$ Nms de Trindade e Sampaio (2005). Broca (tracejada) e mesa de torque (solida).....	53
Figura 12 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i = 200$ Nm e $k_p = 200$ Nms. Broca (tracejada) e mesa de torque (solida).....	55
Figura 13 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i = 50$ Nm e $k_p = 200$ Nms. Broca (tracejada) e mesa de torque (solida).....	55

Figura 14 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i=100$ Nm e $k_p=100$ Nms. Broca (tracejada) e mesa de torque (solida).....	56
Figura 15 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i=100$ Nm e $k_p=250$ Nms. Broca (tracejada) e mesa de torque (solida).....	56
Figura 16 – Desvio médio de velocidade angular da broca para diferentes valores de k_i e k_p	61
Figura 17 – Resultado 3D de velocidade média relativa para as nove condições de perfuração.....	62
Figura 18 – Taxa de penetração média relativa para diferentes valores de k_i e k_p	64
Figura 19 – Resultado 3D de profundidade perfurada relativa para as nove condições de perfuração	65
Figura 20 – Tensão de cisalhamento máximo na coluna para diferentes valores de k_i e k_p	66
Figura 21 - Resultado 3D de tensão de cisalhamento da coluna para as nove condições de perfuração.	68
Figura 22 –Desvio máximo de velocidade angular na broca para diferentes valores de k_i e k_p	69
Figura 23 – Desvio máximo de velocidade máxima absoluta para as nove condições de perfuração.....	70
Figura 24 – Torque máximo na broca para diferentes valores de k_i e k_p	71
Figura 25 - Gráfico 3D de Torque máximo aplicado para nove condições de perfuração.	72
Figura 26 – Potência máxima requerida do motor para diferentes valores de k_i e k_p . 73	
Figura 27 – Potência máxima requerida do motor em função dos parâmetros de controle para as diferentes condições de perfuração.....	74
Figura 28 – Desvio médio de velocidade (a), taxa de penetração relativa (b), torque máximo na broca (c), potência requerida para o motor (d), tensão de cisalhamento (e) e desvio máximo de velocidade (f) respectivamente para a condição de 100 kN e 100 RPM.	78
Figura 29 – Gráfico de contorno do desvio relativo de velocidade média para condição de 100 kN e 100 RPM.	80
Figura 30 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=40$ Nm e $k_p=751$ Nms (ponto 1).....	81

Figura 31 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=47,8$ Nm e $k_p=485,3$ Nms (ponto 2).....	82
Figura 32 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=407,2$ Nm e $k_p=16,6$ Nms (ponto 3).....	83
Figura 33 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=86,9$ Nm e $k_p=16,6$ Nms (ponto 4).....	84
Figura 34 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=438,5$ Nm e $k_p=360,4$ Nms (ponto 5).....	85
Figura 35 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=118,2$ Nm e $k_p=157,2$ Nms (ponto 6).....	86
Figura 36 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=86,94$ Nm e $k_p=344,8$ Nms (ponto 7).....	87
Figura 37 - Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=149,43$ Nm e $k_p=657,25$ Nms (ponto 8).....	88
Figura 39 – Gráfico de contorno dos desvios relativos de velocidade média.....	89
Figura 40 – Curvas de nível para o critério de desvio médio de velocidade angular para condições de perfuração de 120 kN com 80 RPM, 100 kN com 100 RPM e 80 kN com 120 RPM.	90
Figura 41 – Matriz de respostas no tempo para conjunto de dados peso na broca, velocidade angular na broca, k_i e k_p	92
Figura 42 – Resultados para condição de 120 kN e 80 RPM, com parâmetros de controle $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms.	93
Figura 43 - Matriz de repostas no tempo para conjunto de dados Peso na broca, rotação, k_i e k_p	94
Figura 44 – Resultados para condição de 120 kN e 80RPM, com parâmetros de controle $k_i=50$ Nm e $k_p=500$ Nms.	95

Figura 45 – Resultados para condição de 120 kN e 80 RPM, com parâmetros de controle $k_i=100$ Nm e $k_p=800$ Nms.	96
Figura 46 – Resultados para condição de 120 kN e 80 RPM, com parâmetros de controle $k_i=425$ Nm e $k_p=800$ Nms.	97
Figura 47 – Resultados para condição de 120 kN e 100 RPM, com parâmetros de controle $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms.	98
Figura 48 – Resultados para condição de 120 kN e 120 RPM, com parâmetros de controle $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms.	99
Figura 49 – Resultados para condição de 100 kN e 120 RPM, com parâmetros de controle $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms.	100
Figura 50 – Resultados para condição de 120 kN e 80 RPM (linhas verde continua e azul tracejada), para condição de 100 kN e 100 RPM (linhas vermelha continua e preta tracejada) com parâmetros de controle $k_i=50$ Nm e $k_p=500$ Nms.	101

Lista de Símbolos

ω_b	Velocidade angular da broca
ω_m	Velocidade angular na mesa de torque
θ_b	Deslocamento angular da broca.
θ_m	Deslocamento angular da broca.
$\ddot{\theta}_m$	Aceleração angular da mesa de torque
$\ddot{\theta}_b$	Aceleração angular da broca
δ	Divisão infinitesimal limite do modelo de atrito
J_b	Momento de inércia da broca.
J_m	Momento de inércia da mesa de torque.
J_c	Momento de inércia da coluna.
L	Comprimento da coluna com broca.
k_θ	Coeficiente de rigidez da coluna
c_θ	Coeficiente de amortecimento da coluna
F_b	Carga na Broca
T_b	Torque de atrito recebido na broca

T_m, T	Torque aplicado pelo motor
a_1, a_2	Parâmetros função da broca, formação rochosa e condição de operação para ajuste do modelo de atrito.
β	Coeficiente de decaimento
I_c	Segundo momento de área da seção transversal da coluna
D_c	Diâmetro externo da coluna
d_c	Diâmetro interno da coluna
G	Módulo de cisalhamento
R_0	Raio externo da coluna de perfuração
R_i	Raio interno da coluna de perfuração
ρ	Densidade de massa da coluna de perfuração.
E	Módulo de Young da coluna de perfuração
g	Aceleração da gravidade.
M_m	Massa efetiva na mesa de torque.
M_b	Massa efetiva na broca.
Ω	Velocidade angular alvo na mesa de torque
θ	Posição angular alvo na mesa de torque.
$TODT$	Torque de controle
k_p	Parâmetro proporcional de controle.
k_i	Parâmetro integral de controle.
t_i	Tempo inicial

t_f	Tempo final
a_1, a_2	Constantes que representam as características do solo.
A	Área da secção transversal da coluna de perfuração.
τ	Tensão de cisalhamento da coluna.
P	Potência requerida no motor.
J_1	Desvio Médio de Velocidade angular na Broca.
J_2	Taxa de penetração média relativa.
J_3	Tensão de cisalhamento máxima na coluna.
J_4	Desvio máximo de velocidade angular na broca.
J_5	Torque máximo na broca.
J_6	Potência máxima requerida do motor.

CAPÍTULO 1

1 Introdução

1.1 O Que é a Perfuração

A perfuração de poços de petróleo, conforme Jansen e van den Steen (1995) consiste na abertura de poços em solo rochoso com diâmetros numa faixa de aproximadamente 10 a 85 cm e profundidades que variam entre 0 a 5000 metros em busca de petróleo e gás. Para tal, um mecanismo de perfuração complexo envolvendo o acoplamento de um ou mais sistemas (elétrico, mecânico, hidráulico, etc.) é a ferramenta usualmente utilizada. Uma das partes mais importantes do mecanismo é a broca, que tem como papel principal quebrar a rocha e assim permitir a perfuração, criando uma interação dinâmica entre ela e a formação rochosa. A broca está mecanicamente conectada à coluna, que é a parte que transmite o torque do motor para a broca e também controla a profundidade de perfuração. A Figura 1 mostra o esquema básico do sistema de perfuração. A coluna, por possuir um grande comprimento se torna um conjunto muito flexível permitindo a interferência de vários modos de vibração que impactam diretamente no processo de perfuração. Na outra extremidade da coluna (parte superior), através

de uma mesa rotativa, um motor é responsável por fornecer o torque motriz de acordo com um sistema de controle de velocidade, conforme modelo esquemático Figura 1. No esquema, o conjunto de mesa de rotação representa todo o conjunto superior composto pelo motor, caixa de marchas e a própria mesa de rotação. Alguns sistemas mais comuns fazem uso de estabilizadores que são posicionados ao longo da coluna de perfuração com o objetivo de minimizar vibrações laterais. Além dos estabilizadores, é também utilizado um colar para auxiliar no direcionamento de perfuração, considerado como peça rígida de conexão entre a broca, coluna e espaçadores (Christoforou e Yigit, 2003). O conjunto de componentes formado os estabilizadores, colares e broca é comumente chamado de BHA (*bottom-hole assembly*), ou conjunto do fundo do poço. Durante a perfuração, um fluido pressurizado é injetado através do centro da coluna de perfuração até a broca e retornando entre a coluna e a parede do poço com o principal propósito de resfriar a broca e auxiliar na remoção do material perfurado.

Figura 1 – Esquema básico do sistema de perfuração de poços de petróleo. (Jansen e van den Steen, 1995)

1.2 Principais Problemas na Perfuração

Os problemas de vibrações são os principais fatores complicadores do processo de perfuração. As vibrações geradas no processo podem ser axiais, torcionais, laterais ou combinações destas. Segundo Plácido, Santos e Galeano (2002), os principais fenômenos observados na prática são: *bit bouncing* (perda de contato entre a broca e formação), *whirling* (contato entre a coluna e a parede do poço) e *stick-slip* (parada da broca) conforme Figura 2.

Figura 2 – Vibrações de perfuração (Schlumberger, 2006)

O *bit bouncing* ou modo axial, conforme Plácido, Santos e Galeano (2002), é governado pela vibração axial que ocorre ao longo do conjunto de coluna e broca. Pode ser observado pela oscilação do peso na broca ou *weight-on-bit* (WOB) na parte inferior ou também do peso no gancho ou *weight-on-hook* (WOH) na parte superior, durante a perfuração. As consequências nefastas de vibrações axiais são a quebra da broca, danos nas ferramentas de perfuração do poço e diminuição da taxa de penetração (Schlumberger, 2006).

Conforme Plácido, Santos e Galeano (2002), o *whirling* é uma combinação dos três tipos de vibração, lateral, torcional e axial e basicamente pode ser descrito como a desorientação do eixo de rotação da coluna de perfuração durante o processo, dando origem a um movimento rotativo complexo. Frequentemente este fenômeno ocorre em perfurações verticais nas quais a coluna sofre freqüentes choques com a parede do poço, podendo ter dentro deste tipo de vibração três deslocamentos laterais distintos, o deslocamento que acompanha o sentido de perfuração ou *forward whirl*, aquele que é contrário ao sentido de rotação, *backward whirl*, e movimento caótico (Schlumberger, 2006). Este problema gera excentricidade do conjunto de perfuração (BHA) e conseqüente quebra da broca, chegando a interromper completamente a perfuração em alguns casos. A ocorrência deste fenômeno pode ser verificada analisando o estado da broca após a perfuração.

O *stick-slip*, por sua vez, consiste na parada total da broca (parte inferior) enquanto a mesa de torque (parte superior) continua girando e fornecendo potência, de forma que com o aumento da energia de deformação torcional armazenada da coluna e conseqüentemente do torque aplicado na broca, em certo momento a broca vence a resistência do solo e volta a perfurar, mas com velocidades muito superiores às estabelecidas. Em medições práticas feitas por Plácido, Santos e Galeano (2002), o *stick-slip* ou modo torcional, é observado pela oscilação na velocidade de perfuração, sendo periódico e estável uma vez que o modo inicia. A freqüência de vibração no modo de *stick-slip* é usualmente algo abaixo da primeira freqüência natural de vibração torcional na ordem de 0.05 e 0.5 Hz (Jansen e van den Steen, 1995). O *stick-slip* é considerado uma vibração auto-excitável e geralmente desaparece se a velocidade é aumentada (Plácido, Santos e Galeano, 2002; Trindade e Sampaio, 2005). A maior causa deste fenômeno está associada à

condição de atrito entre a broca e a formação rochosa, além de outros fatores como, impacto nas paredes do poço, excentricidade da coluna, troca de energia entre as várias ressonâncias lineares e não lineares (Chistoforou e Yigit, 2002). O atrito entre broca e formação rochosa foi estudado por Jansen e van den Steen (1995) e Brett (1992), confirmando diferenças para o torque estático e para o torque de escorregamento em função do atrito em solo rochoso

Apesar de todos estes fenômenos contribuírem reduzindo a eficiência da perfuração, este projeto dará ênfase à influência do *stick-slip* devido ao maior interesse no estudo da vibração torcional do conjunto e por este ser o principal contribuinte para quebra de broca.

1.2.1 Modelos de Interação Entre a Broca e a Formação Rochosa

Segundo Tucker e Wang (1999b), um dos aspectos que causam mais danos em perfurações é a vibração torcional do conjunto de perfuração ou *stick-slip*. O *stick-slip* é uma das fontes de falhas que reduz a taxa de penetração e aumenta os custos da operação (Lopez e Suarez, 2004).

Plácido, Santos e Galeano (2002) identificam os fatores responsáveis pela perda de eficiência no processo como fadiga da coluna, redução da vida da broca, mudança no trajeto de perfuração do poço, e aumento do diâmetro da abertura do poço. Estes são consequência de vibrações durante o processo de perfuração em especial para vibrações torcionais.

Apesar da propagação dos distúrbios torcionais serem governados por equações de onda lineares, a interação entre broca e superfície rochosa apresenta uma condição de contorno não-linear que pode ser uma das causas de penetração

não-uniforme (Tucker e Wang, 2003). O estado de vibração torcional associado ao torque de atrito, que é função da velocidade angular e do peso na broca, induz a liberação da broca na fase *slip*.

Um estudo específico feito por Spanos et al. (1995) desenvolveu um modelo contínuo de interação entre broca e solo para estudar o levantamento da broca nos casos em que ela perde o contato com o solo e entender a modulação de amplitude na formação superficial de corte.

Um estudo feito sobre a oscilação junto ao atrito na broca por Richard e Detounay (2000), utilizando um modelo discreto com dois GDL, tratou da resposta auto-excitável demonstrando que o acoplamento linear entre o modo normal e tangencial é suficiente para gerar o *stick-slip*.

Ritto, Soize e Sampaio (2009) também estudam a interação não linear entre broca e formação rochosa, mas através de um modelo estocástico em elementos finitos. O modelo considera as principais forças que agem no sistema e com ele são analisadas respostas que representam a condição de perfuração.

Alguns modelos estudados no intuito de trabalhar na melhoria do desempenho do sistema foram desenvolvidos como o utilizado por Tucker e Wang (1999b), que faz uso de um modelo contínuo para a coluna em contribuição ao atrito entre broca e formação rochosa que é função do movimento relativo. Já para o estudo de Jansen e van den Steen (1995), um modelo de atrito simplificado que captura a essência do efeito não linear suficiente para análises lineares foi utilizado.

Baseado em medições recentes de perfuração em condições estáveis, Tucker e Wang (2003), estabelecem correlações para a taxa de penetração, profundidade de corte, torque na broca, carga e rotação na broca. A contribuição do torque de

atrito e de corte na broca é função da velocidade e carga na broca segundo o modelo utilizado.

Um estudo mais recente de Lopez e Suarez (2004) utiliza um modelo de atrito que é o principal diferencial de seu trabalho, adicionando torque viscoso ao torque na broca como alternativa na fase de escorregamento. Desta forma analisa respostas para modelos em função das forças de atrito seco do peso na broca.

Grande parte dos trabalhos anteriores utilizam modelos regularizados (contínuos) para relacionar o torque na interface broca-formação com a velocidade angular da broca. Sabe-se, no entanto, que estes modelos são bastante irrealistas em baixas velocidades, ou seja, na fase *stick* ou na transição entre a fase *stick* e a fase *slip*. Portanto, modelos não-regularizados (descontínuos), como aquele utilizado por Lopez e Suarez (2004), e que levam em conta o equilíbrio na interface durante estas fases críticas podem trazer importantes contribuições na análise do efeito do *stick-slip* no desempenho do sistema.

1.2.2 Modelos Dinâmicos de Perfuração

A modelagem do processo de perfuração de poços de petróleo deve levar em consideração geometrias e propriedades dinâmicas assim como endereçar as vibrações inerentes do processo. Porém, em função das variáveis a serem estudadas o estudo pode se tornar complexo e custoso.

Estudos existentes para identificar e corrigir problemas de perfuração utilizam diversos modelos dinâmicos para representar o conjunto BHA e o mecanismo de perfuração. Podemos classificá-los em modelos com parâmetros distribuídos como aqueles estudados por Tucker e Wang (1999b), Trindade, Wolter e Sampaio (2003),

Ritto, Soize e Sampaio (2009), Trindade e Sampaio (2005) e com parâmetros concentrados como Richard, Germaý e Detournay (2004), Richard e Detournay (2000), Cristoforous e Yigit (2002) e Lopez & Suarez (2004). Ainda podemos classificar modelos dinâmicos por seu grau de aproximação e complexidade em função do número de graus de liberdade (GDL).

Elsayed, Dreing e Vonderheide (1997), utiliza um modelo torcional e axial para estudar o efeito de vibrações torcionais na estabilidade do sistema através da análise de frequência para algumas condições.

Richard, Germaý e Detournay (2004) também investigaram as oscilações torcionais auto-excitáveis, *stick-slip*, no sistema de perfuração com um modelo torcional e axial com dois GDLs. Neste caso, foi estudada uma função que representa o atraso no movimento através do acoplamento dos modos torcionais e axiais, isto pelas leis de interação entre broca e formação rochosa do atrito de contato e processo de corte.

Outro trabalho que estudou o efeito do acoplamento das vibrações torcionais e axiais no desempenho de perfuração foi realizado por Trindade e Sampaio (2005). Neste caso, com um modelo em elementos finitos, o estudo objetivou avaliar e minimizar a vibração torcional de *stick-slip* além de analisar estratégias de controle para minimizar o efeito de vibração torcional.

Tucker e Wang (1999b) investigaram os estados complexos de vibração com o objetivo de controlar o potencial construtivo e destrutivo do sistema. Este estudo utiliza um modelo com seis variáveis contínuas independentes. O modelo é usado para estudar a estabilidade de configurações assimétricas em perfuração vertical com perturbações axiais, torcionais e laterais.

Um modelo contínuo acoplado axial, lateral e torcional, para estudar e controlar vibrações causadas por atrito foi estudado por Christoforou e Yigit (2003).

Alguns estudos focados em estratégias para minimizar a ocorrência de *stick-slip* são encontrados na literatura. Um deles, desenvolvido por Lopez e Suarez (2004), utiliza um modelo torcional de dois GDLs para reproduzir o *stick-slip* em diferentes condições de operação com o objetivo de analisar respostas para determinados controles.

Outros dois trabalhos bastante importantes procuram entender a resposta do sistema mediante aplicação de determinadas leis de controle. Um deles foi utilizado por Jansen e van den Steen (1995) faz uso de um modelo torcional de dois GDLs para aplicação de controle através dos parâmetros elétricos do sistema de potência. Outro trabalho foi de Tucker e Wang (2003) que estuda formas de aperfeiçoar o desempenho através de um modelo também torcional mostrando os estados de vibração que podem ser vistos com o modelo.

A maioria dos trabalhos trata de propostas que reduzem a vibração torcional, uma vez que esta é a maior causadora de problemas de desempenho. Com isso, técnicas de controle podem ser aplicadas aos modelos e validadas com objetivo de avaliar seu desempenho na minimização de problemas de vibrações.

1.2.3 Técnicas de Controle de Vibrações na Perfuração

O estudo de vibrações tem papel fundamental para entender e tratar os problemas relacionados ao processo de perfuração e conseqüentemente desenvolver formas de minimizar as causas decorrentes da perda de eficiência de tais mecanismos. A aplicação de técnicas de controle de vibração é uma das

ferramentas utilizadas para minimizar a ocorrência de vibrações em estruturas contribuindo para que o sistema não seja tão susceptível às influências externas. Desta forma, sem um sistema de controle de vibração eficiente, o conjunto de perfuração não teria avanços significativos e o processo seria bastante instável com inúmeras ocorrências de quebra de broca, coluna, baixa eficiência e conseqüentemente maiores custos.

O controle do *stick-slip* é um dos principais temas abordados na literatura, apresentando várias técnicas de controle e resultados importantes. As leis de controle mais usuais para controle do *stick-slip* são o amortecimento ativo, a retificação de torque, o *soft-torque*, controle de velocidade proporcional-integral (PI) e a variação dinâmica de carga na broca.

Jansen e van den Steen (1995) investigaram como efetivamente o amortecimento ativo elimina as vibrações torcionais e o *stick-slip* durante a perfuração, utilizando um sistema de retro-alimentação eletrônica que modifica a tensão elétrica do motor. Por não controlar os parâmetros mecânicos como torque ou velocidade angular diretamente, esse processo é conhecido como sistema eletrônico ativo. O controle age de forma a controlar a tensão aplicada no motor em função da corrente elétrica de armadura do motor agindo em flutuações de vibração torcional sem alterar significativamente os valores de torque.

Como forma de controlar também as vibrações torcionais indesejáveis, Tucker e Wang (1999a) propuseram a retificação de torque, estabelecendo um coeficiente de reflexão na mesa rotativa em função das ondas torcionais que vêm da broca para a mesa superior. O controle proporcional e integral é aplicado em função das reflexões sofridas, propondo que o torque responda diretamente à presença de qualquer distúrbio torcional sem a necessidade de processamento de sinal ou

variação da velocidade de objetivo. Este método demanda uma faixa estreita de frequências para absorção caso haja necessidade de reduzir um coeficiente de reflexão pequeno, tornando-se muito severo e possivelmente limitante. No entanto, mostrou-se que o método poderia absorver 80% da reflexão torcional (Tucker e Wang, 1999a). No mesmo trabalho, Tucker e Wang (1999a) comparam a proposta acima com o tradicional *soft-torque*, que é obtido através da modificação do controle de velocidade padrão com a inclusão de um filtro passa - alta. O objetivo em ambos os casos é o controle torcional e a eliminação das oscilações na velocidade angular sofridas pela broca. Neste estudo, a retificação se mostrou superior ao controle por *soft-torque*.

Em outro trabalho de Tucker e Wang (2003), a mesma proposta de retificação é aplicada de duas formas e também comparada com o *soft-torque*. No primeiro estudo, o torque de controle é função da velocidade na mesa rotativa mais uma contribuição em função da propagação de onda torcional, no qual o parâmetro de ganho de retificação é multiplicado por uma função de movimentos torcionais representando a reflexão de onda, similar ao trabalho anterior. A segunda forma é chamada de retificação torcional na broca e consiste na introdução de um sinal de retro-alimentação adicional, além dos outros componentes de torque que seriam calculados usando sensores de rotação e torque na broca. Esta última técnica é proporcional a velocidade angular da broca sendo aplicada juntamente com a retificação torcional comentada anteriormente, obtendo nível mais alto de robustez. Os dois métodos têm como objetivo aperfeiçoar o desempenho da perfuração na qual o *stick-slip* é perigoso e causa dano. Ambos os métodos apresentam certa limitação, porém, contribuem de forma a ampliar a taxa de penetração significativamente.

Lopez e Suarez (2004) estudaram duas estratégias de controle descentralizadas. A primeira consiste na variação dinâmica da carga na broca e a segunda é um absorvedor de impacto. Ambas são consideradas descentralizadas, pois as velocidades na parte superior e inferior seriam controladas separadamente. O objetivo desse estudo é a redução de *stick-slip* e conseqüentemente redução dos modos de falha que reduzem a taxa de penetração. As estratégias fazem uso de informações a cerca da velocidade na mesa rotativa, do torque na broca e da carga na broca, indicando que estes são os principais fatores na redução do *stick-slip*. Uma das estratégias de controle é a variação da carga na broca, uma vez que o mero aumento da velocidade de perfuração poderia gerar vibrações laterais. Nesta técnica, a variação de carga na broca é proporcional a velocidade de perfuração. Se a velocidade de perfuração for reduzida, a carga na broca também é aliviada. A variação é permitida até o ponto onde não haja grande influência na taxa de penetração. A segunda estratégia consiste na aplicação de um absorvedor de impacto colocado na mesa de torque, sendo considerado um sistema de amortecimento de vibrações. Com estas estratégias, a velocidade na mesa superior é considerada referência e a velocidade na broca é controlada com a redução de ocorrências de *stick-slip*.

Recentemente, Trindade e Sampaio (2005) utilizaram técnicas de controle padrão tipo PI para o torque aplicado na mesa superior. O controle é proporcional à diferença entre o deslocamento e velocidade angulares na mesa e o deslocamento e velocidade de referência. O objetivo do trabalho consiste no estudo de efeitos e desempenho em um sistema de vibração axial e torcional acoplados, reduzindo flutuações na velocidade angular da broca. Já para o controle de vibrações axiais, Trindade e Sampaio (2005) propuseram a aplicação de uma força de controle na

mesa superior de forma a reduzir a vibração do sistema. Esta força de controle é em função de uma carga estática, excitação axial senoidal e retro-alimentação de velocidade direta. Tendo um ajuste adequado em função da frequência de excitação axial, o método contribui para redução dos efeitos da vibração torcional e, conseqüentemente, melhora a taxa de penetração da broca.

Christoforou e Yigit (2003) estudaram também a técnica de controle PI, mas com uma derivação. O projeto é feito com modelo dinâmico reduzido e a análise de desempenho é realizada no modelo completo. O objetivo é a estabilização da velocidade na mesa e na broca durante certo período de tempo quando ocorre o aparecimento de um distúrbio torcional. O controle atua diretamente na tensão do motor em função de seis termos. O primeiro termo é a tensão em malha aberta para o caso de não haver retro-alimentação. O segundo é o torque de retro-alimentação em função da diferença entre os deslocamentos angulares da broca e da mesa rotativa. Já o terceiro e quarto termos consistem no controle PI proporcionais e integrais à diferença entre velocidade alvo e velocidade real. O quinto termo consiste na retro-alimentação em função da diferença entre velocidade alvo e velocidade real na broca. Finalmente, o sexto termo consiste na retro-alimentação direta de tensão em função da corrente do motor. Neste caso, se faz necessário o uso de uma broca instrumentada e o conhecimento dos estados de perfuração para uma possível estimativa dos valores.

Através destes estudos fica evidente que diferentes formas de controle poderiam efetivamente reduzir o *stick-slip* e que alguns fatores têm maior influência na resposta do que outros, como alívio na carga da broca e aumento de velocidade de perfuração. Porém, deve-se tomar muita atenção na identificação dos parâmetros a serem utilizados para evitar instabilidades transientes.

1.3 Motivação

As oportunidades de melhoramento vêm crescendo rapidamente com o avanço da indústria petrolífera. A extensa abrangência do estudo de vibrações nas linhas da engenharia em geral estimula principalmente áreas como petrolífera, automobilística e aeronáutica que demonstram através dos estudos, que muitos assuntos ainda merecem atenção, abrindo espaço para estudos aprofundados do tema. A necessidade de se entender com maior clareza as ferramentas de controle linear, validar um estudo simplificado dentro de limites e obter resposta de parâmetros para condições específicas de operação de um sistema para perfuração de poços de petróleo foi a principal motivação deste trabalho. Muitos são os fatores que influenciam os estudos matemáticos e simulações, dentre elas as ferramentas disponíveis e limites de cálculos. Os benefícios deste trabalho auxiliam diretamente outras oportunidades de estudos no processo de perfuração de poços de petróleo com maior qualidade e controle do processo além da possibilidade de aplicação em sistemas rotativos em outras áreas da engenharia.

1.4 Objetivos do Trabalho

Com base nos modelos existentes para estudo de perfuração de poços de petróleo, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático de vibração torcional para o sistema broca e coluna de perfuração incluindo modelos de interação entre broca e formação rochosa, que represente o processo de perfuração. Vale ressaltar que se pretende utilizar um modelo estrutural simples para viabilizar

uma análise paramétrica da resposta dinâmica do sistema mais extensa. Estudar e aplicar a técnica de controle proporcional e integral de velocidade para controle do modelo e validar os resultados. Com o modelo validado, analisar parametricamente resultados com base nas condições de operação e faixa de valores de parâmetros. A aplicação de uma ferramenta de controle linear objetiva a obtenção de parâmetros para uma condição aceitável de operação. Também são estudadas outras formas de controle baseadas na variação de parâmetros e variação de condições de operação.

CAPÍTULO 2

2 Modelo Dinâmico do Sistema

Neste capítulo, será apresentado um modelo dinâmico para o sistema de perfuração, composto por uma mesa rotativa, coluna e broca incluindo a interação entre broca e formação rochosa. Neste capítulo, será introduzida também a técnica de controle com enfoque no problema a ser tratado. Para maior clareza, primeiramente um modelo de interação entre broca e formação rochosa é apresentado. Em seguida, um modelo estrutural contendo apenas a coluna como elemento flexível é apresentado. O modelo acoplado é ajustado e validado com base em resultados anteriores. Na seqüência, é proposta a técnica de controle com a qual serão simulados e correlacionados valores com base em trabalhos existentes para validação da técnica. Aplicando a técnica de controle, o modelo já apresentará resultados representativos para uma comparação. Alguns resultados serão apresentados previamente como forma de entendimento sobre o modelo e de identificação de possíveis propostas de melhoria de desempenho.

2.1 Interação Entre Broca e Formação Rochosa

Conforme discutido na análise bibliográfica, o processo de perfuração consiste em um mecanismo complexo composto pela mesa rotativa e o BHA que executa a perfuração através da ação de forças da broca em contato com a formação rochosa. Para um entendimento das forças que agem neste contato, o desenho da Figura 3 representa uma simplificação para 1 GL da ação das forças.

O aspecto mais importante do processo de perfuração consiste no contato entre broca e formação rochosa. A broca com velocidade angular ω_b exerce uma força axial F_b (WOB) e um torque T_b na formação rochosa. O torque transmitido pela coluna à broca é denominado T .

Figura 3 – Esquema demonstrativo de 1 GL para perfuração

Estudos anteriores (Richard, Germay e Detournay, 2004; Richard, Detournay, 2000) mostram que, na realidade, baseado nas características e condições de perfuração, o fenômeno de *stick-slip* pode ser representado usando-se um modelo de atrito seco. Desta forma, o modelo de interação entre broca e formação rochosa será aqui aproximado pelo atrito seco. A principal diferença em relação aos estudos

anteriores encontrados na literatura está na utilização de um modelo descontínuo não-regularizado para a interação entre broca e formação rochosa. Desta forma, três são as condições básicas que podem ser definidas para representação do torque induzido na interface broca-formação rochosa.

$$T_b = T; \quad |\omega_b| \leq \delta \text{ e } |T| \leq a_2 F_b \quad (1)$$

$$T_b = a_2 F_b \operatorname{sign}(T); \quad |\omega_b| \leq \delta \text{ e } |T| > a_2 F_b \quad (2)$$

$$T_b = [a_1 + (a_2 - a_1)e^{-\beta|\omega_b|}]F_b \operatorname{sign}(\omega_b); \quad |\omega_b| > \delta \quad (3)$$

A equação (1) define a condição na qual a broca está na fase *stick*, isto é, a sua velocidade angular ω_b é aproximadamente nula e o torque a ela aplicado não ultrapassa o torque máximo admissível pela interface broca-formação rochosa. Na situação da equação (2), a broca deve começar a entrar na fase *slip* e assim, (re)iniciar a perfuração. Neste caso, o torque aplicado supera o torque máximo admissível e, assim, a broca passa a ter aceleração angular. A equação (3) estabelece o comportamento do torque na broca quando em movimento em função da sua velocidade angular, incluindo a fase intermediária de transição entre as condições de *stick* e *slip*.

A Figura 4 representa graficamente o modelo considerado para torque na broca conforme equações (1)-(3).

Os parâmetros do modelo a_1 , a_2 e β são definidos em função da broca, da formação rochosa e das condições de operação. A carga na broca F_b permite ajuste

em função do estado de perfuração e para velocidades extremamente pequenas, aqui considera-se uma variação δ para regime estático.

Figura 4 – Modelo de atrito considerado para o torque na broca.

Uma vez que o modelo de interação entre broca e formação rochosa está definido, é preciso modelar a estrutura a ser estudada.

2.2 Modelo Estrutural

Considera-se um modelo de 2 GDLs considerando em uma extremidade a broca (BHA) e na outra o conjunto de motor que pode ser representado conforme Figura 5. A broca tem momento de inércia J_b , velocidade angular ω_b e deslocamento angular θ_b .

Da mesma forma a mesa rotativa tem momento de inércia J_m , velocidade angular ω_m e deslocamento angular θ_m .

A coluna é aproximada por um tubo de comprimento L , com momento de inércia J_c . A coluna de perfuração, por possuir um comprimento grande, em torno de 3000 a 5000 metros, desenvolve também papel de elemento de mola k_θ .

Figura 5 – Modelo 2 GDLs

Desta forma a equação de movimento para o modelo em estudo pode ser encontrada usando a 2ª Lei de Newton.

$$\left(J_m + \frac{1}{2}J_c\right)\ddot{\theta}_m + c_\theta(\omega_m - \omega_b) + k_\theta(\theta_m - \theta_b) = T_m \quad (4)$$

$$\left(J_b + \frac{1}{2}J_c\right)\ddot{\theta}_b + c_\theta(\omega_b - \omega_m) + k_\theta(\theta_b - \theta_m) = -T_b \quad (5)$$

O momento de inércia referente à coluna é considerado, pois sua grandeza é significativa para o estudo torcional, desta forma para o modelo simplificado, o momento de inércia é dividido em duas porções, sendo metade adicionada ao conjunto da broca e metade ao conjunto da mesa rotativa.

O coeficiente de amortecimento equivalente c_θ será definido quando das simulações numéricas com valor infinitesimalmente reduzido na ordem de 0,00001%. O coeficiente de rigidez k_θ é calculado conforme equação (6), onde G é o módulo de cisalhamento, I_c é o segundo momento polar de área e L o comprimento da coluna.

$$k_\theta = \frac{G I_c}{L} \quad (6)$$

O segundo momento polar de área da coluna é aproximado pela equação (7) onde D_c é o diâmetro externo e d_c é o diâmetro interno. Apesar de o tubo não ser livre de imperfeições ou detalhes, aqui será considerado como um tubo uniforme.

$$I_c = \left(\frac{\pi}{32}\right) [D_c^4 - d_c^4] \quad (7)$$

Assim considerando as equações (5) e (6) na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} J_m + \frac{1}{2}J_c & 0 \\ 0 & J_b + \frac{1}{2}J_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_m \\ \ddot{\theta}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_\theta & -c_\theta \\ -c_\theta & c_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_\theta & -k_\theta \\ -k_\theta & k_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_m \\ \theta_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_m \\ -T_b \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Com o modelo rotacional da estrutura e o modelo de atrito entre a broca e formação rochosa, os parâmetros de atrito devem ser ajustados para representar a condição de perfuração.

2.3 Ajuste do Modelo Proposto

O modelo de atrito apresentado será ajustado e comparado com um modelo estudado recentemente na literatura para vibração torcional (Tucker e Wang, 2003; Trindade e Sampaio, 2005).

O modelo será ajustado com base nos parâmetros a_1 e a_2 que são constantes que representam a condição estática e dinâmica respectivamente do contato broca e solo e β o coeficiente de decaimento. A variação δ representa 0,001 rad/s.

Considerando que os modelos apresentam diferenças, os ajustes corrigirão as curvas aproximando-as ao modelo de referência. Devido também às limitações de tempo, o ajuste apresentado é a melhor aproximação manual para cada condição de perfuração.

Figura 6 - Curvas de torque versus velocidade angular obtidas com modelo proposto ajustado com parâmetros $a_2 = 1,5$, $a_1 = 0,7$, $\beta = 0,1$ e modelo de referência.

O modelo foi ajustado para condição de carga na broca de 120 kN e velocidades angulares de -50 à 50 rad/s, o ajuste se mostrou aceitável, próximo ao modelo de referência, com $a_1 = 0,7$, $a_2 = 1,5$ e $\beta = 0,1$. As curvas de torque versus

velocidade angular na broca são apresentas na Figura 6 para os modelos de referência e proposto neste trabalho.

Para condição de carga na broca de 80 kN e 160 kN, o melhor ajuste do modelo proposto ao modelo de referência foi obtido com os seguintes conjuntos de parâmetros, respectivamente, $a_1=0,9$, $a_2=1,2$, e $\beta=0,09$, e $a_1=0,55$, $a_2=1,65$, e $\beta=0,1$. As curvas de torque versus velocidade angular na broca para condições de carga na broca de 80 kN e 160 kN são apresentadas nas Figura 7 e Figura 8, respectivamente.

Figura 7 – Curvas de torque versus velocidade angular obtidas com modelo proposto ajustado com parâmetros $a_2=1,2$, $a_1=0,9$, $\beta=0,09$ e modelo de referência.

É importante ressaltar uma diferença fundamental entre o modelo proposto e o modelo usado como referência para o ajuste dos parâmetros. O torque na broca na condição de *stick* é afetado em função do equilíbrio estático da estrutura e não se utiliza da função de regularização considerada no modelo de referência. Por isso, os resultados são diferentes sem regiões de baixa velocidade angular.

Figura 8 - Curvas de torque versus velocidade angular obtidas com modelo proposto ajustado com parâmetros $a_2 = 1,65$, $a_1 = 0,55$, $\beta = 0,1$ e modelo de referência.

Para permitir o estudo de condições intermediárias de carga na broca, uma interpolação linear de parâmetros calculado através do ajuste do modelo proposto foi realizada. Os parâmetros do modelo proposto são apresentados na Tabela 1 para cinco condições de carga na broca: 80, 100, 120, 140 e 160 kN.

Tabela 1 - Valores interpolados para utilização no modelo com 100 kN e 140 kN.

Peso na Broca (kN)	a_2	a_1	β
80	1,200	0,900	0,090
100	1,350	0,800	0,095
120	1,500	0,700	0,100
140	1,575	0,625	0,100
160	1,650	0,550	0,100

2.4 Descrição do Problema

O mecanismo de perfuração consiste em uma coluna tubular de aço com raio externo R_o , raio interno R_i e comprimento L agindo como elemento flexível de ligação entre a mesa rotativa e o conjunto BHA. A mesa rotativa que compreende o conjunto de motor possui massa M_m e fornece a rotação ao conjunto BHA através da coluna para perfuração.

As propriedades geométricas e materiais efetivos da coluna, da mesa rotativa e do conjunto BHA são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores numéricos de parâmetros típicos de perfuração		
Símbolo	Descrição	Valor
ρ	Densidade da coluna de perfuração	8010 kg m ⁻³
E	Módulo de Young da coluna de perfuração	207.0 GPa
G	Módulo de cisalhamento da coluna de perfuração	79.6 GPa
L	Comprimento da coluna de perfuração	3000 m
R_o	Raio externo da coluna de perfuração	0.0635 m
R_i	Raio interno da coluna de perfuração	0.0543 m
J_c	Inércia rotacional da coluna de perfuração	285 kg m ²
M_m	Massa efetiva na mesa superior	50800 kg
J_m	Inércia rotacional na mesa superior	500 kg m ²
M_b	Massa efetiva na broca	5000 kg
J_b	Inércia rotacional na broca	394 kg m ²

O estudo decorrerá em faixas de condições de operação que representam a maioria das situações e ocorrências no processo de perfuração. Com base nos estudos de perfuração feitos até hoje, uma condição tipicamente utilizada é 100 kN de carga na broca e rotação de 100 RPM. Derivado desta condição, os valores para

carga na broca serão compreendidos para 80 kN, 100 kN e 120 kN. Da mesma forma serão estudadas três faixas de valores de rotação, 80 RPM, 100 RPM e 120 RPM, onde na condição mais rigorosa a carga na broca é 120 kN e a rotação é 80 RPM e na condição mais aliviada a carga na broca é de 80 kN e a rotação 120 RPM.

2.5 Descrição da Estratégia de Controle

Conforme apresentado no anteriormente, muitas são as técnicas de controle e variáveis a serem controladas que poderiam ser utilizadas para aperfeiçoar o processo de perfuração, Com base no modelo apresentado, considerando 2 GDLs e suas características, a técnica proposta para este modelo é uma técnica tradicional, que consiste no controle proporcional-integral de velocidade. Devido à natureza da operação, a broca não permite um controle colocalizado e por isto na totalidade dos casos o controle é aplicado na mesa rotativa. A técnica a ser utilizada para este estudo controla o torque aplicado na mesa que é transmitido através da coluna até a broca. Esta técnica também foi utilizada em trabalhos de Trindade e Sampaio (2005) e Tucker e Wang (2003). O torque de controle aplicado na mesa é função das velocidades angulares alvo e, da mesa e posição angulares alvo e mesa conforme equação (9).

O objetivo do torque de controle é minimizar a diferença entre as velocidades angulares reais e esperadas na broca, e assim, podendo reduzir o número de ocorrências de *stick-slip* de maneira que o sistema permaneça em processo estável de perfuração.

$$T_m = k_p(\Omega - \omega_m) + k_i(\Theta - \theta_m) \quad (9)$$

Sendo, θ_m a posição angular da mesa, ω_m a sua velocidade angular, e θ e Ω são posição e velocidade angulares esperadas (alvo) para broca.

2.6 Validação do Modelo Proposto

Considerando os mesmos parâmetros usados nos trabalhos de Trindade e Sampaio (2005) e Tucker e Wang (2003), foi simulada a condição de perfuração com 120 kN de carga na broca e 100 RPM. Estabelecendo a mesma métrica, a simulação vai de 0 a 100 segundos com a broca e a mesa de torque iniciando com velocidades angulares de 70 RPM. Os valores dos parâmetros de controle k_i e k_p também são os mesmos em 100 Nm e 200 Nms respectivamente.

Figura 9 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms. Broca (tracejada) e mesa de rotativa (solida).

Analisando a resposta do modelo de Tucker e Wang (2003), conforme Figura 10, o resultado se mostra similar com situações de *stick-slip* ocorrendo quatro vezes em 100 segundos com picos de 200 RPM máximo na broca. O torque máximo na mesa fica na ordem de 9 kNm e o toque de atrito na ordem de 8 kNm, bastante semelhantes aos encontrados pelo modelo proposto.

Figura 10 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms de Tucker e Wang (2003). Broca (tracejada) e mesa de torque (solida)

Comparando os resultados com a resposta de Trindade e Sampaio (2005) conforme Figura 11, demonstram seguir o mesmo perfil de resposta com valores bem próximos e com pico nos mesmos instantes de tempo. Os valores de torque na broca e na mesa são também muito semelhantes em todos os aspectos.

Figura 11 - Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms de Trindade e Sampaio (2005). Broca (tracejada) e mesa de torque (solida)

Desta forma, levando em consideração a simplicidade do modelo e seus limites, podemos assumir que a resposta apresentada é aceitável para a condição usual de perfuração com 120 kN e 100 RPM. Um ponto importante a ser observado na Figura 9 é a apresentação do fenômeno de *stick-slip* na qual a velocidade cai a

zero, mostrando efetivamente a parada, o que não acontece nos outros modelos devido à regularização do modelo de atrito.

2.7 Influência de Parâmetros Para Resposta do Sistema

Vários estudos indicam que o fenômeno de *stick-slip* ainda ocorre e pode ser reduzido através das técnicas de controle. Uma primeira aproximação para entender a resposta do modelo é a variação dos parâmetros de controle. Amplificando ou reduzindo o valor de k_i e k_p pode ser notada a variação de comportamento e tendência estabilizando ou desestabilizando o sistema.

A partir do que se estudou para validação na seção anterior, amplifica-se o valor de k_i de 100 para 200 Nm e em seguida reduzimos de 100 para 50 Nm conforme Figura 12 e Figura 13. Para este caso, quando o parâmetro integral é amplificado, a resposta se apresenta mais instável que pode ser visto pelo aumento de oscilação de rotação na broca e mesa com o requerimento de torque na mesa praticamente seguindo um padrão constante próximo de 8 kNm. Apesar da maior oscilação e várias ocorrências de *stick-slip*, a broca permanece em *stick* por menos de 10 segundos.

Como esperado, o parâmetro k_i integral na velocidade, e por consequência proporcional ao deslocamento, afeta a rigidez equivalente do sistema. Assim, o seu aumento induz a um aumento na frequência de oscilação das velocidades (Figura 12). Por outro lado, o parâmetro k_p proporcional à velocidade, e portanto, proporcional à derivada do deslocamento, afeta o amortecimento equivalente do sistema. Então, um aumento em k_p pode induzir um decaimento das amplitudes de vibração do sistema (Figura 13).

Figura 12 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i=200$ Nm e $k_p=200$ Nms. Broca (tracejada) e mesa de torque (solida).

Figura 13 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i=50$ Nm e $k_p=200$ Nms. Broca (tracejada) e mesa de torque (solida).

Quando o parâmetro integral é reduzido, conforme Figura 13, o padrão de resposta é totalmente modificado, demonstrando uma tendência de estabilização e, ao longo do tempo diminuindo o requerimento do controle do sistema, por outro lado a broca permanece inicialmente em mais de 15 segundos em *stick*.

Reduzindo o parâmetro proporcional k_p para 100 Nms, a resposta traz outro perfil com pico de rotação da broca com valores acima de 220 RPM e torques altos na broca, conforme Figura 14. Por outro lado amplificando o valor do parâmetro

proporcional a resposta se apresenta bastante estável, com boa tendência de acomodação conforme Figura 15. A variação deste parâmetro demonstra maior influência sobre o modelo se comparado as variações de k_i .

Figura 14 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i=100$ Nm e $k_p=100$ Nms. Broca (tracejada) e mesa de torque (solida).

Figura 15 – Resposta para situação de 120 kN e 100 RPM, com valores de $k_i=100$ Nm e $k_p=250$ Nms. Broca (tracejada) e mesa de torque (solida).

Com isso, fica claro que os dois parâmetros têm influência significativa e modificam totalmente os resultados dentro de uma variação dos valores para o conjunto de parâmetros k_i e k_p . Isto demonstra que para uma determinada condição

de operação, o *stick-slip* pode ser minimizado através de uma escolha apropriada dos parâmetros de controle.

CAPÍTULO 3

3 Análise Paramétrica

Neste capítulo, serão apresentados os critérios de desempenho desenvolvidos para análise paramétrica da resposta do sistema. Inicialmente serão apresentados alguns dados de entrada para entendimento da simulação e delimitar o campo de estudo. Serão apresentados seis critérios de desempenho calculados com base na resposta dinâmica para diferentes condições de operação e variando-se os parâmetros de controle k_i e k_p .

3.1 Dados de Entrada

Com base em estudos preliminares, 32 valores serão considerados para os parâmetros de controle proporcional (k_p) e integral (k_i), sendo que k_p varia no intervalo $[1, 1000]$ Nms e k_i no intervalo $[1, 500]$ Nm. Conforme apresentado no capítulo 2, para cada condição de operação um conjunto de constantes a_1 , a_2 e β representam as características da interação broca-formação rochosa no processo de perfuração. O modelo apresentado e controle proposto serão simulados usando o software Matlab 7.8.0.347. As equações do movimento serão integradas no intervalo

de tempo de 0 a 100 segundos usando o integrador de equações diferenciais ordinárias ODE45 (Runge-Kutta 4ª e 5ª ordem) com tolerância de erro de 10^{-6} .

A criação de critérios se faz necessária para análise dos resultados de simulação e identificação de parâmetros aceitáveis no controle do sistema. Foram criados seis critérios de desempenho para análise da resposta do sistema, que são o desvio médio de velocidade angular na broca, taxa de penetração média relativa, tensão de cisalhamento máxima da coluna, desvio máximo de velocidade angular na broca, torque máximo na broca e potência requerida no motor. Dos seis critérios, alguns indicam o desempenho do processo, outros, a estabilidade, e outros ainda têm o objetivo de avaliar requerimentos para a perfuração e probabilidade de falha mecânica.

3.2 Desvio Médio de Velocidade Angular na Broca

Este critério avalia o desvio médio de velocidade angular da broca, mostrando de forma mais clara regiões onde existem maiores variações de velocidade angular na broca, conseqüentemente, possuem mais ocorrência do fenômeno de *stick-slip*. Uma das conseqüências do fenômeno de *stick-slip* é a oscilação da velocidade angular da broca, com grandes amplitudes, causando perda de eficiência na perfuração e podendo induzir a desgaste excessivo ou quebra na broca (Tucker e Wang, 1999a; Christoforou e Yigit, 2003; Jansen e Van den Steen, 1995; Trindade e Sampaio, 2005).

Portanto, propõe-se um índice que quantifique o desvio médio da velocidade angular na broca ω_b em relação à velocidade angular desejada Ω , tal que:

$$J_1 = \int_{t_i}^{t_f} \frac{|\omega_b - \Omega|}{\Omega} dt \quad (10)$$

A Figura 16 mostra o comportamento do índice J_1 para diferentes valores do parâmetro de controle k_i e k_p . Pode-se observar, que existe uma região (região 2 na Figura 16), na qual o índice apresenta valores relativamente pequenos (~10%) enquanto que nas outras regiões o índice pode atingir valores elevados (~90%).

Figura 16 – Desvio médio de velocidade angular da broca para diferentes valores de k_i e k_p .

Conforme pode ser observado na Figura 16, na região denominada região 1, os valores compreendem uma faixa de valores muito reduzidos do parâmetro integral k_i na ordem de 24 Nm. Nesta região, o desvio relativo de velocidade média teve maior oscilação atingindo entre 17% e 50% do objetivo esperado para velocidade angular na broca, indicando que o controle de velocidade não foi efetivo neste caso.

A região denominada dois apresenta desvios significativamente menores, entre 5% e 11%, ao custo de valores mais elevados para os parâmetros de controle permitindo um controle mais efetivo. Os valores de J_1 indicam um baixo número de ocorrências de *stick-slip*.

A região três apresenta valores mais elevados para o índice J_1 , atingindo entre 65% e 89% de desvio, indicando um grande número de ocorrências de *stick-slip*, apesar de valores relativamente elevados para o parâmetro k_i .

A Figura 17 mostra os resultados de desvio médio de velocidades angulares da broca em função dos parâmetros de controle k_i e k_p e para outras condições de operação, isto é, para outros valores de peso na broca e velocidade angular desejada. Resultados com perfil semelhante são obtidos, porém com regiões totalmente diferentes.

Figura 17 – Resultado 3D de velocidade média relativa para as nove condições de perfuração

3.3 Taxa de Penetração Média Relativa.

A profundidade perfurada é o principal critério na identificação da eficiência do processo de perfuração. O critério aqui considerado representa taxa de penetração média relativa à taxa esperada, calculado com base no método apresentado por Tucker e Wang (2003).

$$ROP^t = -c_1 + c_2 F_b^t + c_3 \omega_b^t \quad (11)$$

Sendo a taxa de penetração alvo ROP^t é função da carga na broca alvo F_b^t , velocidade angular alvo na broca ω_b^t relacionadas às constantes que representam as características de solo, $c_1 = 3,429 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$, $c_2 = 5,672 \times 10^{-8} \text{ mN}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e $c_3 = 1,374 \times 10^{-4} \text{ mrad}^{-1}$.

$$ROP^m = \frac{1}{\Delta t} \int (-c_1 + c_2 F_b + c_3 \omega_b) dt \quad (12)$$

A taxa de penetração real ROP^m é calculada em função da carga na broca real F_b e velocidade angular real na broca ω_b . Assim o critério J_2 é definido por

$$J_2 = \frac{ROP^m - ROP^t}{ROP^t} \quad (13)$$

Desta forma, o critério J_2 é definido como uma função da taxa de penetração relativa àquela esperada, indicando a eficiência do controle de velocidade no processo de perfuração.

Figura 18 – Taxa de penetração média relativa para diferentes valores de k_i e k_p .

Como análise inicial, a Figura 18 apresenta uma condição típica de perfuração com 100 kN de peso na broca e 100 RPM de velocidade angular desejada na broca. Nela podem ser vistas três regiões com limites mais definidos. A primeira das regiões é a menos controlada, nela os valores de parâmetros de controle integrais são relativamente pequenos. Esta é a região que chega a ter os menores valores de profundidade perfurada relativa.

A segunda região, apresentada como estável, possui pouquíssima oscilação de desempenho. Toda a região se mantém próximo de 2% de perda na perfuração relativa e pontos máximos de 3%.

Na região três, considerada como instável, o conjunto de parâmetros apresenta uma resposta ainda aceitável do sistema variando de 0,1% a 2,5%. A oscilação que ocorre nesta região demonstra que existem pontos que chegam inclusive a ter resposta de desempenho melhores que a própria região estável.

Figura 19 – Resultado 3D de profundidade perfurada relativa para as nove condições de perfuração

O mesmo pode ser feito para cada uma das condições conforme apresentado na Figura 19. Pode-se observar que, em função da condição de operação, as regiões instáveis e estáveis sofrem variações, porém para uma mesma região estável, por exemplo, não possuem diferença significativa de valores. No geral, a perfuração real está muito próxima do objetivo.

3.4 Tensão de Cisalhamento Máxima na Coluna

A tensão de cisalhamento máxima na coluna é um critério mais direcionado para a avaliação do risco de falha na coluna de perfuração seja pelo escoamento da coluna seja pelo desrosqueamento das duas seções de coluna.

Na literatura, não é trivial encontrar valores de tensão de cisalhamento para comparação, desta forma, aqui é utilizado como valor de referência, metade da tensão de escoamento longitudinal. Com o objetivo de analisar a resistência da coluna, serão analisados valores máximos de tensão obtidos durante a simulação.

Para aproximar a tensão de cisalhamento na coluna, considera-se deformação de cisalhamento uniforme, tal que:

$$\tau = \frac{G\gamma J}{A} ; \gamma = \frac{|\theta_m - \theta_b|}{L} \quad (14)$$

$$J_3 = \max\left(\frac{|\tau|}{\tau_y}\right) \quad (15)$$

O índice J_3 é então definido como sendo a tensão de cisalhamento máxima relativa à tensão de escoamento do material, sendo τ_y metade da tensão de escoamento longitudinal do material, neste caso $\tau_y = 189,5 \text{ MPA}$.

Figura 20 – Tensão de cisalhamento máxima na coluna para diferentes valores de k_i e k_p .

Nesta análise, é importante avaliar o quanto a tensão de cisalhamento máxima na coluna se aproxima da tensão de falha e, se possível, identificar regiões

de valores, para o parâmetro de controle que minimizem este índice indicando uma vida útil maior (ou melhor, integridade) para coluna.

Conforme pode ser observado na Figura 20, o índice J_3 não ultrapassa 0,0187 (1,8%) para todos os valores considerados para os parâmetros de controle, mesmo para valores relativamente pequenos para k_i e k_p . Por outro lado, para uma faixa relativamente grande de valores de k_i e k_p (região 2 na Figura 20), o índice apresenta pouca variação (entre 0,00964 e 0,01283). O mínimo na região dita estável (região 2) é de 0,009384 com $k_i=63,5$ Nm e $k_p=391,6$ Nms.

A Figura 21 mostra o comportamento da tensão de cisalhamento máxima relativa para as outras condições de operação.

Padrões similares são obtidos para diferentes condições, mas vale ressaltar que a região de mínima tensão de cisalhamento é diferente para as diferentes condições de operação, embora esteja quase sempre em regiões de valor relativamente pequenos de k_i .

Figura 21 - Resultado 3D de tensão de cisalhamento da coluna para as nove condições de perfuração.

Aparentemente, a tensão de cisalhamento máxima relativa aumenta com o peso e velocidade angular na broca. Por exemplo, para carga na broca de 120 kN e velocidade angular de 120 RPM, J_3 fica em torno de 0,02 enquanto que no caso 80 kN e 100 RPM, este valor é mais próximo de 0,015.

3.5 Desvio Máximo de Velocidade Angular na Broca.

O critério de desvio máximo de velocidade angular na broca tem por objetivo principal identificar situações nas quais a broca tem que operar a velocidades angulares muito maiores do que aquela para a qual foi projetada. Assim, foi definida a seguinte função:

$$J_4 = \max(\omega_b - \Omega) \quad (16)$$

Sendo que $\max(\omega_b)$ é a máxima velocidade angular na broca atingida pela broca no processo e Ω é a velocidade angular desejada.

Figura 22 –Desvio máximo de velocidade angular na broca para diferentes valores de k_i e k_p .

A Figura 21 mostra, para condição de 100 kN é 100 RPM, os valores de j_4 para diferentes valores de k_i e k_p . Situações com desvio nulo significam que a velocidade angular atingiu 100. Situações com j_4 negativo indicam que durante o processo simulado, a velocidade angular não chegou a 100 RPM em nenhum momento. Isto só ocorreu para valores muito pequenos de k_i .

Os desvios positivos podem ser analisados em três regiões. A primeira (região 1 na Figura 21) teve desvios de até 100 RPM. A segunda região apresentou desvios entre 100 e 130 RPM e a terceira região chega a apresentar desvios de até 300 RPM.

O menor valor positivo de desvio encontrado para esta condição de perfuração foi 0,035 RPM para parâmetros de controle $k_i=16,63$ Nm e $k_p=422,9$ Nms.

Uma comparação do comportamento do critério para todas as condições de operação pode ser vista na Figura 23. O desvio máximo aumenta à medida que a carga na broca e a rotação aumentam.

Figura 23 – Desvio máximo de velocidade máxima absoluta para as nove condições de perfuração.

3.6 Torque Máximo na Broca

Este critério avalia o torque T_m (de controle) máximo aplicado na mesa rotativa necessário para controlar a perfuração. Este critério indica o esforço que o sistema de controle realiza para controlar o sistema. Ele é também importante para avaliação e identificação do motor requerido para a operação.

$$J_5 = \max(|T_m|) \quad (17)$$

O comportamento do torque máximo aplicado foi relativamente uniforme com maiores variações para valores pequenos de k_p .

Figura 24 – Torque máximo na broca para diferentes valores de k_i e k_p .

Na região uniforme (região 1 na Figura 24), o torque máximo oscila em torno de 6,27 e 10,48 kNm, sendo mínimo para $k_i=8,8$ Nm e $k_p=501,0$ Nms com valor de 5,92 kNm. Na região com oscilação (região 2 na Figura 24), torque máximo tem oscilação mais freqüentes dentro da mesma faixa, sendo mínimo em $k_i=8,81$ Nm e $k_p=251$ Nms, com valor de 5,94 kNm.

A Figura 25 mostra o comportamento do torque máximo na broca para as nove condições de operação. Nota-se que, o torque aumenta com a velocidade angular na broca e com a carga axial na broca, e que o comportamento com a variação de k_i e k_p é similar ao anterior.

O índice a ser avaliado é então definido como máximo valor de potência requerida durante o processo de perfuração,

$$J_6 = \max(T_m \omega_m) \quad (18)$$

Conforme pode ser observado na Figura 26, a potência máxima requerida do motor é da ordem de 155 kW para valores relativamente pequenos de k_p . Por outro lado, existe uma região para baixos valores de k_i e valores relativamente elevados de k_p para a qual a potência requerida é significativamente menor (da ordem de 60 kW). O menor valor encontrado para potência foi de 1,8 kW para $k_i=1,0$ Nm e $k_p=32,25$ Nms.

Figura 26 – Potência máxima requerida do motor para diferentes valores de k_i e k_p .

A Figura 27 apresenta os resultados para diferentes condições de perfuração consideradas. Pode ser visto que o padrão de comportamento da potência máxima requerida com o parâmetro de controle é uniforme para as diferentes condições de perfuração. No entanto, os valores de potência aumentam com o aumento da velocidade angular e peso na broca, podendo chegar a 280 kW na pior situação para a condição de 120 kN e 120 RPM.

J ₃	Tensão de Cisalhamento Máxima da Coluna	Os valores são baixos para qualquer conjunto de parâmetros k_i e k_p .
J ₄	Desvio Máximo de Velocidade na Broca	Existe uma região de ganhos ótimos, k_p relativamente elevado e k_i pequeno, que minimizam o desvio máximo de velocidade.
J ₅	Torque Máximo na Broca	Existe uma região de ganhos ótimos, k_p relativamente elevado e k_i pequeno, na qual o torque máximo é significativamente reduzido.
J ₆	Potência Máxima no Motor	Existe uma região de ganhos ótimos, k_p elevado e k_i pequeno, na qual a potência máxima é significativamente reduzida.

CAPÍTULO 4

4 Estratégias Para Melhoria do Desempenho de Perfuração

Neste capítulo, o comportamento do sistema para alguns pares selecionados dos parâmetros de controle k_i e k_p será estudado em detalhes com os seguintes objetivos: i) associar os valores encontrados para os seis critérios globais apresentados no capítulo anterior com a resposta no tempo do sistema e, assim, identificar os diferentes padrões de resposta no tempo e suas relações com o fenômeno de *stick-slip*; ii) identificar pares k_i e k_p que permitam avaliar e comparar o desempenho de controle para diferentes condições de operação (peso na broca e velocidade angular desejado); e, finalmente, iii) com base nos estudos anteriores, propor estratégias de melhoria de desempenho da perfuração através de combinações apropriadas dos parâmetros de controle e das condições de operação.

4.1 Identificação dos Padrões de Resposta no Tempo

Para estabelecer um método para identificação dos padrões de resposta, inicialmente a análise paramétrica dos critérios de desempenho apresentados anteriormente, a saber, taxa de penetração média, desvio médio de velocidade,

torque máximo, tensão de cisalhamento relativo da coluna, potência requerida no motor e desvio máximo de velocidade na broca, serão utilizados para identificar pares de k_i e k_p representativos.

Figura 28 – Desvio médio de velocidade (a), taxa de penetração relativa (b), torque máximo na broca (c), potência requerida para o motor (d), tensão de cisalhamento (e) e desvio máximo de velocidade (f) respectivamente para a condição de 100 kN e 100 RPM.

Para os seis gráficos mostrados na Figura 28, as curvas de nível assumem formas diferentes indicando regiões ótimas diferentes para cada um dos critérios. Pelos gráficos, alguns pares de k_i e k_p podem ser coletados com base nos menores e maiores valores para o critério de taxa de penetração média, desvio médio de velocidade, torque máximo, potência máxima requerida para o motor, tensão de cisalhamento na coluna e desvio máximo de velocidade na broca.

Pode-se observar que os critérios de potência, torque e desvio máximo de velocidade angular (Figura 28d, 28c e 28f), são otimizados para valores relativamente elevados para o parâmetro k_p (maiores que 500 Nms) e pequenos para k_i (menores que 100 Nm). Para o critério de tensão de cisalhamento, valores menores para k_p (entre 300 e 500 Nms) dão origem a melhor desempenho (Figura 28e). Em termos de desvio médio de velocidade angular, (Figura 28a) valores relativamente elevados para k_p (entre 500 e 800 Nms) e relativamente pequenos para k_i (entre 100 e 250 Nm) são mais interessantes. Por outro lado, o critério de taxa de penetração não é significativamente afetado pelos parâmetros de controle (Figura 28b).

As regiões ótimas para cada critério foram destacadas na Figura 28. Com base nesta análise, oito pares de k_i e k_p representativos foram selecionados e são indicados na Figura 29.

Figura 29 – Gráfico de contorno do desvio relativo de velocidade média para condição de 100 kN e 100 RPM.

O primeiro par de parâmetros k_i e k_p dá origem ao ponto que possui os menores valores de potência do motor e desvio máximo de velocidade angular. A resposta no tempo considerando este par k_i e k_p para velocidades angulares da broca e da mesa, potência no motor, torque na broca e na mesa e tensão de cisalhamento relativa à tensão de escoamento são representados na Figura 30. Ela indica que o sistema inicia com uma ocorrência do *stick-slip* logo no início, mas que com a amplificação gradativa da potência do motor, não se repete e não há também elevado sobre-valor de torques e tensão de cisalhamento. A tensão de cisalhamento é relativamente baixa.

Figura 30 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=40$ Nm e $k_p=751$ Nms (ponto 1).

Uma análise similar foi realizada para o segundo par de parâmetros k_i e k_p , o qual dá origem ao ponto com menor valor para o torque aplicado. A resposta apresentada na Figura 31, é semelhante à anterior, mas com menos oscilações e sobre-valor apresentando uma convergência mais rápida dentro de aproximadamente 35 segundos.

Figura 31 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=47,8$ Nm e $k_p=485,3$ Nms (ponto 2).

O terceiro par de k_i e k_p dá origem a um dos maiores requerimentos de potência do motor. Conforme pode ser observado na Figura 32, as respostas possuem grandes oscilações e sem tendência de estabilização definida, devido às várias ocorrências de *stick-slip* com picos de velocidade angular até 246 RPM, muito acima daquela desejada (100 RPM). A potência requerida também chega a picos significativos de 143,5 kNms.

Figura 32 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=407,2$ Nm e $k_p=16,6$ Nms (ponto 3).

O quarto par de k_i e k_p dá origem a um dos maiores torques. Nesta condição, conforme Figura 33, há um grande número de ocorrências de *stick-slip* com grandes variações de velocidade chegando a 280 RPM. A necessidade de potência alta para controlar o sistema demonstra ainda leve tendência de aumento e a tensão de cisalhamento é bastante oscilante.

Figura 33 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=86,9$ Nm e $k_p=16,6$ Nms (ponto 4).

O quinto par de k_i e k_p se encontra próximo da transição da região dita estável (sem ocorrência pronunciada de *stick-slip*) para região dita instável. Neste caso, conforme Figura 34, nota-se redução de potência e torque significativos em relação ao último par de parâmetros. As velocidades angulares da broca e da mesa são menos elevadas e menos oscilantes com primeiros picos de 190 RPM e 160 RPM respectivamente.

Figura 34 – Resposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=438,5$ Nm e $k_p=360,4$ Nms (ponto 5).

Para o sexto par de k_i e k_p , o padrão de resposta é bastante semelhante ao anterior conforme Figura 35. No entanto, as velocidades angulares na broca e na mesa podem atingir valores maiores. Por outro lado, o período de oscilação da resposta também é aumentado, que deve ser devido à redução do parâmetro de ganho de controle integral k_i .

Figura 35 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=118.2$ Nm e $k_p=157,2$ Nms (ponto 6).

O sétimo par de k_i e k_p se encontra em uma região dita estável e dá origem à menor tensão de cisalhamento máxima na coluna conforme Figura 36. Neste caso, nota-se uma oscilação suave de velocidade tanto na broca como na mesa e também na potência e torque.

Figura 36 – Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=86,94$ Nm e $k_p=344,8$ Nms (ponto 7).

O oitavo par de parâmetros k_i e k_p dá origem ao menor desvio médio de velocidade. De fato, da Figura 37 nota-se que as velocidades angulares na mesa e na broca possuem variações mínimas com uma convergência rápida para a velocidade objetivo. Esta resposta pode ser comparada com aquela da Figura 31, a qual possui resposta semelhante, porém com mais alto tempo de resposta e menor potência no motor.

Figura 37 - Reposta no tempo de velocidade na mesa rotativa e na broca (a), potência requerida no motor (b), torque na broca e na mesa rotativa (c) e tensão de cisalhamento (d) para condição de perfuração 100 kN e 100 RPM com parâmetros $k_i=149,43$ Nm e $k_p=657,25$ Nms (ponto 8).

Vale ressaltar que a análise apresentada até então considera condições de operação com peso na broca de 100 kN e velocidade angular desejada de 100 RPM. Para outras condições de operação, a análise deve ser repetida. Foi observado, no entanto, que os padrões de resposta não diferem significativamente para outras condições de operação. No entanto os valores de k_i e k_p (ou as regiões) para os quais cada padrão de resposta, difere para outras condições de operação. Sendo assim, em uma segunda análise, deseja-se identificar valores de k_i e k_p que permitam avaliar a alteração no padrão de resposta devido à mudança na condição de operação.

Visto que o critério de desvio médio de velocidade angular na broca apresenta maiores variações e parece estar bastante correlacionado ao desempenho em

outros critérios, ele é aqui considerado para identificar pares de parâmetros k_i e k_p para esta análise.

A Figura 38 apresenta as curvas de nível para o critério de desvio médio de velocidade angular na broca considerando diferentes condições de operação. Vale ressaltar que a condição de menor peso na broca e maior velocidade angular (80 kN e 120 RPM) seria a condição mais favorável enquanto que a condição oposta de maior peso na broca e menor velocidade angular (120 kN e 80 RPM) estaria mais sujeita ao fenômeno de *stick-slip* e, portanto, poderia ser difícil de controlar.

Figura 38 – Gráfico de contorno dos desvios relativos de velocidade média.

Devido ao grande número de condições de operação, levaremos em consideração as condições extremas, a condição mais aliviada (80 kN e 120 RPM), a condição média (100 kN e 100 RPM) e também a condição mais crítica (120 kN e

80 RPM) para identificação dos pares k_i e k_p . Assume-se, desta forma, que se estaria abrangendo pares representativos para todas as condições de operação. Para facilitar a identificação, os gráficos correspondentes às três condições escolhidas são sobrepostos na Figura 38. O objetivo é determinar um número de pontos que tenham respostas diversas em função das condições de operação. Uma malha de pontos é definida por tipo de pontos, isto é, alguns pontos estarão sempre em regiões estáveis, outros pontos estarão sempre em regiões instáveis e alguns que mudam de região em função da condição de operação.

Figura 39 – Curvas de nível para o critério de desvio médio de velocidade angular para condições de perfuração de 120 kN com 80 RPM, 100 kN com 100 RPM e 80 kN com 120 RPM.

O primeiro ponto (A) definido é para $k_p=200$ Nms e $k_i=100$ Nm para comparação com o estudo apresentado em trabalhos anteriores como Trindade e

Sampaio (2005) e Tucker e Wang (2003). Partindo desta condição, dois outros pontos foram definidos aumentando o valor de k_i para 425 Nm (ponto B) ou o valor de k_p para 800 Nms (ponto E). Combinando os dois maiores valores de k_i e k_p , definiu-se outro ponto (D) com $k_i=425$ Nm e $k_p=800$ Nms. Enfim, dois pontos com valores intermediários para k_p (500 Nms) foram definidos (C e F). Sendo o último ponto (F) considerado com menor valor de k_i (50 Nm) por ser um ponto comum de interesse onde há baixo requerimento de potência e torque e menores valores para os critérios de tensão de cisalhamento e desvio máximo de velocidade angular na broca, como observado na análise anterior. Para maior clareza, os pontos e seus respectivos valores de k_i e k_p são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de k_i e k_p para pontos selecionados.

Ponto #	k_p (Nms)	k_i (Nm)
A	200	100
B	200	425
C	500	425
D	800	425
E	800	100
F	500	50

Para cada par de valores de parâmetros de controle, existem nove respostas possíveis que representam as nove condições de operação em função do peso na broca e velocidade angular na broca, totalizando 54 situações representadas esquematicamente na Figura 40. Foi observado, no entanto, que várias destas situações apresentam padrões de resposta similares.

Figura 40 – Matriz de respostas no tempo para conjunto de dados peso na broca, velocidade angular na broca, k_i e k_p .

Seria de interesse, no entanto, avaliar as estratégias para alterar o padrão de resposta do sistema, seja através dos parâmetros de controle, seja através das condições de operação.

4.2 Estratégias Para Melhoria do Desempenho de Perfuração

Antes de avançar sobre as estratégias de melhoria, deve-se determinar alguns parâmetros para análise das respostas. Levando em consideração as análises anteriores, a identificação da ocorrência do fenômeno de *stick-slip* parece ser suficiente para avaliar o desempenho global da perfuração.

Assim sendo, a diminuição do número de ocorrências de *stick-slip* ou da amplitude de oscilação da velocidade angular causada por ele parece ser um indicativo inicial razoável da melhoria do desempenho da perfuração.

Dentro do conjunto de parâmetros k_i e k_p , valores crescentes não representam necessariamente uma melhoria de resposta.

Uma vez que a condição mais crítica seria com o maior peso na broca (120 kN) e velocidade angular menor (80 RPM), esta será a condição de referência para as análises comparativas de resposta. Assim, a resposta no tempo para esta condição e usando $k_p=200$ Nms e $k_i=100$ Nm é analisada na Figura 41. Ela apresenta *stick-slip* freqüente a cada 25 segundos, dando origem a valores elevados e oscilantes de velocidade angular, potência, torque e tensão de cisalhamento e, portanto, não é uma condição aceitável. Esta situação exerce muito esforço na coluna e na broca reduzindo suas vidas úteis e demanda esforço excessivo do motor.

Figura 41 – Resultados para condição de 120 kN e 80 RPM, com parâmetros de controle $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms.

Com base na resposta de referência (Figura 41), existem várias maneiras possíveis para reduzir a ocorrência de *stick-slip* e assim, melhorar o desempenho de perfuração. Três estratégias serão apresentadas conforme matriz

Figura 42. A tabela demonstra de forma simbólica o local do ponto escolhido no gráfico de resposta padrão, semelhante à Figura 39.

Um método, indicado pelas setas de cor verde, é o ajuste das condições de operação aliviando da carga na broca, aumentando a rotação de perfuração ou ambas.

Uma segunda estratégia normalmente utilizada no processo de perfuração é o ajuste dos parâmetros de controle k_i e k_p demonstrado pelas setas de cor vermelha.

O terceiro método, demonstrado pela seta azul combina as duas propostas anteriores com uma taxa muito maior de alteração.

Figura 42 - Matriz de repostas no tempo para conjunto de dados peso na broca, rotação, k_i e k_p .

A estratégia pode ser freqüentemente utilizada ou alternada para atingir a velocidade alvo.

4.2.1 Variação de Parâmetros de Controle

A primeira estratégia altera os parâmetro de controle k_i e k_p , inicialmente ampliando para 500 e 50 respectivamente. Conforme Figura 43, a resposta tem mudança considerável, apresentando uma ocorrência inicial de *stick-slip*. Com relação à resposta de referência (Figura 41), a potência requerida, a torção da coluna e torque na broca foram reduzidos significativamente. Ocorre pouco sobrevalor de velocidade angular na mesa e na broca, entrando em regime permanente próximo de 50 segundos.

Figura 43 – Resultados para condição de 120 kN e 80RPM, com parâmetros de controle $k_i=50$ Nm e $k_p=500$ Nms.

Ajustando agora para $k_i=800$ Nm e $k_p=100$ Nms, a resposta se assemelha em forma à resposta anterior porem com mais oscilação principalmente de velocidade angular na broca e na mesa e de tensão cisalhante, conforme Figura 44. Isto ocorre devido ao aumento excessivo dos parâmetros de controle. Leva-se mais tempo para estabilização (75 segundos).

Figura 44 – Resultados para condição de 120 kN e 80 RPM, com parâmetros de controle $k_i=100$ Nm e $k_p=800$ Nms.

Outro ajuste dos parâmetros de controle para $k_p=800$ Nms e $k_i=425$ Nm, a resposta conforme Figura 45 se torna instável sem tendência de convergência. A potência requerida ultrapassa os 100 kNms e a velocidade angular na mesa e na broca tem o dobro de variação comparada à velocidade angular alvo. A torção da coluna ultrapassa 1,2% de tensão cisalhante relativa

Figura 45 – Resultados para condição de 120 kN e 80 RPM, com parâmetros de controle $k_i=425$ Nm e $k_p=800$ Nms.

A primeira modificação de parâmetros para $k_p=500$ Nm e $k_i=50$ Nm se mostrou mais eficiente, convergindo em menor tempo, com valores de torque, potência e tensão cisalhante da coluna relativamente baixo.

4.2.2 Variação de Condições de Operação

A segunda estratégia de controle, muito usada na prática da perfuração, consiste no alívio da carga na broca e ou aumento da velocidade angular, que está representado pela mudança de condições na seta de cor verde na

Figura 42.

Inicialmente, com base na resposta padrão Figura 41, aplicamos um aumento de rotação de perfuração passando de 80 RPM para 100 RPM. A resposta é vista na

Figura 46. A potência sofre alteração com pontos acima de 100 kNms. Os demais dados permanecem sem alteração significativa exceto pelo tempo em que a broca permanece em *stick*, que é reduzido.

Figura 46 – Resultados para condição de 120 kN e 100 RPM, com parâmetros de controle $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms.

Aplicando um aumento de velocidade angular para 120 RPM, houve mudança significativa no padrão de resposta conforme Figura 47.

A resposta está próxima de aceitável apresentando duas ocorrências de *stick-slip* e uma clara tendência de convergência. A potência requerida aumenta atingindo 150 kNms devido ao travamento da broca, com tendência de redução, porém, a coluna chega a ter 1,5 % de tensão cisalhante relativa.

Figura 47 – Resultados para condição de 120 kN e 120 RPM, com parâmetros de controle $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms.

A segunda aproximação de teve resultado mais eficiente, porém ainda tem duas ocorrências de *stick-slip*. Desta forma, para melhorar a resposta, parte-se para redução do carregamento ao invés de aumentar a velocidade, de 120 kN para 100 kN.

A resposta conforme Figura 48, demonstra-se aceitável, com uma ocorrência de *stick-slip* e esforços reduzidos. A potência requerida diminui chegando à máxima de 108 kNms e a tensão cisalhante relativa reduziu para 1,1 %. Já a velocidade, mesmo com padrão oscilatório, demonstra convergência.

Figura 48 – Resultados para condição de 100 kN e 120 RPM, com parâmetros de controle $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms.

4.2.3 Variação Conjunta de Parâmetros de Controle e Condições de Operação

Esta estratégia aplica as duas estratégias propostas anteriormente com o objetivo de uma resposta mais rápida. Com base na

Figura 42, esta estratégia é representada pela seta na cor azul.

Considerando a condição inicial estabelecida na Figura 41, (120 kN e 80 RPM com $k_i=100$ Nm e $k_p=200$ Nms), propõem-se amplificação dos parâmetros para $k_p=500$ Nms e $k_i=50$ Nm, a rotação é aumentada para 100 RPM e o peso na broca reduzido para 100 kN. A resposta se mostrou convergente, aceitável e sem sobre-valor de rotação. A resposta conforme Figura 49 compara a primeira estratégia (apenas com a modificação dos parâmetros de controle k_i e k_p), com a variação conjunta.

O tempo em que a broca permanece no estado *stick* no início da perfuração é reduzido para 3s. A convergência se dá mais rápida com rotação mais elevada e os torques são mais baixos devido à redução do peso na broca.

Figura 49 – Resultados para condição de 120 kN e 80 RPM (linhas verde contínua e azul tracejada), para condição de 100 kN e 100 RPM (linhas vermelha contínua e preta tracejada) com parâmetros de controle $k_i=50$ Nm e $k_p=500$ Nms.

A resposta sobre uma variação dos parâmetros de controle e condições de operação não garantem que a resposta será aceitável. A alteração dos parâmetros de controle e condições de operação de forma conjunta, deve ser aplicada onde há certo conhecimento da situação e dos dados de perfuração.

4.2.4 Análise de Desempenho das Propostas Apresentadas

As propostas apresentadas anteriormente demonstraram-se eficientes em reduzir o número de ocorrências de *stick-slip* mantendo uma estabilidade aceitável da velocidade angular na broca, o que significa melhor aproveitamento na perfuração, porém, uma análise de desempenho da perfuração se faz necessário para entender o quanto a estabilidade influencia no desempenho de perfuração.

A Tabela 5 demonstra a profundidade perfurada média por hora em função da condição de operação e conjunto de parâmetros de controle.

Tabela 5 – Taxa de penetração média (ROP) em m/h de pontos selecionados

WOB (kN)	<div> <div>k_i (Nm)</div> <div>k_p (Nms)</div> <div>RPM</div> </div>	ROP objetivo	50	100		425		
			500	200	800	200	500	800
80	80	8,1	7,7	7,9	7,9	8,0	8,0	8,0
	100	9,2	8,8	8,9	8,9	9,1	9,1	9,1
	120	10,2	9,8	10,0	10,0	10,1	10,1	10,1
100	80	12,2	11,7	11,9	11,9	12,2	12,1	12,1
	100	13,3	12,8	13,0	13,0	13,2	13,1	13,1
	120	14,3	13,8	14,0	14,0	14,2	14,2	14,2
120	80	16,3	15,7	15,8	16,0	16,0	16,1	16,1
	100	17,3	16,8	16,7	17,0	17,2	17,2	17,2
	120	18,4	17,8	18,0	18,1	18,4	18,3	18,2

A primeira conclusão que se pode tirar da tabela é que quanto maior é o peso na broca (WOB), melhor é a profundidade perfurada. No entanto, com o aumento no peso da broca, os problemas de vibrações, como *stick-slip* também aumentam. Desta forma para minimizar estes problemas de estabilidade, pode-se ou mudar os parâmetros de controle ou aumentar o RPM.

Pode ser visto nas linhas da Tabela 5 que a mudança dos parâmetros de controle não afeta significativamente a profundidade perfurada, mas, soluciona outros problemas relacionados ao *stick-slip*. Portanto, o acerto dos parâmetros de controle é importante para garantir uma determinada taxa de penetração (ROP) com estabilidade, segurança, menor custo, entre outros fatores.

Em termos de profundidade perfurada, não é vantagem o aumento de rotação ao custo de menor carga na broca, para obter uma possível melhora da instabilidade de perfuração. Se a carga na broca for reduzida em 20 kN e a rotação aumentada em 20 RPM a profundidade perfurada média é reduzida entre 2 e 3 m/h.

Um ponto a ser discutido é que para algumas condições que consideramos instáveis nos capítulos anteriores ($k_i=425$ Nm e $k_p=200$ Nms), os resultados de profundidade perfurada chegam ser melhores que em condições estáveis, até próximos do objetivo, porém, esta melhora é pouco expressiva em torno de 3%, o que não justifica a utilização deste ajuste devido à diversos outros problemas de estabilidade.

CAPÍTULO 5

5 Conclusão

Neste trabalho foi realizado uma modelagem torcional de um sistema de perfuração de petróleo com 2 GDLs acoplado ao modelo de interação entre broca e formação rochosa para análise dinâmica de perfuração. O acoplamento foi feito com base nas leis de atrito seco assumindo que as condições se assemelham ao mesmo. Foi aplicado controle PI em função da velocidade para estabilização do sistema e análise das repostas dinâmicas.

O estudo permitiu estudar nove condições de operação sendo 80, 100 e 120 kN de carga na broca e 80, 100 e 120 RPM. Outros valores distintos do mencionado poderiam ser estudados, mas não foi o escopo deste trabalho.

Uma simulação do sistema foi desenvolvida com sucesso e apresentada em ambiente Matlab, mostrando respostas no tempo para determinadas condições. O modelo e resposta foram validados através de comparação entre respostas no tempo para uma condição igual em modelos da literatura sobre assuntos semelhantes. A resposta se mostrou robusta considerando as restrições do modelo proposto.

Uma metodologia foi desenvolvida com base em seis critérios de desempenho dinâmico do sistema. Com a análise do capítulo 3, concluiu-se que existem regiões de ganhos ótimos para os critérios de desvio médio de velocidade na broca, desvio máximo de velocidade na broca, torque máximo na broca e potência máxima requerida no motor. A resposta para os critérios de potência, torque e desvio máximo de velocidade angular são otimizados para valores elevados para o parâmetro k_p e pequenos para k_i . Para o critério de tensão de cisalhamento, valores menores para k_p dão origem a melhor desempenho. Em termos de desvio médio de velocidade angular, valores relativamente elevados para k_p e relativamente pequenos para k_i são mais interessantes. Por outro lado, o critério de taxa de penetração não é significativamente afetado pelos parâmetros de controle.

Com a criação de critérios de desempenho foi possível analisar respostas aceitáveis e identificar pontos críticos. Além disto, permitiram também a entender que resultados aceitáveis de perfuração, não necessariamente apresentam respostas dinâmicas severas e vice-versa.

Foram analisadas parametricamente respostas para as condições de operação com k_i e k_p até 500 Nm e 1000 Nms respectivamente, possibilitando a identificação de estratégias de controle para redução do *stick-slip* e melhor desempenho dinâmico do sistema. Pode-se variar a rotação e peso na broca para melhor o desempenho de forma que o resultado fique dentro das regiões de ótimo. Observou-se que a variação dos parâmetros de controle não traz grandes diferenças de taxa de penetração, porém a variação das condições de operação é bastante relevante para taxa de penetração média.

Finalmente, a análise demonstrou que para o sistema, apesar de ser submetido a esforços de vários tipos, existe um conjunto de parâmetros possível

para obtenção de respostas aceitáveis para as condições de perfuração escolhidas através de um controle de velocidade não-colocalizado. Pode-se obter uma resposta estável e com bom desempenho de perfuração ao mesmo tempo.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, os seguintes trabalhos futuros poderiam ser sugeridos:

- 1) Análise paramétrica mais detalhada das regiões de ganho ótimo, incluindo elaboração de um índice global de desempenho levando em conta os critérios estudados neste trabalho e sua extensão natural à otimização robusta do sistema;
- 2) Inclusão de outros critérios como fadiga da coluna de perfuração devida ao caráter oscilatório da tensão de cisalhamento;
- 3) Refinamento do modelo estrutural considerado, incluindo um maior número de graus de liberdade (por meio de elementos finitos, p.ex.) e/ou outros componentes de vibração (como axial e transversal);
- 4) Aprimoramento do modelo de interação broca-formação, incluindo aspectos viscosos e atrito devido a fluido interno e externo;
- 5) Estudo da variabilidade nas condições de contorno devido a incertezas da lei de atrito considerado e de seus parâmetros.

Referências Bibliográficas

BRETT J. F. (1992). The genesis of torsional drillstring vibrations, **SPE Drilling Engineering**, Vol. 7, No. 3, pp. 168–174.

CHRISTOFOROU A. P.: YIGIT A. S. (2003). Fully coupled vibrations of actively controlled drillstrings. **Journal of Sound And Vibration**, Vol. 267, pp. 1029-1045.

CRAIG JR. R.R. (1981). **Structural Dynamics. An Introduction to Computer Methods**. Sixth Edition. John Wiley & Sons, Inc..

ELSAIED M. A.: DAREING D. W.: VONDERHEIDE M. A. (1997). Effect of torsion on stability, dynamic forces, and vibration characteristics in drillstring. **Journal of Energy Resources Technology**, Vol. 119, pp. 11-17.

INMAN D.J. (1989). **Vibration - With Control, Measurement, and Stability**. Second edition. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.

INMAN D.J. (1994). **Engineering Vibration**. Second edition. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.

JANSEN, J.D.: VAN DEN STEEN, L. (1995). Active damping of self-excited torsional vibration in oil well drillstrings. **Journal of Sound And Vibration**, Vol. 179, No. 4, pp. 647-668.

JORDAN D.W.: SMITH P. (1991). **Nonlinear Ordinary Differential Equations**. Second Edition. Oxford Univerty Press.

LÓPEZ M. N.:SUÁREZ R. (2004). Practical approach to modeling and controlling stick-slip oscilations in oilwell drillstring. **Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, Taipei, Setembro**, pp. 1454-1460.

OGATA K. (2003). **Engenharia de Controle Moderno**. Quarta edição. Prentice Hall.

PLACIDO J. C. R.: SANTOS H. M. R.: GALEANO Y. D. (2002). Drillstring vibration and wellbore instability. **Journal of Energy Resources Technology**, Vol. 124, pp. 217-222.

RICHARD T.: DETOUNAY E. (2000). Stick-slip motion in a friction oscillator with normal and tangential mode coupling. **Comptes Rendus de Académie des Sciences.**, Vol. 328, pp. 671-678, Série II b.

RICHARD T.: GERMAY C.: DETOUNAY E. (2004). Self-exited stick-slip oscilations of drill bits. **Comptes Rendus de Mécanique**, Vol. 332, pp. 619-626.

RITTO T. G.: SOIZE C.: SAMPAIO R. (2009). Non-linear dynamics of a drill-string with uncertain model of the bit-rock interaction. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, Vol. 44, pp. 865-876.

SCHLUMBERGER, (2006). Shock and vibration in the drilling environment. Material explicativo em video. 8:20 minutos.

SPANOS P. D.: SENGUPTA A. K.: CUNNINGHAM R. A.: PASLAY P. R. (1995). Modeling of Roller Cone Bit Lift-Off Dynamics in Rotary Drilling. **Journal of Energy Resources Technology**, Vol. 117, pp. 197-207.

TRINDADE, M.A.: SAMPAIO, R. (2005). Active control of coupled axial and torsional drill-string vibrations. **Proceedings of COBEM**,

TRINDADE, M.A.: WOLTER, C.: SAMPAIO, R. (2005). Karhunen–Löeve decomposition of coupled axial/bending vibrations of beams subject to impacts. **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 279, pp. 1015–1036.

TUCKER R.W.: WANG C. (1999a). On the effective control of torcional vibrations in drilling systems. **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 224, No. 1, pp. 101-122.

TUCKER R.W.: WANG C. (1999b). An integrated model for drill-string dynamics. **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 224, No. 1, pp. 123-165.

TUCKER R.W.: WANG C. (2003). Torsional vibration control and cosserat dynamics of a drill-rig assembly. **Meccanica**, Vol. 38, pp. 143-159.