Hugo Leonardo Salomão Monteiro

Análise de desempenho de diferentes leis de controle
de vibrações torcionais em colunas de perfuração de
poços de petróleo

São Carlos
2012

Hugo Leonardo Salomão Monteiro

Análise de desempenho de diferentes leis de controle
de vibrações torcionais em colunas de perfuração de
poços de petróleo

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.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Areias Trindade

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

São Carlos
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, 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

M775a Monteiro, Hugo Leonardo Salomão
Análise de desempenho de diferentes leis de controle de
vibrações torcionais em colunas de perfuração de poços de
petróleo / Hugo Leonardo Salomão Monteiro ; orientador
Marcelo Areias Trindade. -- São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica de
Máquinas e Sistemas) -- Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo.

1. Perfuração de poços de petróleo. 2. Controle de
vibrações torcionais. 3. Fenômeno *stick-slip*. 4. Dinâmica
de colunas de perfuração. 5. Controle de velocidade.
6. Otimização. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **HUGO LEONARDO SALOMÃO MONTEIRO**

Título da dissertação: "Análise de desempenho de diferentes leis de controle de vibrações torcionais em colunas de perfuração de poços de petróleo".

Data da defesa: 09/04/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Rodrigo Nicoletti**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **José Manoel Balthazar**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/campus de Rio Claro)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

Dedico este trabalho aos meus pais.

Agradecimentos

Para mim, é impossível agradecer por completo a todas as pessoas, que me auxiliaram a concluir este trabalho, sendo o que, buscarei fazê-lo de forma impessoal, pois não conseguirei nomear a todos.

A Deus, em primeiro lugar, sem o qual nada é possível.

A Jesus e à Codificação Espírita, que dão sentido a tudo o que passamos e o que vamos passar.

À USP pela formação e por possibilitar a continuidade dos estudos.

À UFSCar por ter me concedido o tempo e o incentivo para realização deste tentame.

Ao professor orientador, pela paciência e confiança e todo suporte técnico.

Aos meus companheiros de trabalho na UFSCar, pelo incentivo e apoio.

A toda a minha família, que correspondem aos meus pais, irmãos, tios e tias, primos e primas, avós paternos e maternos, namorada e sua família, por tudo.

Aos amigos, que, aqui e ali, sempre estiveram presentes, fisicamente, ou em pensamento, na forma de preces ou vibrações positivas.

Aos amigos iteanos, pelo apoio imprescindível, e por me resgatar aos verdadeiros valores do estudo.

A todos aqueles que me auxiliaram, de alguma forma.

"Meu Pai trabalha até hoje, e eu trabalho também". Jesus (João 5:17)

"É preciso trabalhar!" (Louis Pasteur, 1822 - 1895)

Resumo

Monteiro, H. L. S. **Análise de desempenho de diferentes leis de controle de vibrações torcionais em colunas de perfuração de poços de petróleo.** 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

O fenômeno de *stick-slip*, no processo de perfuração de poços de petróleo, é propiciado pela interação entre broca e formação rochosa e pode dar origem a grandes oscilações na velocidade angular podendo provocar danos irreparáveis ao processo. Neste trabalho, analisa-se o desempenho de leis de controle aplicadas à mesa rotativa (responsável por movimentar a coluna de perfuração), visando à redução de *stick-slip* e de oscilações da velocidade angular da broca. As leis de controle implementadas são do tipo PI (Proporcional-Integral), com parcelas de torque aplicado à mesa rotativa, proporcional e integral à velocidade da mesa, podendo ser com peso na broca constante ou variável. Para a coluna de perfuração, foi proposto um modelo em elementos finitos com função de forma linear. O torque na broca foi modelado segundo atrito de Coulomb pela forma não regularizada, curva esta ajustada pelos dados empíricos conforme propostas da literatura. Diversos critérios de desempenho foram analisados e foi observado que a minimização do desvio médio da velocidade angular em relação à referência propicia melhores condições de operação. Análises paramétricas dos ganhos de controle proporcional e integral foram realizadas, dando origem a curvas de nível para o desvio médio de velocidade angular na broca. A partir destas curvas, foram definidas regiões de estabilidade nas quais o desvio é aceitável. Estas regiões foram observadas serem maiores para menores pesos na broca e maiores velocidades angulares de referência e vice-versa. A adição do controle do peso na broca permitiu uma redução global dos níveis de desvio médio de velocidade angular, dando origem a um aumento das regiões de estabilidade do processo de perfuração.

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

Abstract

Monteiro, H. L. S. **Performance analysis of different control laws for torsional vibrations in oil wells drillstrings.** 2012. Master's dissertation - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

The stick-slip phenomenon, in the process of drilling oil wells, due to the interaction between drill and rock formation can lead to large fluctuations in drill-bit angular velocity and, thus, cause irreparable damage to the process. In this work, the performance of control laws applied to the rotary table (responsible for moving the drill string) is analyzed, in order to reduce stick-slip and drill-bit angular velocity oscillations. The control laws implemented are based on a PI (Proportional-Integral) controller, for which the torque applied to the rotating table has components proportional and integral to table angular velocity with constant or variable WOB (Weight On Bit). For the drillstring, a finite element model with a linear interpolation was proposed. The torque on the drill-bit was modeled by a non-regularized Coulomb friction model, with parameters that were adjusted using empirical data proposed in literature. Several performance criteria were analyzed and it was observed that the minimization of the mean deviation of the drill-bit angular velocity relative to the target one would provide the best operating condition. Parametric analyses of proportional and integral control gains were performed, yielding level curves for the mean deviation of drill-bit angular velocity. From these curves, stability regions were defined in which the deviation is acceptable. These regions were observed to be wider for smaller values of WOB and higher values of target angular velocity and vice-versa. The inclusion of a controlled dynamic WOB reduced the levels of mean deviation of angular velocity, leading to improved stability regions for the drilling process.

Keywords: Oil well drilling, torsional vibration control, stick-slip, drill-string dynamics, speed control, optimization.

Lista de tabelas

Tabela 1	Valores numéricos de parâmetros de perfuração (TUCKER e WANG, 2003).	59
Tabela 2	Coefficientes A , B , a_1 , a_2 , β , para a função modeladora do torque na broca não regularizada, para os valores de pesos na broca: 80, 100, 120, 140 e 160kN.	63
Tabela 3	Quadro-resumo para a modelo considerado para o sistema de perfuração, dividido em coluna de perfuração, torque na mesa e torque na broca.	66
Tabela 4	Quadro resumo das Técnicas de Controle consideradas para a análise de desempenho na minimização ou eliminação das oscilações na velocidade da broca e do fenômeno <i>stick-slip</i>	75
Tabela 5	Faixa de valores para K_w para trabalho em malhas paramétricas de acordo com WOB_0	76
Tabela 6	Quadro resumo dos resultados obtidos para os critérios de análise de segurança e desempenho.	88
Tabela 7	Descrição das malhas de otimização, com os valores de K_p e K_i e pontos ótimos com respectivos desvios relativos (J_I), obtidas com Controle PI e WOB igual a 80kN.	92
Tabela 8	Descrição das malhas de otimização, com os valores de K_p e K_i e pontos ótimos com respectivos desvios relativos (J_I), obtidas com Controle PI e WOB igual a 100kN.	94
Tabela 9	Descrição da malha de otimização, com os valores de K_p e K_i e pontos ótimos com respectivos desvios relativos (J_I), obtida com Controle PI e WOB igual a 120kN.	96

Tabela 10	Planilha de desvios J_I para pares de Kp (N.m.s) e Ki (N.m) obtidos com Controle PI e WOB igual a 120kN.	97
Tabela 11	Descrição das malhas de otimização com os valores de Kp e Ki e pontos ótimos com respectivos desvios relativos (J_I), obtidas com Controle PI e WOB igual a 140kN.	100
Tabela 12	Planilha de desvios J_I para pares de Kp (N.m.s) e Ki (N.m) obtidos com Controle PI e WOB igual a 140kN.	100
Tabela 13	Descrição das malhas de otimização com os valores de Kp e Ki e pontos ótimos com respectivos desvios relativos (J_I), obtidas com Controle PI e WOB igual a 160kN.	103
Tabela 14	Quadro-resumo para os resultados das malhas paramétricas obtidas para cada WOB com Controle PI e WOB constante e $\omega_{ref} = 100rpm$	106
Tabela 15	Quadro-resumo para as malhas paramétricas obtidas por Controle PI para diferentes pesos na broca e velocidades angulares de referência.	108
Tabela 16	Pares de parâmetros Kp e Ki adotados para avaliar o desempenho das duas formas de Controle propostas.	110
Tabela 17	Relação comparativa dos desvios J_I obtidos para as duas técnicas de controle propostas para os pares de valores dos parâmetros Kp e Ki	113
Tabela 18	Quadro-resumo de análise dos resultados obtidos com Controle PI com WOB constante e Controle PI com WOB variável.	121

Lista de figuras

Figura 1	Esquema simplificado de uma sonda rotativa. (OLIVEIRA, 2011).	35
Figura 2	Equipamentos de uma sonda de perfuração rotativa. (a) Mesa rotativa. (b) Kelly. (c) Swivel, ou cabeça de injeção. (THOMAS, 2001).	36
Figura 3	Comando (<i>drill collar</i>) de uma coluna de perfuração. (THOMAS, 2001).	38
Figura 4	Tubos de paredes espessas de uma coluna de perfuração. (THOMAS, 2001).	39
Figura 5	Tubos de perfuração (<i>drill pipes</i>) de uma coluna de perfuração. (THOMAS, 2001).	39
Figura 6	Brocas utilizadas em perfuração de poços. (a) sem partes móveis. (b) com partes móveis. (PLÁCIDO e PINHO, 2009).	40
Figura 7	Esquema representativo de uma coluna de perfuração sujeita a vibrações axiais, torcionais e laterais. (ALAMO, 2004).	42
Figura 8	Fenômeno <i>stick-slip</i> presente em processo de perfuração, registrado a 1976m de profundidade. (PLÁCIDO, SANTOS e GALEANO, 2002).	44
Figura 9	Exemplo de situação em que se detecta o fenômeno de <i>stick-slip</i> , para velocidade angular de referência igual a 100rpm.	45
Figura 10	Estrutura típica de um sistema de perfuração rotativo. (BATAKO, BABITSKY e HALLIWELL, 2003).	51
Figura 11	Elemento em torção (RAO, 2003).	53
Figura 12	Modelo esquemático de um controlador PI com peso na broca constante, adotado para o sistema de perfuração.	57

Figura 13	Modelo de torque na broca segundo atrito de Coulomb, de acordo com proposta de Navarro-López e Suárez (2004), por Manzatto (2011).	58
Figura 14	Função de torque na broca regularizada trabalhada por Trindade e Sampaio (2005), para pesos na broca iguais a 80, 100, 120, 140 e 160kN, em escala de cores.	60
Figura 15	Modo pelo qual foi feita a aproximação em relação à proposta deste trabalho, em vermelho, pela função de torque regularizada por Trindade e Sampaio (2005), para o intervalo de velocidades na broca de 0 a 50rad/s.	62
Figura 16	Coeficientes a_1 , a_2 e β em (a), (b) e (c), respectivamente, para função modeladora do torque na broca não regularizada, segundo atrito de Coulomb, para o peso na broca entre 80 a 160kN.	62
Figura 17	Curvas de torque na broca não regularizadas modeladas pela proposta de Navarro-López e Suárez (2004), em vermelho, e aproximadas pela função obtida por Trindade e Sampaio (2005), em preto, para WOB = (a) 80kN. (b) 100kN. (c)120kN. (d)140kN. (e) 160kN.	64
Figura 18	Esquema representativo do modelo do sistema de perfuração, envolvendo a mesa rotativa, o conjunto da broca e a coluna de perfuração.	65
Figura 19	Velocidades e torques para a broca e mesa no tempo para $K_p = 200\text{N.m.s}$, $K_i = 100\text{N.m}$, $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$ e $WOB = 120\text{kN}$, obtidos: (a) utilizando-se o modelo da coluna proposto e a função de torque na broca regularizada, de Trindade e Sampaio (2005). (b) por Trindade e Sampaio (2005). (c) utilizando-se o modelo de conjunto proposto com a função de torque na broca não regularizado.	67
Figura 20	(a) Velocidade da broca (rad/s) no tempo (s) para o modelo proposto de torque na broca não regularizado, com os parâmetros $WOB = 120\text{kN}$, $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$, velocidade inicial = 70rpm, $K_p = 200\text{ N.m.s}$, $K_i = 100\text{N.m}$, considerada para os números de nós 10, 20, 50, 100 e 200.(b) zoom de retângulo superior. (c) zoom de retângulo inferior.	69
Figura 21	Gráficos para análise da influência dos parâmetros proporcional e integral no controle PI com peso na broca igual a 120kN e $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$, mantendo-se $K_p = 200\text{N.m.s}$. (a), (b) $K_i = 50\text{N.m}$. (c), (d) $K_i=100\text{N.m}$. (e), (f) $K_i = 200\text{N.m}$	70
Figura 22	Gráficos para análise da influência dos parâmetros proporcional e integral no controle PI com peso na broca igual a 120kN e $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$, mantendo-se $K_i = 100\text{N.m}$ e $K_p = 100\text{N.m.s}$ (a), (b); $K_p = 200\text{N.m.s}$ (c), (d); $K_p = 400\text{N.m.s}$ (e), (f).	71

Figura 23	Velocidade na broca e na mesa no tempo para a função torque regularizada para $WOB = 80\text{kN}$ (a), $WOB = 100\text{kN}$ (b), $WOB = 120\text{kN}$ (c), $WOB = 140\text{kN}$ (d), $WOB = 160\text{kN}$ (e).	73
Figura 24	Modelo esquemático de um controlador PI com peso na broca variável, adotado para o sistema de perfuração.	74
Figura 25	<i>Variação do WOB</i> em função da velocidade para K_w entre 0 e 1.5, $WOB_0 = 120\text{kN}$	76
Figura 26	Potência máxima requerida do motor (J_6), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e $WOB =$ (a)80kN. (b)100kN. (c)140kN. (d)160kN.	79
Figura 27	Potência máxima requerida do motor (J_6), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e $WOB = 120\text{kN}$, em curvas de nível.	79
Figura 28	Torque máximo na broca (J_5), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e $WOB =$ (a) 80kN. (b)100kN. (c)140kN. (d)160kN.	80
Figura 29	Torque máximo na broca (J_5), para K_p de 0 a 1000N.m.s e K_i de 0 a 1000N.m e $WOB = 120\text{kN}$, em curvas de nível na faixa de valores de 0 a 20kN.m.	81
Figura 30	Desvio máximo de velocidade angular da broca (J_4), para K_p de 0 a 1000N.m.s e K_i de 0 a 1000N.m e $WOB =$ (a)80kN, (b)100kN, (c)140kN, (d)160kN.	82
Figura 31	Desvio máximo de velocidade angular da broca (J_4), para K_p de 0 a 1000N.m.s e K_i de 0 a 1000N.m e $WOB = 120\text{kN}$	83
Figura 32	Relação percentual entre a tensão de cisalhamento máxima atingida na coluna e a tensão admissível (J_3), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e $WOB =$ (a)80kN. (b)100kN. (c)140kN. (d)160kN.	84
Figura 33	Relação percentual entre a tensão de cisalhamento máxima atingida na coluna e a tensão admissível (J_3), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e $WOB = 120\text{kN}$, em curvas de nível na faixa de valores de 0 a 100%.	85
Figura 34	Taxa de penetração média relativa (J_2), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e $WOB =$ (a)80kN. (b) 100kN. (c) 140kN. (d) 160kN.	86
Figura 35	Taxa de penetração média relativa (J_2), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e $WOB = 120\text{kN}$, em curvas de nível na faixa de valores compreendida pelo intervalo de -30% a 0,5%.	87

Figura 36	Desvio médio da velocidade angular da broca (J_I), para K_p de 0 a 4000N.m.s, a cada 100N.m.s e K_i de 0 a 1600N.m, a cada 50N.m, com Controle PI e WOB igual a 80kN. Em 3 (três) dimensões (a); em 2 (duas) dimensões (curvas de nível) (b).	91
Figura 37	Desvio médio da velocidade angular da broca (J_I), para K_p de 0 a 1500N.m.s, a cada 50N.m.s e K_i de 0 a 750N.m, a cada 50N.m, com Controle PI e WOB igual a 100kN. Em 3 (três) dimensões (a); em 2 (duas) dimensões (curvas de nível) (b).	93
Figura 38	Desvio médio da velocidade angular da broca (J_I), para K_p de 0 a 1100N.m.s, a cada 25N.m.s e K_i de 0 a 450N.m, a cada 25N.m, com Controle PI e WOB igual a 120kN. Em 3 (três) dimensões (a); em 2 (duas) dimensões (curvas de nível) (b).	95
Figura 39	Velocidades da broca e da mesa no intervalo de tempo de 0 a 100s para diferentes valores de desvio J_I com Controlador PI com WOB constante e igual a 120kN.	98
Figura 40	Desvio médio da velocidade angular da broca (J_I), para K_p de 0 a 800N.m.s, a cada 25N.m.s e K_i de 0 a 250N.m, a cada 25N.m, com controlador PI e WOB constante igual a 140kN. Em 3 (três) dimensões (a); em 2 (duas) dimensões (curvas de nível) (b).	99
Figura 41	Velocidades da broca e da mesa no intervalo de tempo de 0 a 100s para diferentes valores de desvio J_I com Controlador PI com WOB constante e igual a 140kN.	101
Figura 42	Desvio médio da velocidade angular da broca (J_I), para K_p de 500 a 680N.m.s, a cada 10N.m.s e K_i de 20 a 180N.m, a cada 10N.m, com controlador PI e WOB constante igual a 160kN. Em 3 (três) dimensões (a); em 2 (duas) dimensões (curvas de nível) (b).	102
Figura 43	Malhas de parametrização em (a) e (b) refinamento de (a), de valores K_p e K_i com Controle PI e WOB = 160kN.	103
Figura 44	Velocidades da broca e da mesa para os pontos ótimos encontrados para valores de K_p e K_i e com Controle PI e WOB igual a 80kN.	104
Figura 45	Quadro comparativo das curvas de nível obtidas por Controle PI para diferentes valores de peso na broca.	105
Figura 46	Quadro comparativo para diferentes velocidades de referência (80, 100, 120rpm) e pesos na broca (80, 100, 120, 140 e 160kN), em curvas de nível para o desvio J_I (0 a 100) obtidas por Controle PI, para valores de K_p de 350 a 800N.m.s e K_i de 0 a 250N.m.	107

Figura 47	Velocidades na broca e na mesa em função do tempo para o ponto 4 adotado para $WOB = 80\text{kN}$ ($Kp = 200\text{N.m.s}$, $Ki = 450\text{N.m}$); (a) Controle PI com peso na broca constante; (b) Controle PI com peso na broca variável ($WOB_0 = 80\text{kN}$, $Kw = 3.1$); (c) Variação do peso na broca em função do tempo para estes valores de WOB_0 e Kw	110
Figura 48	Velocidades na broca e na mesa em função do tempo para o ponto 2 adotado para $WOB = 100\text{kN}$ ($Kp = 350\text{N.m.s}$, $Ki = 300\text{N.m}$); (a) Controle PI com peso na broca constante; (b) Controle PI com peso na broca variável ($WOB_0 = 100\text{kN}$, $Kw = 3.7$); (c) Variação do peso na broca em função do tempo para estes valores de WOB_0 e Kw	111
Figura 49	Velocidades na broca e na mesa em função do tempo para o ponto 2 adotado para $WOB = 120\text{kN}$ ($Kp = 525\text{N.m.s}$, $Ki = 250\text{N.m}$); (a) Controle PI com peso na broca constante; (b) Controle PI com peso na broca variável ($WOB_0 = 120\text{kN}$, $Kw = 3.9$); (c) Variação do peso na broca em função do tempo para estes valores de WOB_0 e Kw	112
Figura 50	Velocidades na broca e na mesa em função do tempo para o ponto 2 adotado para $WOB = 140\text{kN}$ ($Kp = 575\text{N.m.s}$, $Ki = 175\text{N.m}$); (a) Controle PI com peso na broca constante; (b) Controle PI com peso na broca variável ($WOB_0 = 140\text{kN}$, $Kw = 1.4$); (c) Variação do peso na broca em função do tempo para estes valores de WOB_0 e Kw	112
Figura 51	Desvio médio da velocidade angular do ponto ótimo (J_I) em relação ao $WOB(\text{kN})$, em vermelho para PI, em azul para PI com WOB variável.	114
Figura 52	Curvas de nível para Kp (0 a 4000N.m.s , com passo 100N.m.s) e Ki (0 a 1600N.m , com passo 50N.m), com Controle PI e (a) $WOB = 80\text{kN}$. (b) WOB variável com $WOB_0 = 80\text{kN}$ e $Kw = 0.5$	115
Figura 53	Curvas de nível para Kp (0 a 1500N.m.s , com passo 50N.m.s) e Ki (0 a 750N.m , com passo 50N.m) com Controle PI e (a) $WOB = 100\text{kN}$. (b) WOB variável, com $WOB_0 = 100\text{kN}$ e $Kw = 1.2$	116
Figura 54	Curvas de nível para Kp (0 a 1100N.m.s , com passo 25N.m.s) e Ki (0 a 450N.m , com passo 25N.m) com Controle PI e (a) $WOB = 120\text{kN}$. (b) WOB variável com $WOB_0 = 120\text{kN}$ e $Kw = 1.4$	116
Figura 55	Curvas de nível Kp (0 a 800N.m.s , com passo 25N.m.s) e Ki (0 a 250N.m , com passo 25N.m) com Controle PI e (a) $WOB = 140\text{kN}$. (b) WOB variável com $WOB_0 = 140\text{kN}$ e $Kw = 1.7$	117

Figura 56	Curvas de nível K_p (350 a 800N.m.s, com passo 25N.m.s) e K_i (0 a 250N.m, com passo 25N.m) com Controle PI e (a) $WOB = 160\text{kN}$. (b) WOB variável com $WOB_0 = 160\text{kN}$ e $K_w = 2$	118
Figura 57	Curvas de nível para Controle PI com WOB variável com $WOB_0 = 100\text{kN}$ e (a) $K_w = 0.5$; (b) $K_w = 1.2$	119
Figura 58	Curvas de nível para Controle PI com WOB variável com $WOB_0 = 140\text{kN}$ e (a) $K_w = 0.2$; (b) $K_w = 1.7$	120

Lista de símbolos

A	Área da secção transversal da coluna de perfuração
a_1	Coefficiente equivalente de atrito dinâmico
a_2	Coefficiente equivalente de atrito estático
β	Coefficiente de decaimento
E	Módulo de Young da coluna de perfuração
F_b	Peso na broca (<i>WOB, Weight-On-Bit</i>)
G	Módulo de cisalhamento da coluna de perfuração
I_c	Segundo momento de área da secção transversal da coluna de perfuração
J_1	Desvio médio de velocidade angular na broca
J_2	Taxa de penetração média relativa
J_3	Tensão de cisalhamento máximo na coluna
J_4	Desvio máximo de velocidade angular na broca
J_5	Torque máximo na broca
J_6	Potência máxima exigida do motor
J_b	Momento de inércia da broca (<i>BHA, Bottom-Hole-Assembly</i>)
J_m	Momento de inércia da mesa rotativa
K_i	Parâmetro integral de controle
K_p	Parâmetro proporcional de controle

L	Comprimento da coluna de perfuração
M_m	Massa da mesa rotativa
M_b	Massa da broca
N	Número de nós da discretização em MEF
θ_b	Deslocamento angular da broca
θ_m	Deslocamento angular da mesa rotativa
$\ddot{\theta}_b$	Aceleração angular da broca
$\ddot{\theta}_m$	Aceleração angular da mesa rotativa
P	Potência requerida no motor
ρ	Peso específico da coluna de perfuração
R_{ext}	Raio externo da coluna de perfuração
R_{int}	Raio interno da coluna de perfuração
t_0	Tempo inicial
t_f	Tempo final
T_b	Torque na broca
T_m	Torque na mesa rotativa
τ	Tensão de cisalhamento da coluna de perfuração
ω_b	Velocidade angular da broca
ω_m	Velocidade angular da mesa rotativa
ω_{ref}	Velocidade angular de referência

Lista de siglas

BHA - Bottom Hole Assembly

DC - Drill Collar

DOC - Depth-of-cut (Profundidade de corte)

DP - Drill Pipe

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

HWDP - Heavy Weight Drill Pipe

MATLAB[®] - MATrix LABoratory

MEF - Método dos Elementos Finitos

PDC - Polycrystalline Diamond Compact

PI - Proporcional Integrativo

ROP - Rate of Penetration (Taxa de penetração)

TOB - Torque-On-Bit

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

USP - Universidade de São Paulo

WOB - Weight-On-Bit

1 Introdução

Neste capítulo, é apresentada uma breve introdução sobre: a perfuração de poços de petróleo, os equipamentos utilizados na perfuração, as vibrações mecânicas em colunas de perfuração e a necessidade de controle para estas vibrações. Em seguida, a motivação para a realização e os objetivos deste trabalho são expostos.

1.1 Exploração de poços de petróleo

O petróleo é um dos elementos mais importantes para a economia mundial; movimenta, desde a fase exploratória, refino, até a distribuição, inúmeros profissionais, e elevados recursos financeiros. Sobre a fase exploratória, cada nova jazida e reservatório apresentam também novos desafios e dificuldades, impondo ao processo de obtenção do petróleo investimentos em pesquisa e desenvolvimento constantes.

Da fase exploratória, a que pode ser mais cara é a da perfuração de poços. Perfurar um poço envolve extensa programação e elaboração de estudos, que permitam, previamente, um conhecimento tão detalhado quanto possível das condições geológicas da região, para, em seguida, adequar a escolha do conjunto de equipamentos a serem utilizados e o método, em etapas, da perfuração.

A primeira e histórica perfuração em busca e obtenção de petróleo data de 1859, quando foi iniciada a exploração comercial nos Estados Unidos, com um poço de apenas 21 metros de profundidade. Perfurado com um sistema de percussão movido a vapor, produziu dois metros cúbicos por dia de óleo e foi descoberto por Cel. Drake, em Tittusville, Pensilvânia.

A partir do fim do século XIX, em contrapartida ao método de perfuração anteriormente utilizado, o método de percussão, começa a ser desenvolvido o processo rotativo de perfuração. Um marco importante na perfuração rotativa e na história do petróleo é o

ano de 1900, em que, no Texas, o americano Anthony Lucas, utilizando o processo rotativo, encontrou óleo a 354 metros de profundidade.

1.2 Perfuração de poços de petróleo

O processo de perfuração rotativa convencional é o mais economicamente viável em comparação com outros métodos de perfuração. Tipicamente, apresenta furos acima de 850mm de diâmetro. Pode-se perfurar, com este método, acima de 10000m de profundidade, em praticamente quaisquer formações geológicas. (BATAKO, BABITSKY e HALLIWELL, 2003).

Um sistema de perfuração rotativo, com a perfuração pela rotação da ferramenta cortante de rochas, a broca (*drill bit*), cria um caminho para poço (em inglês, *borehole*). A rotação da broca é propiciada por um torque diretor que é gerado na superfície por uma mesa rotativa, disco de elevada inércia que age como unidade de armazenamento de energia, que aciona uma caixa mecânica de transmissão. Através desta transmissão, o motor gira a mesa rotativa. (MIHAJLOVIC et al., 2006).

O corte da rocha, durante a perfuração rotativa, é alcançado pela rotação da broca sobre movimento. Todo o material é removido na forma de pó ou lascas de rocha como um resultado do despedaçamento ou esmagamento das arestas cortantes. Para obter grandes lascas de rocha e uma alta taxa de penetração, mais potência é requerida. Por esta razão, este método de perfuração sofre de torção e quebra dos tubos de perfuração. (BATAKO, BABITSKY e HALLIWELL, 2003).

O poço é revestido (geralmente com aço) e o excesso no diâmetro desta cavidade além do diâmetro do tubo de perfuração é referido como *overgauge*. Esta brecha anular, que varia ao longo do comprimento do poço, é necessária para a condução de fluidos. Durante o processo de perfuração, um fluido pressurizado, denominado *mud*, é continuamente feito em circulação de baixo para o centro da coluna de perfuração, saindo dos orifícios da broca e retornando à superfície por esse espaço anular entre a coluna de perfuração em rotação e a superfície do revestimento do poço. Seu primeiro objetivo é resfriar e lubrificar a broca, assim como remover os pedaços de formação produzidos pela broca. Tal sistema está sujeito a instabilidades dinâmicas que não são de todo compreendidas. Experiências de campo fornecem um amplo testemunho das consequências destrutivas de tais instabilidades. (TUCKER e WANG, 1999a).

O anular entre os tubos do revestimento e as paredes do poço é cimentado, com a finalidade de isolar as rochas atravessadas, permitindo então o avanço da perfuração, com segurança. Após a operação de cimentação, a coluna de perfuração é novamente descida no poço, tendo na sua extremidade uma nova broca de diâmetro menor do que a do revestimento para o prosseguimento da perfuração. O poço é perfurado em diversas fases, caracterizadas pelos diferentes diâmetros das brocas. (THOMAS, 2001).

A perfuração rotativa é realizada através de uma sonda rotativa, mostrada na figura 1. Os equipamentos da sonda são divididos em: sistemas de sustentação de cargas, geração e transmissão de energia, movimentação de carga, rotação, circulação, segurança do poço, monitoração e sistema de subsuperfície, que abrange a coluna de perfuração.

Figura 1 – Esquema simplificado de uma sonda rotativa. (OLIVEIRA, 2011).

O sistema rotativo é constituído de um motor elétrico, um redutor e uma mesa rotativa conectada ao topo da coluna de perfuração. A parte mais baixa da coluna de perfuração é submetida à compressão e, para evitar flambagem (*buckling*), ela é reforçada pelos tubos de parede espessa (*drill collars*), aumentando-se a resistência à flexão. (JANSEN e VAN DEN STEEN, 1995).

Geralmente, a coluna de perfuração apresenta diâmetro da ordem de 0 e 5 km, com um *drillcollar* na seção a cada 100m. Diâmetros de poço (*borehole*) estão na faixa de 100 a 850mm de diâmetro; *drillpipes* padrão têm um diâmetro externo de 127mm e uma espessura de parede de 9mm, enquanto *drillcollars* têm um diâmetro externo acima de 250mm e uma espessura de parede de 85mm. (JANSEN e VAN DEN STEEN, 1995).

O sistema de rotação convencional é constituído de mesa rotativa, o *kelly* e cabeça de injeção ou *swivel*, equipamento que separa os elementos rotativos daqueles estacionários na sonda de perfuração, e é responsável por injetar o fluido de perfuração no interior da coluna. A mesa rotativa é o equipamento que transmite rotação à coluna de perfuração através do *kelly*, que pode ter a seção quadrada (para perfurações em terra) ou hexagonal (para sondas marítimas). Na figura 2 apresenta-se um modelo de uma mesa rotativa, *kelly* e *swivel*. (THOMAS, 2001).

Figura 2 - Equipamentos de uma sonda de perfuração rotativa. (a) Mesa rotativa. (b) Kelly. (c) Swivel, ou cabeça de injeção. (THOMAS, 2001).

A perfuração de poços petrolíferos é executada através de uma combinação de três fatores principais, segundo EcologyBrasil (2006):

1. Trituração mecânica obtida pela ação dos dentes da broca de perfuração sobre a rocha perfurada, através da aplicação de determinado valor de peso e rotação sobre a broca;
2. Ação hidráulica sobre a rocha perfurada, obtida através do impacto de jatos de lama de perfuração (*mud*) bombeados por orifícios na broca;
3. Limpeza do poço, incluindo a remoção dos fragmentos de rocha de sob a broca e carreamento dos mesmos para fora do poço.

A operação de perfuração e o controle destes parâmetros aplicados sobre a broca requerem um elemento de ligação com a superfície, proporcionado pela coluna de perfuração.

Para tanto, esta última é submetida a esforços de tração, compressão, torção, além da pressão exercida contra a parede da coluna durante o bombeio do fluido de perfuração. (ECOLOGYBRASIL, 2006).

A coluna de perfuração é um dos principais componentes de um conjunto de perfuração, explicados a seguir.

1.3 Equipamentos de um conjunto de perfuração

Um conjunto de perfuração consiste essencialmente de uma série de tubos cilíndricos de aço conectados para formar uma longa e flexível coluna de perfuração, a qual é atada a um pequeno segmento pesado (*bottom hole assembly*) contendo a ferramenta de corte, a broca (*drill bit*), em uma extremidade livre. A coluna pode conter colares estabilizadores projetados para minimizar o movimento lateral durante a perfuração. (TUCKER e WANG, 1999a).

Compõe-se dos seguintes equipamentos, a saber:

- Coluna de perfuração;
- BHA (*Bottom Hole Assembly*);
- Comandos;
- Tubos pesados;
- Tubos de perfuração;
- Brocas (*drill bits*).

1.3.1 Coluna de perfuração

Uma coluna de perfuração é composta de tubos de aço ligados por juntas cônicas. A parte mais alta e longa da seção da coluna é referenciada como *drill pipe*. (MELAKHESSOU, BERLIOZ e FERRARIS, 2003).

A coluna de perfuração é movimentada pelo sistema de rotação, e tem a função, segundo Jansen e van den Steen (1995), de transmitir torque do sistema-guia para a broca.

Um comprimento típico de uma coluna de perfuração está entre 0 e 5km com um *drill collar* na seção para cada 100m. Diâmetros de poço (*borehole*) típicos estão na faixa de 100 a 850mm de diâmetro; *drill pipes* padrão têm um diâmetro externo de 127mm e uma espessura de parede de 9mm, enquanto *drill collars* têm um diâmetro externo acima

de 250mm e uma espessura de parede de 85mm. (JANSEN e VAN DEN STEEN, 1995).

A coluna de perfuração possui, então, estes seguintes componentes, apresentados anteriormente: comandos (*drill collars*); tubos pesados (*heavy weight drill pipes*); tubos de perfuração (*drill pipes*); broca (*drill bit*); BHA (*Bottom Hole Assembly*).

1.3.2 BHA (*Bottom-Hole Assembly*)

A parte mais baixa da coluna de perfuração é chamada de *Bottom Hole Assembly* (BHA); é composta de pesados tubos de parede espessa chamados de *drill collars*. Esta seção é submetida à compressão e seu peso serve para aplicar o peso na broca (WOB, *Weight On Bit*). (MELAKHESSOU, BERLIOZ e FERRARIS, 2003).

O comprimento desta seção é usualmente de 200 a 300m, e é tal que a parte inferior da coluna de perfuração tem uma carga axial aproximadamente zero. Em linguagem generalista, esta área é chamada de ponto neutro sob o qual *drill collars* são sujeitos à compressão devido ao peso na broca e à torção devida à rotação e o efeito cortante, propiciando uma velocidade de rotação usualmente entre 60 e 200rpm. (MELAKHESSOU, BERLIOZ e FERRARIS, 2003).

O BHA inclui ainda outros acessórios como: estabilizadores, conectores de redução e outros. (ECOLOGYBRASIL, 2006).

1.3.3 Comandos

Os comandos (*drill collars*) são elementos tubulares fabricados em aço forjado, usinados e que possuem alto peso linear devido à grande espessura de parede. Um exemplo é mostrado na figura 3.

As principais funções dos comandos são fornecer peso sobre a broca e prover rigidez à coluna, permitindo melhor controle da trajetória do poço; como classificação, podem ser lisos ou espiralados.

Figura 3 - Comando (*drill collar*) de uma coluna de perfuração. (THOMAS, 2001).

1.3.4 Tubos pesados

Acima dos comandos de perfuração, como elementos de transição, entre os comandos e os *drill pipes* (seção 1.3.5), são conectados os elementos *HWDPs* – *Heavy Weight Drill Pipes*, os tubos de parede espessa, que possuem espessura intermediária entre a dos comandos e a dos *drill pipes*. Um exemplo é apresentado na figura 4.

Suas características principais são, segundo Thomas (2001):

- maior espessura das paredes;
- uniões mais resistentes e revestidas de metal duro (*Hard Facing*);
- reforço central no corpo do tubo revestido de metal duro.

Figura 4 - Tubos de paredes espessas de uma coluna de perfuração. (THOMAS, 2001).

1.3.5 Tubos de perfuração

Os tubos de perfuração (*drill pipes*) são tubos de aço sem costura, tratados internamente com aplicação de resinas para diminuição do desgaste interno e corrosão, possuindo nas suas extremidades as conexões cônicas conhecidas como *tool joints*, que são soldadas no seu corpo.

Na sua especificação são consideradas as seguintes características: diâmetro nominal (diâmetro externo que varia de 2.3/8" a 6.5/8"); peso nominal; tipo de esforço para soldagem das uniões; tipo ou grau do aço; comprimento nominal (*range*) e tipos de rosca.

Figura 5 - Tubos de perfuração (*drill pipes*) de uma coluna de perfuração. (THOMAS, 2001).

1.3.6 Brocas (*drill bits*)

As brocas são equipamentos que têm a função de promover a ruptura e desagregação das rochas ou formações. O estudo das brocas, considerando seu desempenho e economicidade, é um dos fatores importantes na perfuração de poços de petróleo. (THOMAS, 2001).

Figura 6 – Brocas utilizadas em perfuração de poços. (a) sem partes móveis. (b) com partes móveis. (PLÁCIDO e PINHO, 2009).

Para realizar a perfuração, as brocas são utilizadas para esmagar, espedaçar, quebrar a rocha, e devem resistir, estruturalmente, a este ataque. As formas de ataque podem ser por: acunhamento, cisalhamento, esmerilhamento, esmagamento, e por erosão por ação de jatos de fluido.

A forma do ataque dependerá do tipo e das características da rocha que se deseja cortar, principalmente em função de sua dureza e abrasividade. (PLÁCIDO e PINHO, 2009).

É o grau de dureza e abrasividade que determinará o tipo de broca e o princípio de ataque. (PLÁCIDO e PINHO, 2009).

Os tipos de broca mais utilizados para perfuração de poços de petróleo são classificadas, de forma geral, das seguintes maneiras: brocas com partes móveis e brocas sem partes móveis, com exemplos na figura 6.

1.4 Vibrações mecânicas em colunas de perfuração

Observações de campo baseadas em medições no furo e na superfície têm indicado que as colunas de perfuração exibem severas vibrações. Estas vibrações são observadas se tornar mais severas no BHA (*bottom hole assembly*), que sofre as interações entre a broca e a formação.

E, em segundo lugar, devido ao contato da coluna (*drill pipes, drill collars* e estabilizadores) com a parede do poço. Tubos inclinados ou desalinhados da coluna representam causas adicionais para as mesmas vibrações. (KHULIEF e AL-NASER, 2005).

Evidências experimentais manifestam que a vibração em colunas de perfuração é uma das maiores causas de deterioração no processo de perfuração; se não controlada, pode resultar em: perda de eficiência do processo de perfuração, falha prematura dos componentes da coluna e fadiga das tubulações, redução da vida útil da broca, mudanças inesperadas na direção da perfuração, e até mesmo quebrar a coluna, inutilizando aquele poço. (KHULIEF e AL-NASER, 2005).

A coluna está submetida a vários tipos de vibrações durante a perfuração: vibrações torcionais (rotacionais), causadas pela interação entre a broca e a profundidade do poço; fletoras (laterais), causadas por excentricidade dos tubos, e axiais (longitudinais), devidas ao quicar da broca, e vibrações hidráulicas no sistema de circulação, originárias das vibrações da bomba.

À medida que as vibrações tornam-se mais severas, poderão surgir ressonâncias, e conduzir ainda mais rapidamente à falha prematura dos componentes da coluna e equipamentos. (ALAMO, 2004).

A coluna de perfuração e as vibrações axiais, torcionais e laterais a que a coluna possa estar sujeita são apresentadas em um desenho na figura 7.

Figura 7 - Esquema representativo de uma coluna de perfuração sujeita a vibrações axiais, torcionais e laterais. (ALAMO, 2004).

1.4.1 Vibrações axiais (*bit-bounce*)

A maior causa da vibração axial é a força gerada na interação broca/formação. Essa excitação depende do tipo de broca e formação que se pretende perfurar. As brocas tri-cônicas produzem excitações axiais mais fortes em comparação com as brocas sem partes móveis: PDC (*polycrystalline diamond compact*) e Diamante. No caso das brocas tri-cônicas, a vibração gerada pelo rolamento dos cones da broca resulta em um movimento suave do BHA para cima e para baixo com uma frequência dominante igual a três vezes a frequência de rotação da coluna. (ALAMO, 2004).

As vibrações axiais podem dificultar a perfuração, causar dano à broca e ao BHA e diminuir a ROP. Quando esta frequência de excitação é igual a uma frequência axial natural da coluna, o sistema entrará em ressonância e a broca pode perder contato com a formação.

A repetição durante um determinado período da perda momentânea de contato entre a broca e a formação é conhecida como o quicar da broca (*bit-bounce*). Persistindo, diminuir-se-á o tempo de vida útil da broca, sendo necessário, nesse caso, substituí-la, o que encarece e atrasa o processo de perfuração.

1.4.2 Vibrações fletoras ou laterais (*whirling*)

As extremidades da coluna de perfuração, que são a mesa rotativa e a broca em contato com a formação rochosa, propiciam analogia de comportamento desta coluna de perfuração com uma viga biapoiada, sujeitando-a à flambagem, que, para ser evitada, são utilizados os *drill-collars*, aumentando-se a rigidez da coluna em relação à flexão.

O comprimento longo da coluna apresenta mais uma dificuldade, pois imprime-lhe uma grande facilidade em se deslocar lateralmente, devido à rotação da mesa rotativa.

Estes fatores podem gerar falha na operação de perfuração, produzindo como resultado um colapso das paredes do poço e uma eventual obstrução da coluna de perfuração é tempo consumido e pode ser extremamente custoso, especialmente quando ocorrido em um estágio posterior ao processo de perfuração. (KHULIEF e AL-NASER, 2005).

O problema de vibrações em colunas de perfuração é razoavelmente complexo, desde que, geralmente, envolve fenômenos tais como: ressonância paramétrica; rodópio turbulento; contato com o revestimento do poço. As vibrações laterais excessivas causadas por tais fenômenos foram observadas causando falha por fadiga, desgaste e alargamento das paredes do poço. (YIGIT e CHRISTOFOROU, 1996).

As vibrações laterais podem ser: no sentido do movimento de giro da mesa rotativa (*forward whirling*); contrário ao movimento da mesa (*backward whirling*); ou caótico, cujo comportamento prolongado pode quebrar a coluna de perfuração.

1.4.3 Vibrações torcionais (*stick-slip*)

As vibrações torcionais, por sua vez, podem causar variação da rotação ao longo da coluna, danificar as brocas e prejudicar o processo de perfuração. O torque resistivo originado pelo atrito na broca e ao longo da coluna causa a diminuição da rotação da broca. Em alguns casos, a broca pode parar completamente, gerando um grande aumento do torque na mesa rotativa. Quando esse torque acumulado atinge um valor suficiente para vencer o torque resistivo, o BHA é rapidamente acelerado. Esse processo, se repetido, é conhecido como vibração torcional auto-excitada do tipo prende-solta ou *stick-slip*. (ALAMO, 2004).

Este fenômeno é uma importante causa de mau funcionamento ou falha de tubos de perfuração, brocas e equipamentos eletrônicos que ficam no interior do poço. A frequência das vibrações é usualmente abaixo do primeiro modo de vibração natural

torcional da coluna de perfuração, algo em torno de 0,05 a 0,5 Hz. (JANSEN e VAN DEN STEEN, 1995).

Durante essa vibração, a velocidade angular da mesa rotativa é aproximadamente constante, embora, a velocidade da broca varie entre zero (fase *stick*) e uma velocidade que pode ser várias vezes maior, em módulo, do que a velocidade média do topo da coluna (fase *slip*). Devido à vibração torcional *stick-slip*, faz-se necessário controladores para suprimi-la. (VAN DE VRANDE, VAN CAMPEN e KRAKER, 1999).

Nas figuras 8 e 9, apontam-se exemplos de *stick-slip* ocorrendo para a broca, sendo, na figura 8, mostrado um caso de detecção de *stick-slip* em tempo real em um processo de perfuração, a título ilustrativo.

Figura 8 - Fenômeno *stick-slip* presente em processo de perfuração, registrado a 1976m de profundidade. (PLÁCIDO, SANTOS e GALEANO, 2002).

A figura 9, obtida pelas simulações deste trabalho, vem auxiliar na pré-visualização do fenômeno, que se caracteriza graficamente por manter-se a velocidade igual ou em torno de zero, com retomadas para atingir velocidades muito altas.

Figura 9 - Exemplo de situação em que se detecta o fenômeno de *stick-slip*, para velocidade angular de referência igual a 100rpm.

Medições simultâneas da coluna na superfície e na broca permitiram revelar que o comportamento da coluna é semelhante a um pêndulo torcional de rotação, em que a mesa rotativa desenvolve uma velocidade constante no topo enquanto a broca apresenta-se com velocidade variável, resultado da soma de uma parte constante e outra superposta, sendo a parte variável proveniente de vibração torcional, segundo o topo da coluna. (JANSEN e VAN DEN STEEN, 1995).

Devido à interação da broca com a formação rochosa e à própria flexibilidade da coluna as vibrações torcionais são ocasionadas por ciclos de parada e retomada de velocidade da broca, podendo-se, por vezes, em casos de *stick-slip*, imprimir-se à coluna de perfuração velocidades muito altas em relação à referência e acelerar o processo de fadiga da coluna.

Sendo consequência do fenômeno de *stick-slip*, da parada e retomada da velocidade da broca, devido às diferenças de velocidade na mesa (superfície) e na broca, são geradas ondas torcionais, conceito que foi desenvolvido por Tucker e Wang (1999b). Estas ondas podem gerar estados vibracionais complexos e de acentuado grau de imprevisibilidade. Modeladas por uma equação de onda, percorrem em torno de 1s o comprimento de 3000m de um poço de perfuração, segundo os mesmos autores.

Vibrações do tipo *stick-slip* são auto-excitáveis, e geralmente desaparecem assim que a velocidade da mesa rotativa é aumentada além de um valor limite. Entretanto, aumentar a velocidade de rotação pode causar problemas de vibrações laterais, provocar impactos com a parede do poço e instabilidades paramétricas. (CHRISTOFOROU e YIGIT, 2003).

Uma característica de sistemas auto-excitáveis é que o movimento por si só controla a força alternativa que alimenta o movimento, sendo que esta força é cancelada quando cessa o movimento. (MELAKHESSOU, BERLIOZ e FERRARIS, 2003).

É desejável, portanto, estender a faixa de velocidades de perfuração seguras. Neste sentido, uma própria compreensão da dinâmica acoplada das colunas de perfuração é necessária. As vibrações e os meios para controlá-las receberam e continuam recebendo atenção por parte dos autores. (CHRISTOFOROU e YIGIT, 2003).

1.5 Interação entre a broca e formação rochosa

As características das diferentes formações rochosas, esperadas para cada setor (profundidade) de perfuração, que são também um modelo (imperfeito) surgem como uma das grandes dificuldades e causas principais do *stick-slip*: a interação da broca com formação rochosa, e suas flutuações quanto à dureza e mudanças de características de estrutura geológica.

A interação entre a broca e a formação rochosa é provocada, basicamente, pelo atrito entre a broca e a formação; modelar este fenômeno surge como um dos desafios a serem superados no sentido de possibilitar e melhor conduzir o processo de perfuração. A natureza física deste fenômeno ainda não foi de todo compreendida, pelo menos em nível microscópico, citando Coletti (2011); mas, macroscopicamente sim, a modelagem físico-matemática do atrito mereceu, ao longo do tempo, dedicada atenção dos autores.

O fenômeno do atrito é estabelecido quando se tem duas partes em contato que apresentam movimento relativo entre elas.

É uma complicada propriedade da qual dependem muitas fatores, incluindo o contato dinâmico, a topologia de superfície, a química da superfície, e a lubrificação. Devido à alta não-linearidade, o atrito usualmente deteriora desempenho dinâmico e a precisão do posicionamento, e pode também levar a erros em regime permanente e erros de trajetória em relação a mudanças de direção. (CHI-CHENG e CHENG-YI, 1998).

O atrito seco pode causar diversos efeitos inconvenientes, como induzir vibrações auto-sustentáveis do tipo *stick-slip*, que produzem ruídos e podem encurtar a vida útil das partes mecânicas. (VAN DE VRANDE, VAN CAMPEN e KRAKER, 1999).

Pela natureza da interação da broca com a formação, as forças que agem sobre a broca são não lineares, conseqüentemente, as equações matemáticas apresentar-se-ão com equações diferenciais parciais não lineares. (ALAMO, 2004).

Com a evolução dinâmica de um sistema mecânico no qual forças de atrito são uma unidade ativa, em geral, confronta-se com um tipo particular de problema não linear. As interações intermoleculares que permitem elevar o atrito de deslizamento aparecem em um nível macroscópico, a agir intermitentemente. Essas forças resultantes geram uma evolução no tempo não suave e exercem um importante papel na geração de vibrações induzidas por atrito e é essencial na análise de estabilidade de muitos sistemas mecânicos. (CULL e TUCKER, 1999).

Por esta razão, o atrito é frequentemente considerado como um fenômeno inconveniente no critério da teoria de controle. Não obstante, é ainda possível aproximar o efeito de atrito observado para uma ampla gama de sistemas mecânicos, utilizando-se de modelos dinâmicos. (CHI-CHENG e CHENG-YI, 1998).

Várias contínuas aproximações para o comportamento do atrito de Coulomb, como uma função do movimento relativo, têm sido propostas. Em uma delas, o limiar entre o comportamento de atrito estático e de atrito dinâmico é substituído por um gráfico suave sobre a linha real, com um mínimo dos dois pontos como uma função de movimento relativo entre as superfícies de contato. (CULL e TUCKER, 1999).

Nas mais simples situações a força de retardamento do atrito seco cinético é sensivelmente constante, tão longo possa ser o movimento relativo entre as superfícies em interação. A sutileza, de um ponto de vista matemático, é que, na vizinhança de zero, quanto ao movimento relativo, a magnitude do atrito de Coulomb depende do meio dinâmico. (CULL e TUCKER, 1999).

Devido ao fato de o atrito usualmente conter características variantes no tempo e sensíveis a mudança de ambiente, é praticamente improvável que um completo modelo de atrito possa ser construído para propósitos de controle. (CHI-CHENG e CHENG-YI, 1998).

Neste trabalho, consideram-se duas modelagens matemáticas para o fenômeno do atrito, baseadas ambas no atrito de Coulomb, que, como descrito anteriormente, apresenta uma descontinuidade em torno do zero, quando se trata a força de atrito em função da velocidade de contato entre as partes; no caso, a velocidade da broca em relação à formação rochosa.

A proposta de atrito regularizado em zero elimina matematicamente a descontinuidade, tornando nula a força de atrito quando a velocidade de deslocamento entre as partes torna-se zero. E, para velocidades em torno do zero, têm-se, igualmente, baixos valores para o módulo da força.

Para a proposta de atrito não regularizado, no entanto, a descontinuidade é trabalhada matematicamente para a velocidade entre as partes, considerando-se um pequeno intervalo em torno do zero no qual a função de atrito fica bem definida.

1.6 Motivações e objetivos

Motivado pela necessidade de se encontrar soluções adequadas a tratar, corrigir ou eliminar vibrações torcionais indesejáveis, embora presentes, no processo de perfuração de poços de petróleo, pretende-se investigar o comportamento dinâmico da coluna de perfuração, em termos de vibrações torcionais.

Para tanto, dois trabalhos anteriores merecem destaque. São também relacionados ao controle de vibrações torcionais em colunas de perfuração de poços de petróleo, e vinculados ao mesmo orientador. São dos autores: Manzatto (2011) e Coletti (2011). Ambos apresentaram a análise de vibrações torcionais, com um modelo em dois graus de liberdade (duas inércias conectadas por uma mola torcional).

Manzatto (2011) utiliza da formulação de atrito não regularizado e analisa o modelo com um controlador proporcional integrativo (PI), e propõe critérios de análise de desempenho do processo de perfuração, que são os mesmos utilizados neste trabalho.

Coletti (2011) estuda o mesmo modelo trabalhando com três técnicas de controle, um controlador PI simples e, adicionalmente, duas implementações: a variação do peso na broca e o *soft torque*, proposto por Tucker e Wang (2003).

Neste presente trabalho, as leis de controle, aplicadas ao torque na broca, consistem de um controlador proporcional integrativo: com peso na broca constante, considerado para diferentes valores de pesos na broca e de velocidades angulares de referência; e com peso na broca variável, segundo implementação de Coletti (2011).

São utilizadas, ainda, as seguintes modelagens propostas: para a coluna de perfuração, de um modelo em elementos finitos, com função de forma linear; para o torque na broca, de um modelo de atrito não regularizado, proposta feita por Navarro-López e Suárez (2004), utilizada também por Manzatto (2011) e Coletti (2011), e ajustada pelos dados empíricos fornecidos por Tucker e Wang (2003).

Com estas definições, pretende-se, neste trabalho, analisar o desempenho destas leis de controle, na correção e/ou eliminação de vibrações torcionais e do fenômeno *stick-slip*, presentes no processo de perfuração de poços de petróleo.

2 Modelagem do sistema

Neste capítulo aborda-se a modelagem do sistema como um todo. Inicialmente apresenta-se um desenho esquemático de um conjunto de perfuração, que é o sistema a ser modelado.

A seguir, são apresentadas: a modelagem em elementos finitos da coluna de perfuração; a modelagem do torque na mesa e o Controlador Proporcional Integrativo para peso na broca constante; a modelagem do torque na broca na forma não regularizada e o ajuste dos parâmetros do modelo usando dados empíricos; a modelagem completa do conjunto de perfuração e sua validação através da comparação dos resultados obtidos com resultados numéricos da literatura.

Com base no modelo validado, uma análise preliminar do efeito do peso na broca e dos parâmetros de controle proporcional, K_p , e integral, K_i , é realizada. A proposta, então, da lei de controle PI com variação do peso na broca é aplicada ao modelo validado.

2.1 Esquema de um conjunto de perfuração

Pretende-se obter um modelo físico-matemático para o conjunto de perfuração apresentado na figura 10, considerando-se os elementos: mesa rotativa (*Rotary Table*), coluna de perfuração (*Drill String*) e broca (*Bit*). Sendo que a broca, neste caso, representa o conjunto denominado *BHA* (*Bottom Hole Assembly*).

Para definir completamente o modelo de conjunto, é preciso modelar os seguintes itens:

- O torque que a mesa rotativa aplica à coluna de perfuração;
- O torque que a formação rochosa aplica sobre a broca, e, para isso necessário é considerar um modelo para as forças de atrito consideradas;
- A coluna de perfuração.

A modelagem do conjunto de perfuração é apresentada na seção 2.6, bem como as hipóteses simplificadoras utilizadas, sendo que a coluna de perfuração, o torque na mesa e o torque na broca são modelados nos itens 2.3, 2.4, e 2.5, respectivamente.

Figura 10 - Estrutura típica de um sistema de perfuração rotativo. (BATAKO, BABITSKY e HALLIWELL, 2003).

2.2 Modelagem em Elementos Finitos

Neste item, apresenta-se uma breve descrição sobre a modelagem por elementos finitos (MEF) para sistemas dinâmicos. Um sistema dinâmico pode ser descrito, de forma geral, por uma equação matricial, de dimensão determinada pelo número de nós n adotados:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

$[M]$ = Matriz de inércia $n \times n$, $[C]$ = Matriz de amortecimento $n \times n$, $[K]$ = Matriz de rigidez $n \times n$, $\{F\}$ = Vetor de forças resistivas $n \times 1$, $\{\ddot{u}\}$ = Vetor aceleração $n \times 1$, $\{\dot{u}\}$ = Vetor velocidade $n \times 1$, $\{u\}$ = vetor posição $n \times 1$.

O MEF consiste em se utilizar aproximações por partes, ou regiões, em vez de efetuar aproximações de caráter global. Com a subdivisão em regiões será possível adotar

funções simples que representam o comportamento aproximado local. (CZERWINSKI, 1994).

Para aplicação deste método, é necessário seguir alguns passos, de acordo com Czerwinski (1994):

1. Obtenção de um domínio contínuo;
2. Discretização deste domínio em pequenas regiões, os elementos finitos, a serem definidas por sua forma geométrica, pelas funções de aproximação que utiliza, caracterizando a malha dos elementos finitos,
3. Definição das funções de aproximação, as funções de forma, que são funções contínuas de interpolação e aproximam o fenômeno físico em cada elemento.
4. Obter as matrizes características para cada elemento.
5. Montar o sistema matricial global com as equações elementares.
6. Introduzir as equações de contorno.
7. Resolver o sistema de equações.

A física envolvida na perfuração é inerentemente não linear, e, portanto, necessária é a criação de modelos para compensar a falta de informações que detalhem o comportamento dinâmico na vizinhança da broca. Muitas conclusões têm sido baseadas em simulações numéricas que ignoram um ou mais aspectos do problema. (TUCKER e WANG, 1999a).

Para a implementação e simulação numérica deste problema de vibrações torcionais, um modelo em elementos finitos é proposto para a coluna de perfuração no item 2.3.

2.3 Modelagem da coluna de perfuração

Seja $w = w(x, y, t)$ uma função que representa uma estrutura de forma geral, somatório de funções de forma multiplicadas pelo deslocamento de cada nó (ponto de análise em MEF) específico, apresentados na equação 2:

$$w(x, y, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y)w_i(t) \quad (2)$$

Onde $N_i(x, y)$ é a chamada função de forma, que caracteriza como é feita a divisão da estrutura, caracteriza o processo de cálculo pelo Método de Elementos Finitos. A função de forma mais simples é a linear, podendo ser quadrática ou de um polinômio de grau superior.

Pode assumir também funções trigonométricas, dentre outras mais ou menos elaboradas, de acordo com a estrutura, a forma como será analisada e o tamanho da malha.

Escolher a função de forma adequada à obtenção dos resultados pretendidos é importante também ao analisar a capacidade computacional de cálculo e o tempo despendido em cada passo do roteiro matemático.

Para a análise deste trabalho, considerou-se adequada e adotou-se a função de forma linear.

Algumas hipóteses para a coluna de perfuração foram consideradas. A coluna possui uniformidade em relação ao material de constituição e diâmetro constante ao longo do seu comprimento, desprezando-se, portanto, as variações de diâmetro com os *drill-collars* e as seções de rosca. É rígida axialmente, não sendo sujeitas, conseqüentemente, às vibrações axiais (*bit-bounce*). Todas as propriedades da coluna e material de constituição, como: peso específico, isotropia, módulo de Young, resistência à torção, são consideradas constantes e uniformes.

Como já foi dito anteriormente, adotou-se a função de forma linear, sendo, então, o elemento um segmento da coluna, que, no caso para n elementos, têm-se $n+1$ nós (*joints*, na figura 11).

Figura 11 – Elemento em torção (RAO, 2003).

Este elemento linear adotado é representado pela figura 11, que apresenta $\theta(x, t)$, como deslocamento angular, na posição x e no tempo t , $f(x, t)$ como o conjunto de forças externas atuantes, na posição x e no tempo t e $f_1(t)$ e $f_2(t)$ as respectivas forças nas extremidades do elemento; ρ , I_p , G , A , ℓ , representam, respectivamente, o peso específico do material constituinte da coluna, o momento de inércia de massa por unidade de comprimento, o módulo de elasticidade transversal, a área da seção transversal (circular) e o comprimento deste elemento finito.

A equação da função linear é descrita pela equação 3:

$$\theta(x, t) = a(t) + b(t)x \quad (3)$$

em que $\theta(x, t)$ representa o deslocamento angular do elemento ao longo de x , $a(t)$ e $b(t)$, são funções no tempo e coeficientes de $\theta(x, t)$, que, utilizando-se das condições de contorno, descritas pelas equações 4 e 5, obtém-se a equação 6.

$$\theta(0, t) = \theta_1(t); \quad (4)$$

$$\theta(L, t) = \theta_2(t); \quad (5)$$

$$\theta(x, t) = \left(1 - \frac{x}{L}\right) \theta_1(t) + \left(\frac{x}{L}\right) \theta_2(t) \quad (6)$$

A energia cinética $T(t)$ apresenta-se da forma apresentada na equação 7.

$$T(t) = \int_0^L \rho I_p \left\{ \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} \right\}^2 dx \quad (7)$$

Que pode ser descrita matricialmente também, pela equação 8:

$$T(t) = \frac{1}{2} \dot{\theta}(t)^T [m] \dot{\theta}(t) \quad (8)$$

Substituindo (6) em (8), obtém-se a matriz elementar, expressa na equação 9:

$$[m] = \frac{\rho I_p L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

A energia potencial da barra pode ser descrita pela função $V(t)$, e, assim, pode ser expressa:

$$V(t) = \frac{1}{2} \int_0^L GJ \left\{ \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \right\}^2 dx \quad (10)$$

Da mesma forma que para a energia cinética, obtém-se, para a matriz de rigidez $[k]$:

$$[k] = \frac{GJ}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

As forças resistivas podem ser assim representadas, atuantes nas extremidades dos elementos, representados pelo vetor de forças $\vec{f}$:

$$\vec{f} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

E, pelo Princípio dos Trabalhos Virtuais, tem-se que:

$$\delta W(t) = \int_0^L f(x, t) \delta \theta(x, t) dx \quad (13)$$

A partir da equação 13, obtêm-se as forças equivalentes respectivas para os nós 1 e 2:

$$f_1(t) = \int_0^L f(x, t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) dx \quad (14)$$

$$f_2(t) = \int_0^L f(x, t) \left(\frac{x}{L}\right) dx \quad (15)$$

O amortecimento, neste modelo, foi considerado proporcional, da forma $C = aM + bK$, em que C , M , K são as matrizes de amortecimento, massa e rigidez, respectivamente, enquanto a e b são os coeficientes multiplicadores. Adotaram-se os valores para a e b iguais a 1% e zero, respectivamente.

Obtidas as matrizes elementares, estrutura-se a equação matricial global, descrita pela equação 16:

$$M_{n \times n} \ddot{X}_{n \times 1} + C_{n \times n} \dot{X}_{n \times 1} + K_{n \times n} X_{n \times 1} = F_{n \times 1} \quad (16)$$

Em que: M é a matriz global de inércia; C é matriz global de amortecimento; K é a matriz global de rigidez; X o vetor coluna, de deslocamentos e velocidades angulares; F , o vetor de forças externas atuantes, que, no caso, é função dos torques na mesa e na broca, sendo representado pela equação:

$$F = b_m \cdot T_m + b_b \cdot T_b \quad (17)$$

Em que $b_m = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{n \times 1}$, $b_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{n \times 1}$, T_m e T_b representam o torque na mesa e o torque na broca, respectivamente.

Para se resolver por métodos numéricos a equação 16, utilizou-se de redução de uma equação de segunda ordem para duas equações diferenciais ordinárias de primeira ordem, representadas pelas equações 18 e 19, já substituindo a equação 17:

$$\dot{X} = Y \quad (18)$$

$$\dot{Y} = -M^{-1}KX - M^{-1}CY + M^{-1}b_m T_m + M^{-1}b_b T_b \quad (19)$$

Em termos matriciais,

$$\begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{Bmatrix}_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} 0_n & I_n \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix}_{2n \times 1} + \begin{bmatrix} 0_n & 0_n \\ 0_n & M^{-1}I_n \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \begin{Bmatrix} 0_n \\ F \end{Bmatrix}_{2n \times 1} \quad (20)$$

em que 0_n e I_n são as matrizes nula e identidade, $n \times n$, respectivamente.

A equação 20, global, pode ser sintetizada pela equação 21, e desta forma implementada para resolução em MATLAB®:

$$\dot{Z}_{2n \times 1} = A_{2n \times 2n} \cdot Z_{2n \times 1} + B_{2n \times 2n} \cdot u_{2n \times 1} \quad (21)$$

Reescrevendo-se esta equação (21) em equações de espaço de estados (22 e 23), obtêm-se:

$$\dot{Z} = AZ + Bu \quad (22)$$

$$y = QZ \quad (23)$$

Em que:

$$Z = \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix}_{2n \times 1}, \quad A = \begin{bmatrix} 0_n & I_n \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n}, \quad B = \begin{bmatrix} 0_{nx1} & 0_{nx1} \\ M^{-1}b_m & M^{-1}b_b \end{bmatrix}_{2n \times 2},$$

$$u = \begin{Bmatrix} T_m \\ T_b \end{Bmatrix}_{2 \times 1} \text{ e } y \text{ é um vetor de saída contendo os deslocamentos e velocidades}$$

angulares na mesa e na broca.

Para esta representação por espaço de estados, Z representa o estado, u as entradas e y as saídas.

2.4 Modelagem do torque na mesa

A velocidade da mesa foi considerada como sendo a variável a ser controlada para este modelo de sistema de perfuração. Foi utilizado um controlador proporcional integrativo, o qual imprime um fator de ganho proporcional K_p à diferença entre a velocidade da mesa e a velocidade de referência para o conjunto, e um ganho integrativo, K_i , que multiplica a diferença entre o deslocamento real (integral da velocidade) e o deslocamento esperado. Trata-se de um controle não colocalizado, então, pois apenas responde a variações na mesa, não atuando diretamente na broca, e sim, indiretamente.

Este controlador é descrito pela equação 25.

$$T_m = K_p(\omega_{ref} - \omega_m) + K_i(\omega_{ref}t - \theta_m) \quad (24)$$

Sendo K_p e K_i os parâmetros proporcional e integral de controle, respectivamente, e ω_{ref} a velocidade de referência adotada, enquanto ω_m é a velocidade da mesa, θ_m o deslocamento angular da mesa (topo da coluna), e T_m o torque na mesa, que movimenta a coluna de perfuração.

Figura 12 - Modelo esquemático de um controlador PI com peso na broca constante, adotado para o sistema de perfuração.

Na figura 12, encontra-se apresentado um modelo esquemático, para exemplificação deste sistema de controle, das variáveis de entrada e saída e do modo de atuação do controlador. T_b , o torque na broca, proveniente da interação da broca com a formação rochosa, e ω_{ref} , velocidade angular de referência, representam as entradas do sistema, enquanto que ω_m , variável de controle, representa a saída. T_m é a saída do controlador, torque que deve ser aplicado pela mesa rotativa. No retângulo em tracejado, apresenta-se este sistema controlado.

A função de torque T_b depende do peso atribuído na broca (*WOB*). Este controlador proporcional integrativo para *WOB* constante constitui a primeira lei de controle considerada: Controlador Proporcional Integrativo com peso na broca constante.

2.5 Modelagem do torque na broca

2.5.1 Proposta de torque na broca não regularizado

Nesta seção apresenta-se a proposta de Navarro-López e Suárez (2004) para a modelagem, segundo atrito de Coulomb, do torque esperado na broca, mostrada na figura 13. Esta proposta apresenta três situações para atribuir valores ao torque em relação à velocidade na broca, a que a coluna de perfuração é submetida no processo de perfuração:

- Para velocidades angulares na broca com valor absoluto não nulo, ou maior do que uma tolerância de valor δ (considerado, para este trabalho, $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$), o torque decai segundo uma função exponencial de limite de atrito estático até um valor de convergência de atrito dinâmico.

- Para valores de velocidade em módulo menores do que δ , cujo torque não ultrapassou o torque devido ao atrito estático, o valor do torque é a constante de rigidez do elemento finito adjacente à broca multiplicada pela diferença de deslocamento angular entre as extremidades do elemento.
- Se o módulo da velocidade na broca é menor do que δ e o torque na broca é maior do que o limite estático, o torque na broca torna-se igual ao torque de atrito estático, correspondente à multiplicação de um coeficiente (a_2) pelo peso na broca (F_b).

Figura 13 - Modelo de torque na broca segundo atrito de Coulomb, de acordo com proposta de Navarro-López e Suárez (2004), por Manzatto (2011).

$$T_b = K(\theta_{n-1} - \theta_n); \quad |\omega_b| \leq \delta \text{ e } |T| \leq a_2 F_b; \quad (25)$$

$$T_b = a_2 F_b \text{sign}(T); \quad |\omega_b| \leq \delta \text{ e } |T| > a_2 F_b; \quad (26)$$

$$T_b = [a_1 + (a_2 - a_1)e^{-\beta|\omega_b|}]F_b \text{sign}(\omega_b); \quad |\omega_b| > \delta; \quad (27)$$

Em que:

- K = Constante de rigidez da coluna em relação à torção e igual a GJ/L ;
- θ_{n-1} = Deslocamento angular da extremidade adjacente à broca;
- θ_n = Deslocamento angular da extremidade da broca.

- Função $sign(\omega_b)$: devolve o sinal da velocidade angular na broca;
- a_1 = Coeficiente multiplicador menor, em similaridade com o atrito dinâmico.
- a_2 = Coeficiente multiplicador maior, em similaridade com o atrito estático.
- β = Expoente de decaimento;
- F_b = Peso na broca, WOB.

2.5.2 Dados numéricos considerados para ajuste do modelo

A curva de modelo de atrito não regularizado, utilizada neste trabalho, particularmente derivada da proposta de Navarro-López e Suárez (2004), e apresentada na figura 13, foi ajustada pela regularização de Trindade e Sampaio (2005), que foi obtida a partir das funções empíricas desenvolvidas pelos autores Tucker e Wang (2003).

Neste trabalho, são utilizados os mesmos valores numéricos para parâmetros de perfuração apresentados por Tucker e Wang (2003), e constam na tabela 1.

Tabela 1 - Valores numéricos de parâmetros de perfuração (TUCKER e WANG, 2003).

Variável	Símbolo	Valor	Unidades
Peso específico do material da coluna de perfuração	ρ	8010	kg/m ³
Comprimento da coluna de perfuração	L	3000	m
Raio externo dos tubos da coluna	R_{ext}	0.0635	m
Raio interno dos tubos da coluna	R_{int}	0.0543	m
Aceleração da gravidade	g	9.81	m/s ²
Módulo de Young	E	207	GPa
Módulo de cisalhamento	G	79.6	GPa
Massa da mesa rotativa	M_m	50800	kg
Momento de inércia da mesa rotativa	J_m	500	kg · m ²
Massa do conjunto da broca (BHA)	M_b	5000	kg
Momento de inércia do conjunto da broca	J_b	394	kg · m ²

Tucker e Wang (2003), nas condições de operação de WOB ≈ 100 kN e $\omega_{ref} \approx 100$ rpm = 10.47 rad/s, obtiveram para o torque na broca (*torque-on-bit*, *TOB*), para a profundidade de corte (*depth-of-cut*, *DOC*) e para a taxa de penetração

(rate-of-penetration, ROP), as equações 28, 29 e 30, respectivamente, sendo os coeficientes empíricos: $c_1 = 3.429 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $c_2 = 5.672 \cdot 10^{-8} \text{ m N}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $c_3 = 1.374 \cdot 10^{-4} \text{ m rad}^{-1}$, $c_4 = 9.537 \cdot 10^6 \text{ N rad}$ e $c_5 = 1.475 \cdot 10^3 \text{ Nm}$.

$$TOB = c_4 DOC + c_5 \quad (28)$$

$$DOC = \frac{ROP}{\Omega} \quad (29)$$

$$ROP = -c_1 + c_2 WOB + c_3 \omega_{ref} \quad (30)$$

Trindade e Sampaio (2005), manipulando as equações 28, 29 e 30, obtiveram a função de torque na broca, regularizada, contínua em zero, representada pela equação 31.

$$T_b = (-c_1 + c_2 \cdot WOB) c_4 \frac{\omega_b^3}{(\omega_b^2 + \epsilon^2)^2} + c_3 c_4 \frac{\omega_b^3}{(\omega_b^2 + \epsilon^2)^{3/2}} + c_5 \frac{\omega_b}{(\omega_b^2 + \epsilon^2)^{1/2}} \quad (31)$$

Em que: ω_b representa a velocidade na broca, WOB, o peso na broca e $\epsilon = 2 \text{ rad/s}$, um coeficiente que foi ajustado matematicamente para a regularização da função, que, para baixas velocidades na broca, diminuídos são os valores para o torque, tornando-se nulo para ω_b igual zero. O comportamento desta função T_b em relação a ω_b é ilustrado pela figura 14, para diferentes pesos na broca.

Figura 14 - Função de torque na broca regularizada trabalhada por Trindade e Sampaio (2005), para pesos na broca iguais a 80, 100, 120, 140 e 160kN, em escala de cores.

2.5.3 Ajuste dos coeficientes a_1 , a_2 e β

Pretende-se ajustar a função de decaimento descrita na equação 27, $T_b = [a_1 + (a_2 - a_1)e^{-\beta|\omega_b|}]F_b \text{sign}(\omega_b)$, comparando-a em relação às curvas obtidas na figura 13, para cada peso na broca, e, portanto, devem-se ajustar os coeficientes a_1 e a_2 , e também o expoente de decaimento β .

Para serem obtidos os coeficientes a_1 , a_2 e β , utilizou-se do método dos mínimos quadrados e minimizou-se o erro entre a função aproximada e a função regularizada para cada peso na broca.

A partir da função exponencial de aproximação para o torque na broca ($y(x)$), em relação à velocidade na broca (x), definida na equação 32, ajustaram-se os coeficientes A , B , β e, obtidos A e B , obtiveram-se a_1 e a_2 .

$$y(x) = A + B \cdot e^{-\beta \cdot x} \quad (32)$$

Sendo que:

$$A = 1000 \cdot WOB \cdot a_1 \quad (33)$$

$$B = 1000 \cdot WOB \cdot (a_2 - a_1) \quad (34)$$

Primeiramente, realizou-se uma aproximação obtendo a melhor relação entre as três variáveis A , B e β . Três modos de aproximação foram considerados: desde aproximar a função como um todo (mesmo o trecho que foi linearizado), ou adotar o pico para a função aproximada igual ao da regularizada, situação esta adotada por Manzatto (2011).

Para este trabalho, considerou-se a aproximação a partir do decaimento da função regularizada, com a função do modelo não regularizado passando pelo máximo da função regularizada para cada WOB , como mostrado na figura 15. Em relação às outras situações do modo de aproximação, devido a esta escolha, consequentemente, estabelece-se um torque devido ao atrito estático, maior, aumentando-se as chances de ocorrências do fenômeno *stick-slip*.

Figura 15 – Modo pelo qual foi feita a aproximação em relação à proposta deste trabalho, em vermelho, pela função de torque regularizada por Trindade e Sampaio (2005), para o intervalo de velocidades na broca de 0 a 50rad/s.

Verificou-se um comportamento aproximadamente linear, para os valores obtidos dos coeficientes A e B , em relação ao peso na broca. Foram ajustadas para A e B uma função do primeiro grau por regressão linear, e, em seguida, obtiveram-se funções que representam os coeficientes a_1 e a_2 .

As relações obtidas para os coeficientes a_1 , a_2 e β , no intervalo $80kN \leq WOB \leq 160kN$, em função do peso na broca (WOB), estão expressas nas equações 35, 36 e 37, e, em gráficos, respectivamente, na figura 16, em (a), (b) e (c).

$$a_1 = 0.01185 + 2.034 \cdot WOB^{-1} \quad (35)$$

$$a_2 = 0.12215 - 5.254 \cdot WOB^{-1} \quad (36)$$

$$\beta = -2.584 \cdot 10^6 \cdot WOB^{-4.288} + 0.09988 \quad (37)$$

Figura 16 - Coeficientes a_1 , a_2 e β em (a), (b) e (c), respectivamente, para função modeladora do torque na broca não regularizada, segundo atrito de Coulomb, para o peso na broca entre 80 a 160kN.

Na figura 16, pode-se observar, que, em (a), o coeficiente a_1 , inicia-se, com $WOB = 80\text{kN}$, com um valor próximo a 0.04 e, para 160kN, mostra-se entre 0.02 e 0.03. Em (b), o coeficiente a_2 , para $WOB = 80\text{kN}$, apresenta o valor próximo a 0.06, enquanto que, para 160kN, este valor aumenta para 0.09, aproximadamente.

Em (c), verifica-se, à medida que se aumenta o peso na broca, β , partindo de um valor próximo a 0.08 em $WOB = 80\text{kN}$, aproxima-se de 0.1 à medida em que se aumenta o peso na broca; Manzatto (2011), em uma de suas aproximações para a função regularizada, encontrou valores semelhantes para β .

Os valores obtidos para os coeficientes A , B , a_1 , a_2 e β para os pesos na broca considerados (80, 100, 120, 140 e 160kN), foram registrados na tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes A , B , a_1 , a_2 , β , para a função modeladora do torque na broca não regularizada, para os valores de pesos na broca: 80, 100, 120, 140 e 160kN.

Coeficientes	WOB (kN)				
	80	100	120	140	160
A	2980	3220	3460	3690	3930
B	1550	3730	5960	8160	10370
a_1	0,037	0,032	0,029	0,026	0,025
a_2	0,057	0,070	0,079	0,085	0,089
β	0,082	0,093	0,097	0,098	0,099

A partir dos valores constantes na tabela 2, para os coeficientes a_1 , a_2 , e β , pela equação 27, descrita por $T_b = [a_1 + (a_2 - a_1)e^{-\beta|\omega_b|}]F_b \text{sign}(\omega_b)$, obtiveram-se os gráficos do comportamento do torque na broca em relação à velocidade angular na broca, para este modelo de torque na broca não regularizado, nas curvas em vermelho, e para a função descrita na equação 31, por Trindade e Sampaio (2005), em preto.

Estes gráficos foram obtidos considerando-se o módulo de velocidades na broca entre 0 e 50 rad/s, para os diferentes valores de pesos na broca adotados, 80, 100, 120, 140 e 160kN, e expressos, respectivamente, em (a), (b), (c), (d) e (e), na figura 18.

Estas curvas podem mostrar algumas tendências e possibilidades de análise. Conforme o WOB aumenta, pode-se verificar que para essa aproximação feita, aumenta-se o valor do torque de atrito estático, o que aumenta a possibilidade de ocorrências *stick-slip*.

Figura 17 – Curvas de torque na broca não regularizadas modeladas pela proposta de Navarro-López e Suárez (2004), em vermelho, e aproximadas pela função obtida por Trindade e Sampaio (2005), em preto, para WOB = (a) 80kN. (b) 100kN. (c) 120kN. (d) 140kN. (e) 160kN.

Observa-se, também, na figura 17, as curvas para estes valores de peso na broca tendem para um valor em módulo próximo a 4kN.m, coerentemente com a equação 31, para elevadas velocidades.

2.6 Modelo proposto do conjunto de perfuração

O problema tratado neste trabalho é descrito pelo desenho mostrado na figura 18. Duas inércias, a inércia da mesa rotativa, J_m , e do conjunto da broca (BHA), J_b , encontram-se ligadas por um haste flexível à torção, rígida axialmente, cujo movimento considerado foi apenas a rotação, em torno do próprio eixo axial. Apenas duas forças foram consideradas atuantes no sistema: o torque motor, na mesa, T_m , e o torque propiciado pelo atrito, de resistência, na broca, T_b .

Figura 18 - Esquema representativo do modelo do sistema de perfuração, envolvendo a mesa rotativa, o conjunto da broca e a coluna de perfuração.

O torque na mesa é função da velocidade angular da mesa, ω_m , do deslocamento angular da mesa, θ_m , e do tempo t . O torque na broca é função da velocidade angular na broca, ω_b , do deslocamento angular da broca, θ_b , e do ângulo de torção φ entre as extremidades do último elemento finito, correspondente à diferença entre os deslocamentos angulares da broca e da extremidade anterior. Informações sobre as modelagens do torque na mesa, do torque na broca e da coluna de perfuração são também apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Quadro-resumo para a modelo considerado para o sistema de perfuração, dividido em coluna de perfuração, torque na mesa e torque na broca.

Item do modelo	Modelagem
Coluna de perfuração	Modelada em elementos finitos, com função de forma linear.
Torque na mesa	Controlador PI atuante sobre a velocidade angular na mesa, propiciando ganhos para a velocidade na mesa (Proporcional) e para os deslocamentos (Integrativo).
Torque na broca	Modelo não regularizado para o torque segundo atrito de Coulomb, pela proposta de Navarro-López e Suárez (2004).

O modelo adotado utilizou os mesmos valores de parâmetros de perfuração que constam na tabela 1.

Algumas hipóteses para a coluna de perfuração foram consideradas. A coluna possui uniformidade em relação ao material de constituição e diâmetro constante ao longo do seu comprimento, desprezando-se, portanto, as variações de diâmetro com os *drill-collars* e as seções de rosca. É rígida axialmente, não sendo sujeitas, consequentemente, às vibrações axiais (*bit-bounce*). A coluna só se desloca em torno do seu eixo axial, não sofre flexão ou movimentos laterais.

Todas as propriedades da coluna e material de constituição, como: peso específico, isotropia, módulo de Young, resistência à torção, são consideradas constantes e uniformes. As forças atuantes são apenas os torques na mesa e na broca;

2.7 Validação do modelo proposto

Para se validar o modelo proposto, comparam-se os resultados obtidos para o modelo atual e os obtidos por Trindade e Sampaio (2005) nas mesmas condições de perfuração.

Figura 19 – Velocidades e torques para a broca e mesa no tempo para $Kp = 200\text{N.m.s}$, $Ki = 100\text{N.m}$, $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$ e $WOB = 120\text{kN}$, obtidos: (a) utilizando-se o modelo da coluna proposto e a função de torque na broca regularizada, de Trindade e Sampaio (2005). (b) por Trindade e Sampaio (2005). (c) utilizando-se o modelo de conjunto proposto com a função de torque na broca não regularizado.

Utilizando-se dos valores típicos dos parâmetros de perfuração apresentados por Tucker e Wang (2003), de acordo com a tabela 1, uma típica condição de perfuração foi simulada, para a qual a velocidade angular de referência é de 100rpm (10.47rad/s) e, o peso na broca, 120kN. Os valores dos parâmetros de controle proporcional-integrativo são $K_p = 200\text{N.m.s}$ e $K_i = 100\text{N.m}$ e a velocidade angular inicial de 70 rad/s em toda a coluna. Foi considerado o intervalo de tempo para análise de 0 a 100s.

Na figura 19, em (a) representam-se os gráficos obtidos para o modelo proposto, utilizando-se da mesma função do que a utilizada por Trindade e Sampaio (2005). Em (b), encontram-se os gráficos obtidos por Trindade e Sampaio (2005), segundo modelo por estes mesmos autores, para a função T_b regularizada. E em (c), os gráficos para o modelo atual adotado, segundo a função de torque não regularizada, em aproximação realizada com a proposta de Navarro-López e Suárez (2004) em relação à função obtida por Trindade e Sampaio (2005).

Esta figura serve de comparação aos resultados obtidos e para a necessária validação do modelo proposto, e, tendo-se em vista que em (c), obtém-se velocidades e torques na mesa e na broca maiores (picos mais elevados) do que em relação às situações (a) e (b), porém mantendo-se o mesmo formato das curvas, este modelo encontra-se validado e ainda pode ser considerado em condições de trabalho mais críticas.

2.8 Avaliação da suficiência do número de nós

Para se verificar a suficiência da escolha do número de nós adequado às simulações, atender às demandas de economia de tempo de simulação e de bons resultados, considerando-se que o tempo gasto em simulação aumenta à medida que se aumenta o número de nós, realizou-se um teste comparativo para 10, 20, 50, 100, e 200 nós. Os resultados obtidos foram registrados na figura 20.

Este teste para o modelo proposto foi realizado considerando-se as mesmas condições: $WOB = 120\text{kN}$, $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$, velocidade inicial da coluna de perfuração igual a 70rpm, $K_p = 200\text{N.m.s}$, e $K_i = 100\text{N.m}$.

Analisando-se os gráficos obtidos de acordo com a figura 20, verifica-se, em (b), um erro menor do que 2% para 20 nós com relação a 100 e 200 nós e que os gráficos para 100 e 200 nós são praticamente coincidentes. Em (c), para $n = 10$ houve uma maior valor para amplitude quando em *stick-slip*, apresentando um erro de mais de 6% com

relação à velocidade de referência. Percebe-se, portanto, em (b) e (c), que o número de nós ideal para maior precisão do modelo é de 200 nós.

Avaliando-se, no entanto, a quantidade de tempo que seria destinada à simulação, a escolha de 200 nós apresenta-se inviável, optando-se, neste trabalho, para o número de nós menor, porque as oscilações em *stick-slip* apresentadas na figura 20 em (c), pouco contribuem para o resultado final a ser avaliado.

Portanto, pode-se trabalhar com a segurança de esperar-se obter praticamente as mesmas respostas do que se fosse um número de nós maior, adotando-se para as simulações deste trabalho, o número de nós igual a 10.

Figura 20 – (a) Velocidade da broca (rad/s) no tempo (s) para o modelo proposto de torque na broca não regularizado, com os parâmetros $WOB = 120\text{kN}$, $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$, velocidade inicial = 70rpm, $Kp = 200\text{ N.m.s}$, $Ki = 100\text{N.m}$, considerada para os números de nós 10, 20, 50, 100 e 200.(b) zoom de retângulo superior. (c) zoom de retângulo inferior.

2.9 Influência dos parâmetros K_p e K_i no Controle PI

Para se avaliar a influência, com a implementação da técnica de controle PI, dos parâmetros de ganho proporcional e integrativo, obtiveram-se, para K_p e K_i , resultados de duas maneiras diferentes: na primeira, manteve-se K_p constante e variou-se K_i , e, na segunda, manteve-se K_i constante e variou-se K_p .

Figura 21 – Gráficos para análise da influência dos parâmetros proporcional e integral no controle PI com peso na broca igual a 120kN e $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$, mantendo-se $K_p = 200\text{N.m.s}$. (a), (b) $K_i = 50\text{N.m}$. (c), (d) $K_i = 100\text{N.m}$. (e), (f) $K_i = 200\text{N.m}$.

Da primeira maneira, manteve-se constante $K_p = 200\text{N.m.s}$, e fez-se variar de $K_i = 100\text{N.m}$ para $K_i = 50\text{N.m}$ e 200N.m . Da outra maneira, manteve-se $K_i = 100\text{N.m}$ constante e assumiram-se outros valores para K_p além de $K_p = 200\text{N.m.s}$, obtendo-se gráficos para $K_p = 100\text{N.m.s}$ e $K_p = 400\text{N.m.s}$.

Pode-se observar, pela figura 21, que, aumentando-se K_i , mantendo-se K_p constante, a frequência das oscilações aumenta, tanto para as velocidades como para os torques. Na mesma figura, em (f), nota-se que a amplitude do torque da mesa aumenta.

Figura 22 – Gráficos para análise da influência dos parâmetros proporcional e integral no controle PI com peso na broca igual a 120kN e $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$, mantendo-se $K_i = 100\text{N.m}$ e $K_p = 100\text{N.m.s}$ (a), (b); $K_p = 200\text{N.m.s}$ (c), (d); $K_p = 400\text{N.m.s}$ (e), (f).

O torque para a broca não se altera em termos de amplitude, apenas em termos de frequência. Ainda na figura 21(e), nota-se maior tendência ao desequilíbrio do sistema, já que a velocidade da mesa fica, algumas vezes, negativa, o que significa dizer que a coluna passa a girar em sentido contrário ao movimento da mesa rotativa. A situação menos problemática apresenta-se justamente a primeira, em que $K_i = 50\text{N.m}$ e $K_p = 200\text{N.m.s}$.

Na figura 22, percebe-se que os gráficos que apresentavam mais instabilidade foram para o menor valor de $K_p = 100\text{N.m}$. Para $K_p = 400\text{N.m.s}$, encontra-se o par mais estável possuindo até uma convergência para os valores de referência, mostrando a possibilidade de se obter eliminação de stick-slip e oscilações para alcançar estabilidade para determinados pares de valores de K_p e K_i .

Na figura 22(a) um valor baixo para K_p propiciou a ressonância com algum modo de vibração da coluna. Verificou-se que a frequência de oscilação não se alterou para os outros gráficos, mostrando que, caso a variação de K_p não possibilite a entrada da coluna em algum dos modos de vibração, a frequência das oscilações não se alterou.

Como já observado por Manzatto (2011), o parâmetro integral da velocidade (K_i), proporcional ao deslocamento, afeta a rigidez equivalente do sistema. Assim, o seu aumento induz um aumento na frequência de oscilação das velocidades da mesa e da broca. O parâmetro proporcional à velocidade afeta o amortecimento equivalente do sistema, um aumento no K_p então propicia um decaimento mais acentuado das amplitudes de vibração do sistema.

2.10 Influência do peso na broca no Controle PI

Pode-se verificar a influência do *WOB* na amplitude das oscilações de velocidade (figura 23). Ao aumentar-se o *WOB*, maiores se tornam as amplitudes de velocidades na mesa e na broca, portanto, a mais instabilidades a coluna de perfuração pode estar sujeita.

Figura 23 - Velocidade na broca e na mesa no tempo para a função torque regularizada para *WOB* = 80kN (a), *WOB* = 100kN (b), *WOB* = 120kN (c), *WOB* = 140kN (d), *WOB* = 160kN (e).

2.11 Controlador PI com peso na broca variável

Propõe-se avaliar o desempenho deste complemento ao controlador PI, que consiste em variar linearmente o peso na broca, para buscar reduzir oscilações, ou fazer desprender novamente o conjunto da broca, alterando-se o valor da força de atrito, que depende deste peso.

A proposta que se utilizou neste trabalho utilizou-se da hipótese de que a coluna de perfuração e o seu conjunto é rígida axialmente, podendo, então, ser aplicada a variação do peso na broca, pois em outro caso estaria sujeita a vibrações axiais, que não é o foco de atuação deste trabalho.

A variação linear do peso na broca é definida pela equação 38:

$$WOB = WOB_0 + K_W \cdot (\omega_m - \omega_{ref}) \quad (38)$$

Em que:

WOB = Valor para o peso na broca variável, em N.

WOB_0 = Valor para o peso na broca constante, em N.

K_W = Parâmetro de controle de variação do peso na broca, em N.s.

ω_m = Velocidade angular da mesa, em rad/s.

ω_{ref} = Velocidade angular de referência para a coluna de perfuração, em rad/s.

Figura 24 - Modelo esquemático de um controlador PI com peso na broca variável, adotado para o sistema de perfuração.

Na figura 24, encontra-se representado um modelo esquemático para esta implementação, que, combinada ao controlador PI, constitui a segunda técnica de controle considerada. As entradas deste controlador são: o peso na broca inicial e a velocidade de referência; a saída: a velocidade angular da mesa, sendo o retângulo em tracejado o sistema controlado. Funciona, também, como mais uma forma de controle não-colocalizado, já que não atua em resposta a uma alteração na broca e sim na velocidade da mesa.

Apresenta-se na tabela 4, um quadro resumo das leis de controle para avaliação do desempenho na eliminação das oscilações na velocidade e do fenômeno *stick-slip*.

Tabela 4 – Quadro resumo das Técnicas de Controle consideradas para a análise de desempenho na minimização ou eliminação das oscilações na velocidade da broca e do fenômeno *stick-slip*.

Item	Descrição	Parâmetro de Controle Proporcional	Parâmetro de Controle Integrativo	Parâmetro de Controle para Variação do Peso na broca
1ª. Técnica de Controle	Controlador Proporcional Integrativo com peso na broca constante	Kp	Ki	-
2ª. Técnica de Controle	Controlador Proporcional Integrativo com peso na broca variável	Kp	Ki	Kw

Para sondar e conhecer o comportamento deste controlador com peso na broca variável, adotam-se como valores de segurança: para o peso na broca, um máximo de 20% acima de WOB_0 , para situar WOB dentro de uma faixa razoável de valores; lembrando-se de que os parâmetros de Tucker e Wang (2003) foram obtidos em determinadas condições ($WOB = 100\text{kN}$, $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$) e que possuem uma margem de segurança próxima aos valores originais.

Analisando-se a figura 23, bem como as figuras 21 e 22, percebe-se que a velocidade na broca chega perto de um máximo aproximado de 2.5 vezes a velocidade de referência. Adota-se este valor para estipular um máximo aceitável para a velocidade na mesa permanecendo no intuito de que a aplicação do WOB variável propicie situações melhores do que nas figuras 21 e 22, que apresentaram *stick-slip* ou situações oscilantes.

Para $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$ (10.47rad/s), obtiveram-se as faixas de valores para Kw , apresentados na tabela 5, em relação aos diferentes pesos na broca considerados. Para

$WOB = 120\text{kN}$, obteve-se um gráfico para ilustrar o comportamento do peso na broca variável para alguns valores de K_w , conforme figura 25.

Tabela 5 - Faixa de valores para K_w para trabalho em malhas paramétricas de acordo com WOB_0 .

WOB (kN)	Faixa de valores para K_w	
	Maiores que	Menores que
80	0	1.0
100	0	1.2
120	0	1.5
140	0	1.7
160	0	2.0

Como os coeficientes obtidos para a T_b regularizada o foram em condições de perfuração para WOB próximo a 100kN , os coeficientes de ajuste a esta função também teriam uma validade dentro da faixa obtida de referência (valores observados nos resultados obtidos para o controle PI).

Para efeitos de cálculo pode-se obter uma faixa razoável de trabalho para K_w (considerando-se apenas o caso de $K_w > 0$), para WOB_0 no conjunto de valores: 80, 100, 120, 140, 160kN, trabalhando a equação de definição do WOB variável (equação 39).

$$K_w = 0.133 \frac{WOB_0}{\omega_{ref}} \quad (39)$$

Figura 25 – Variação do WOB em função da velocidade para K_w entre 0 e 1.5, $WOB_0 = 120\text{kN}$.

3 Análise Paramétrica

Neste capítulo, são apresentados: os critérios adotados para avaliação de desempenho e da viabilidade de operação e as malhas paramétricas obtidas para pares de valores de K_p e K_i segundo tais critérios respectivos; o procedimento para o ajuste dos parâmetros K_p e K_i ; os resultados obtidos para as técnicas de Controle consideradas, o controlador proporcional integrativo com peso na broca constante e com a peso na broca variável. Em seguida, são apresentadas também, a comparação e análise dos resultados obtidos para estas duas técnicas de Controle.

3.1 Critérios de desempenho e segurança

Os critérios de análise adotados totalizam seis: quatro deles caracterizam-se como sendo de segurança ou limitante-restritivos, que devem fornecer relativa margem de segurança quanto a falhas no processo de perfuração. Outros dois, considerados para avaliação de desempenho, classificatórios, qualificam o processo de perfuração para os parâmetros de controle adotados, a velocidade de referência e a técnica de controle utilizada. Neste trabalho, os critérios e a nomenclatura (J , com índices) são os mesmos adotados por Manzatto (2011). Os critérios de análise utilizados são:

- J_1 Desvio médio de velocidade angular na broca;
- J_2 Taxa de penetração média relativa;
- J_3 Tensão de cisalhamento máximo na coluna;
- J_4 Desvio máximo de velocidade angular na broca;
- J_5 Torque máximo na broca;
- J_6 Potência máxima exigida do motor.

Os critérios para análise de desempenho são o desvio médio de velocidade angular na broca (J_1) e a taxa de penetração média relativa (J_2); os critérios de segurança são a

tensão de cisalhamento máximo na coluna (J_3), o desvio máximo de velocidade angular na broca (J_4), o torque máximo na broca (J_5) e a potência máxima exigida do motor (J_6).

Tais critérios são descritos e desenvolvidos nos itens de 3.2.1 a 3.2.6.

Iniciou-se a descrição dos critérios e seus respectivos resultados obtidos em ordem decrescente de J_6 para J_1 , sendo, dos índices de J_6 ao J_3 os de avaliação de segurança e de J_2 a J_1 os de avaliação de desempenho. O mesmo se deu para manter-se a mesma nomenclatura utilizada por Manzatto (2011), e para também apresentar primeiramente os critérios de segurança e, em segundo lugar, os critérios de análise propriamente ditos, os critérios de desempenho.

Os critérios J_2 , J_3 , J_4 , J_5 , J_6 , foram obtidos para a faixa de valores de Kp e Ki com Kp de 0 a 1000N.m.s e variação de 100N.m.s, e Ki de 0 a 1000N.m, com variação de 100N.m.

3.1.1 Potência máxima exigida do motor (J_6)

Deve-se confirmar que a potência requerida não ultrapasse um máximo pré-determinado pelas condições do motor escolhido. Para tanto, o critério para avaliação da potência máxima é definido pela equação 40. A potência do motor pode ser assim calculada:

$$J_6 = \max (T_m \omega_m) \quad (40)$$

Em que:

P = Potência requerida do motor (kW);

T_m = Torque na mesa rotativa (kN.m);

ω_m = Velocidade angular na broca (rad/s);

O critério J_6 aplicado para diferentes pesos na broca é apresentado na figura 26 em três dimensões, com os valores da máxima potência para cada par de valores de Kp e Ki no eixo z; e na figura 27, em curvas de nível, na escala de cores para os valores atingidos de máxima potência.

A figura 27 mostra que, para valores de Kp e de Ki próximos a zero, e para valores de Ki próximos a 100N.m, maior potência é exigida do motor. Escolhendo-se um motor que suporte a potência máxima de 500kW, para estas faixas de trabalho dos parâmetros Kp e Ki e para estes valores de peso na broca, atendem-se às exigências de operação e segurança para J_6 .

Figura 26 - Potência máxima requerida do motor (J_6), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e WOB = (a)80kN. (b)100kN. (c)140kN. (d)160kN.

Figura 27 - Potência máxima requerida do motor (J_6), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e WOB =120kN, em curvas de nível.

Pela figura 27, para $WOB = 120\text{kN}$, percebe-se a curva em vermelho, que representa valores da potência máxima próximos a 300kW, situa-se em valores bem reduzidos de K_p . Todos os outros pontos exigem uma potência máxima menor do que 300kW.

3.1.2 Torque máximo na broca (J_5)

Este critério avalia qual o máximo torque a que a broca é submetida durante o processo de perfuração e verifica se não ultrapassa as diretrizes do projeto, se está conforme dimensionado, sendo um critério para segurança do conjunto, na faixa de trabalho de Kp e Ki .

$$J_5 = \max(|T_m|) \quad (41)$$

Figura 28 - Torque máximo na broca (J_5), para Kp de 0 a 1000N.m.s, Ki de 0 a 1000N.m e WOB = (a) 80kN. (b) 100kN. (c) 140kN. (d) 160kN.

Para todas as curvas obtidas apresentadas na figura 28 observam-se que os valores de torque máximo na broca aumentam com o aumento do WOB , mas ainda assim estão dentro do limite suportável da coluna que é 35.5kN.m, conforme cálculo apresentado na equação 42.

$$T_{max} = \frac{\tau_{adm} J}{R_{ext}} = 189.5 \cdot 10^6 \frac{\pi}{2} (0.0635^4 - 0.0543^4) \frac{1}{0.0635} = 35.5 kN \cdot m \quad (42)$$

Na figura 29 tem-se o torque máximo em curvas de nível, em escala de cores, para a mesma faixa de valores de K_p e K_i . As regiões em que K_i é próximo de zero estão em azul. Percebe-se, que à medida em que são aumentados os valores de K_p e K_i , alternada ou simultaneamente, os valores para o torque máximo aumentam, mas mantendo-se ainda dentro de segura faixa de operação.

Figura 29 - Torque máximo na broca (J_5), para K_p de 0 a 1000N.m.s e K_i de 0 a 1000N.m e $WOB = 120kN$, em curvas de nível na faixa de valores de 0 a 20kN.m.

A figura 29 mostra que a curva em vermelho, que caracteriza os mais altos valores para o torque máximo, próximos a 20kN.m, localiza-se adiante de valores de K_i maiores do que 600N.m, e para valores de K_p em N.m.s relativamente pequenos (menores do que 100N.m.s). Para larga faixa de valores de K_p encontram-se valores para o torque máximo menores do que 15kN.m, conforme se visualiza na curva de cor laranja.

3.1.3 Desvio máximo de velocidade angular na broca (J_4)

Este critério de análise foi desenvolvido para garantir que a velocidade angular máxima na broca não ultrapasse o valor pré-estipulado para a máxima velocidade angular, que, no caso, foi proposto de 2.5 vezes a velocidade de referência, número este adotado por observação do comportamento da velocidade da broca para diversos pares de valores de K_p e K_i .

Definiu-se, então, a função, pela equação 43:

$$J_4 = \max(\omega_b - \omega_{ref}) \quad (43)$$

sendo ω_b a velocidade angular na broca e ω_{ref} a velocidade angular de referência. As curvas obtidas para os diferentes pesos na broca são mostradas na Figura 30.

Figura 30 – Desvio máximo de velocidade angular da broca (J_4), para K_p de 0 a 1000N.m.s e K_i de 0 a 1000N.m e WOB = (a)80kN, (b)100kN, (c)140kN, (d)160kN.

As figura 30 e 31 mostram que velocidades maiores são atingidas em valores de K_i próximos a 0, até uma faixa de 200N.m, enquanto que mantendo-se K_p constante e aumentando-se K_i , percebe-se um aumento do desvio em relação à velocidade de referência, indicando por este critério que os valores para K_i não devem ser elevados.

Para os pesos na broca iguais a 140 e 160kN, na figura 30, em (c) e (d), visualizam-se em (c) que alguns pares de valores de K_p e K_i fazem ultrapassar o desvio máximo previamente considerado, e em (d), a partir de valores de K_i maiores do que 200N.m, praticamente todos os pares ultrapassam esse desvio de 2.5 vezes a velocidade de referência.

Figura 31 - Desvio máximo de velocidade angular da broca (J_4), para K_p de 0 a 1000 N.m.s e K_i de 0 a 1000 N.m e $WOB = 120$ kN.

De acordo com a figura 31, para valores pequenos de K_i , menores são as velocidades máximas atingidas; pode-se perceber, observando a curva de $J_4 = 20$ rad/s (verde-clara) que, para largas faixas de valores de K_p e K_i a máxima velocidade atingida é de 20 rad/s, duas vezes a velocidade de referência planejada.

3.1.4 Tensão de cisalhamento máximo na coluna (J_3)

Este critério é utilizado para se saber que não se provocará ruptura ou qualquer tipo de falha por cisalhamento na coluna estando esta submetida à torção, sendo o valor para a tensão admissível considerado $\tau_{adm} = 189,5$ MPa.

Utilizou-se, para tanto, do valor para tensão τ em cada elemento da coluna, considerando-se a diferença entre o ângulo entre os nós de cada elemento, e obteve-se a relação com a tensão admissível, expressa na equação 44.

$$J_3 = \max\left(\frac{|\tau|}{\tau_{adm}}\right) \quad (44)$$

Figura 32 - Relação percentual entre a tensão de cisalhamento máxima atingida na coluna e a tensão admissível (J_3), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e WOB = (a)80kN. (b)100kN. (c)140kN. (d)160kN.

De acordo com a figura 32, para este critério, os pares de valores de K_i e K_p com K_i entre 0 e 200N.m propiciam menores valores para a tensão de cisalhamento máxima na broca. No entanto, à medida em que K_i aumenta neste intervalo, a relação tensão máxima e tensão admissível aumenta, mantendo-se aproximadamente constante para valores de K_i maiores do que 200N.m; observa-se, para estes valores, a formação de uma região próxima a uma plano, que se apresenta semelhante para os diferentes pesos na broca.

Propriamente para $WOB = 120\text{kN}$, para valores de K_i maiores do que 100N.m, já se apresenta esta região plana de desvio próximo a 90% como apresentado na figura 33.

Figura 33 - Relação percentual entre a tensão de cisalhamento máxima atingida na coluna e a tensão admissível (J_3), para Kp de 0 a 1000N.m.s, Ki de 0 a 1000N.m e $WOB = 120kN$, em curvas de nível na faixa de valores de 0 a 100%.

Os valores para o critério em questão nestas regiões aproximadamente planas apresentam-se próximos mas inferiores a 100, e para nenhum par de valores de Kp e Ki nesta malha adotada encontram-se valores de J_3 maiores do que 100%, indicando que para tais valores de Kp (0 a 1000N.m.s) e Ki (0 a 1000N.m) o critério J_3 é atendido em suas especificações.

3.1.5 Taxa de penetração média relativa (J_2)

A taxa de penetração (ROP) é utilizada para se mensurar a eficiência do processo de perfuração, representa a rapidez do processo que, quanto maior seja, analisando-se isoladamente, menores serão os custos da operação.

Denominando esta ROP como valor esperado ou de referência (equação 44), temos, pela equação 45, a ROP real (utilizando-se ω_m ao invés de ω_{ref}) e, a partir dela foi determinado o critério J_2 , que encontra o percentual relativo de desvio entre a valor real e o esperado para a ROP , sendo expresso na equação 46.

$$ROP_{ref} = -c_1 + c_2 WOB + c_3 \omega_{ref} \quad (44)$$

$$ROP_m = -c_1 + c_2 WOB + c_3 \omega_m \quad (45)$$

$$J_2 = \frac{ROP_m - ROP_{ref}}{ROP_{ref}} \quad (46)$$

Figura 34 – Taxa de penetração média relativa (J_2), para K_p de 0 a 1000N.m.s, K_i de 0 a 1000N.m e $WOB =$ (a)80kN. (b) 100kN. (c) 140kN. (d) 160kN.

Os resultados encontrados são relacionados na figura 34 (para $WOB = 80, 100, 140, 160$ kN). Na figura 35, em curvas de nível para $WOB = 120$ kN, para visualização sob outra forma de apresentação.

Os gráficos da figura 34 apresentam-se com grandes semelhanças, mostrando que, para este critério, a variação do peso na broca pouca influência exerce na taxa de penetração, resultado já previsto, tendo-se em vista que a constante empírica c_2 é menor em ordem de grandeza 10 e 100 vezes das constantes c_3 e c_1 , respectivamente.

Como demonstração vista pela figura 35, para K_i superior a 100N.m, já se encontra numa faixa de erro em relação à taxa de penetração esperada de menos de 5 pontos percentuais.

O valor do percentual de diferença entre a taxa real e esperada, difícil de ser apresentado na figura, quando se trata das regiões planas, é menor do que 0,5%, mostrando que este

critério se comporta em uma estreita faixa de valores, para Ki maiores que 100N.m, variando imperceptivelmente com Kp e com a variação do peso na broca.

Figura 35 – Taxa de penetração média relativa (J_2), para Kp de 0 a 1000N.m.s, Ki de 0 a 1000N.m e $WOB = 120kN$, em curvas de nível na faixa de valores compreendida pelo intervalo de -30% a 0,5%.

Observa-se na figura 35, que a ROP é razoavelmente constante (pouco sofre variação), para valores de Ki acima de 100N.m, atingindo o valor próximo a ROP de referência, para os outros valores de Ki e Kp .

3.1.6 Desvio médio de velocidade angular da broca (J_1)

Como o interesse neste trabalho é a obtenção da minoração, diminuição ou eliminação do fenômeno de *stick-slip*, responsável por provocar grandes oscilações na velocidade da mesa e da broca, este critério é proposto para avaliar e poder se mensurar o quanto as velocidades da broca e da mesa desviam-se da velocidade de referência.

Este índice quantifica um desvio médio da velocidade angular da broca (ω_b) em relação à velocidade de referência (ω_{ref}), constituindo-se da soma dos desvios pontuais em cada instante de tempo t , descrito matematicamente na equação 47:

$$J_1 = \int_{t_i}^{t_f} \frac{|\omega_b - \omega_{ref}|}{\omega_{ref}} dt \quad (47)$$

O desvio médio de velocidade angular propiciou resultados significativos e favoráveis para condicionar a escolha dos parâmetros Kp e Ki , pois, para tal critério, houve a

formação de regiões bem delineadas, em que, no seu interior, a velocidade angular apresentasse determinado desvio.

Para os melhores valores de J_I (os menores desvios), os outros critérios não terminam por não influenciar significativamente. Isso foi constatado ao se avaliar cada outro critério em conjunto com J_I , na obtenção das curvas por análise paramétrica, o que produziu resultados semelhantes.

Apesar disso, apresentaram-se os resultados para J_2 , J_3 , J_4 , J_5 e J_6 , para mostrar que estes foram atendidos em suas especificações.

Na tabela 6, as observações e conclusões a respeito de cada critério estão resumidas.

Tabela 6 - Quadro resumo dos resultados obtidos para os critérios de análise de segurança e desempenho.

Critério de análise	Observações/Conclusões
J_6 Potência máxima no motor	Quanto menores os valores de K_p e K_i , maior potência é exigida do motor. Para um motor que suporte a potência máxima de 500kW, as exigências de operação são atendidas.
J_5 Torque máximo na broca	Os valores de torque máximo aumentam com o aumento do WOB , estando dentro do limite suportável, cujo valor corresponde a 35.5 kN.m.
J_4 Desvio máximo na velocidade angular na broca	As velocidades maiores são atingidas em valores de K_i próximos a zero, até uma faixa de 200N.m. Mantendo-se K_p constante e aumentando-se K_i , percebe-se um aumento do desvio em relação à velocidade de referência.
J_3 Tensão de cisalhamento máxima na coluna	Os pares de valores de K_i e K_p com K_i entre 0 e 200N.m propiciam menores valores para a tensão de cisalhamento e, para valores de K_i acima de 200N.m observa-se a formação de uma região próxima a um plano, semelhante para os diferentes pesos na broca.
J_2 Taxa de penetração média relativa	Para K_i superior a 100N.m, a faixa de erro em relação à taxa de penetração esperada de foi menor do que 0,5%, variando imperceptivelmente com K_p e com a variação do peso na broca.
J_I Desvio médio de velocidade na broca	Houve a formação de regiões bem delineadas, em formas semelhantes a elipses, em que, no seu interior, a velocidade angular apresentasse desvio menor do que determinado valor. Percebeu-se que minimizando-se os valores de J_I , os outros critérios deixam de ter influência significativa.

Do item 3.2 em diante os resultados considerados o são para o desvio médio da velocidade angular, J_I , sendo que, caso haja citações isoladas da palavra "desvio" sem especificação, estas estão em referência ao desvio J_I .

3.2 Ajuste dos parâmetros K_p e K_i

Apresentam-se, nos itens que se seguem, os resultados obtidos por J_I para cada peso na broca, utilizando-se as técnicas de controle PI com peso na broca constante e PI com peso na broca variável.

Primeiramente, necessitava-se saber em que faixa de valores estariam situados os valores de K_p e K_i , e se existia uma faixa de pares de valores que poderia se obter uma minimização do desvio médio da velocidade angular, o critério de desempenho J_I . Foi elaborada uma planilha em que foi montada uma malha destes dois parâmetros, e testados par a par de valores. O significado atribuído do termo “malha” é o conjunto ordenado de pares de valores para os parâmetros K_p e K_i .

Percebeu-se, nestas malhas, que alguns pares minimizavam o desvio, proporcionando maiores ou menores valores para o desvio, conforme o par de valores de K_p e K_i . Em alguns casos, o tempo de acomodação ao valor da velocidade angular de referência era menor do que 100 segundos.

Em outros casos, verificou-se se que poderia convergir para a referência em um tempo maior do que 100s, e, ainda, outros pares de K_p e K_i poderiam provocar grandes oscilações às velocidades da mesa e da broca.

Verificou-se a formação de figuras semelhantes a elipses, que delimitavam uma região em que, no seu interior, os pares de K_p e K_i propiciavam determinado desvio médio da velocidade, J_I .

Pelo processo da tentativa e erro, pode-se perceber que seria possível encontrar uma faixa de valores combinados que resultassem em uma aproximação da velocidade resultante da broca e da mesa, mais ou menos rápida para a velocidade de referência planejada.

Situadas e conhecidas previamente tais faixas, foram estabelecidas as malhas paramétricas para cada WOB , buscando-se encontrar a melhor relação: faixa de variação para cada parâmetro e o passo (incremento) de variação. E descobriu-se que se poderia aumentar a velocidade de processamento dos cálculos diminuindo-se a precisão atribuída à velocidade da broca, o que, na prática, é coerente com as dificuldades observadas em campo. Toda essa análise constituiu o ponto mais crítico deste trabalho.

3.3 Resultados obtidos para PI com *WOB* constante

Nesta seção, apresentam-se os resultados para o Controle Proporcional Integrativo com peso na broca constante. Na seção 3.3.1, encontram-se as curvas de desvio J_I em duas e três dimensões para os pesos na broca: 80, 100, 120, 140 e 160kN.

Para os pesos na broca iguais a 120 e 140, apresentam-se a escolha, dentre essas malhas, de pontos em que pares de valores de K_p e K_i propiciavam desvios J_I diferentes, visando compreender a influência do desvio no comportamento das velocidades da mesa e da broca.

Na seção 3.3.2, são apresentados graficamente as velocidades da mesa e da broca para os pares de valores que propiciam o menor desvio J_I , os quais foram denominados pontos ótimos da malha paramétrica de K_p e K_i considerada.

Em 3.3.3, foi feita uma comparação das curvas de nível obtidas para os pesos na broca considerados.

Na seção 3.3.4, avaliou-se a influência da alteração da velocidade de referência na formação de regiões de menor desvio para as mesmas malhas paramétricas consideradas na seção 3.3.1, obtidas para 100rpm.

3.3.1 Curvas obtidas das malhas paramétricas para cada *WOB*

Neste item apresentam-se as curvas em duas e três dimensões para cada peso na broca considerado (80, 100, 120, 140 e 160kN) obtidas das malhas paramétricas consideradas. Estas malhas apresentam-se menores conforme aumenta-se o peso na broca.

Caso fossem mostradas as imagens todas derivadas de malhas iguais, ficaria mais difícil a visualização, e, por isso, foram consideradas malhas diferentes conforme as curvas melhor fossem caracterizadas, para cada peso na broca.

▪ **Curvas para $WOB = 80kN$**

Figura 36 - Desvio médio da velocidade angular da broca (J_1), para K_p de 0 a 4000N.m.s, a cada 100N.m.s e K_i de 0 a 1600N.m, a cada 50N.m, com Controle PI e WOB igual a 80kN. Em 3 (três) dimensões (a); em 2 (duas) dimensões (curvas de nível) (b).

Pode-se observar, inicialmente, que houve, para este peso na broca, a formação de regiões na forma de meia elipse, ao longo do eixo determinado por K_i , de acordo com a figura 36. Os valores para K_i apresentam-se em uma mais restrita variação do que em relação ao parâmetro proporcional K_p . As regiões delimitadas pelas curvas das cores de azul mais escuro até amarelo, respectivamente correspondendo aos desvios de 10 até 60, apresentam-se relativamente bem delineadas.

As regiões que propiciam menor desvio apresentam-se delimitadas pelas curvas na cor azul, sendo que, pontos interiores a estas duas regiões (de desvios menores do que 10 e 20) propiciam minimização ou eliminação do problema de oscilações acentuadas na velocidade da broca e da mesa e do *stick-slip*. Tais curvas ficam interiores a um retângulo formado por Kp de 150 a 2200N.m.s de Ki de 100 a 900N.m.

Na tabela 7, descrevem-se as malhas paramétricas utilizadas, A_1 e A_2 , os pontos ótimos encontrados para cada malha e o menor desvio encontrado. Para consideração das malhas, observaram-se os menores valores de Kp e Ki que permitissem a visualização de amplas faixas de desvio, e das regiões de menores desvios.

Tabela 7 - Descrição das malhas de otimização, com os valores de Kp e Ki e pontos ótimos com respectivos desvios relativos (J_I), obtidas com Controle PI e WOB igual a 80kN.

Malha		De	A	Delta	Ponto ótimo	Desvio do Ponto Ótimo
A_1	Kp	0	4000	100	700	3.88
	Ki	0	1600	50	150	
A_2	Kp	0	1100	25	700	3.75
	Ki	0	400	25	175	

O ponto ótimo obtido pela malha A_1 pouco se modifica em A_2 , apresentando desvios semelhantes.

▪ **Curvas para $WOB = 100\text{kN}$**

Figura 37 - Desvio médio da velocidade angular da broca (J_1), para K_p de 0 a 1500N.m.s, a cada 50N.m.s e K_i de 0 a 750N.m, a cada 50N.m, com Controle PI e WOB igual a 100kN. Em 3 (três) dimensões (a); em 2 (duas) dimensões (curvas de nível) (b).

As curvas apresentadas na figura 37 apresentam-se, em relação às da figura 36, para o peso na broca de 80kN, em faixas mais restritas para K_p e K_i . Enquanto para $WOB = 80\text{kN}$, os valores de K_i se estendem até 1400N.m (as mesmas cores, do azul ao amarelo) na malha considerada, para $WOB = 100\text{kN}$, os valores para K_i se restringem até 600N.m, praticamente na mesma proporção de redução para os valores de que K_p , que diminuem de 3400 para 1400N.m.s.

Avaliando-se em termos de área de abrangência, para as regiões delimitadas pelas curvas de desvio J_I de 10 até 60, considerando-se os limites dos retângulos formados pelas faixas de variação de Kp e Ki , houve uma redução de 84% de $WOB = 80\text{kN}$ para $WOB = 100\text{kN}$.

Para as curvas de menor desvio, representadas em azul, com os valores de J_I , 10 e 20, as regiões que em seu interior propiciam para pares de Kp e Ki as melhores condições de operação, para 80kN , os limites para Kp e Ki eram Kp de 200 a 2400N.m.s e Ki de 50 a 1000N.m , e, para $WOB = 100\text{kN}$, os limites tornam-se Kp de 300 a 1250N.m.s e Ki de 20 a 480N.m , reduzindo a área de abrangência em 79%.

A tabela 8 apresenta as malhas paramétricas B_1 e B_2 , consideradas para obtenção das curvas, sendo a malha B_2 um refinamento da malha B_1 , alterando os valores de Kp e Ki para o ponto ótimo obtido, cujo desvio se modifica bem pouco, de 5.95 para 5.86. Não foi considerada importante a exposição da malha B_2 em curvas de nível, devido à suficiência de detalhes apresentados pela exposição da malha B_1 .

Tabela 8 - Descrição das malhas de otimização, com os valores de Kp e Ki e pontos ótimos com respectivos desvios relativos (J_I), obtidas com Controle PI e WOB igual a 100kN .

Malha		De	A	Delta	Ponto ótimo	Desvio do Ponto Ótimo
B_1	Kp	0	1500	50	700	5.95
	Ki	0	750	50	150	
B_2	Kp	500	950	25	675	5.86
	Ki	50	300	25	125	

Não se registraram aqui todas as malhas paramétricas utilizadas em termos de demonstrações em gráficos, apenas as julgadas necessárias para maior apreciação do comportamento das curvas de desvio J_I .

▪ Curvas para $WOB = 120\text{kN}$

Figura 38 – Desvio médio da velocidade angular da broca (J_1), para K_p de 0 a 1100N.m.s, a cada 25N.m.s e K_i de 0 a 450N.m, a cada 25N.m, com Controle PI e WOB igual a 120kN. Em 3 (três) dimensões (a); em 2 (duas) dimensões (curvas de nível) (b).

Para $WOB = 120\text{kN}$, de acordo com a figura 38, encontraram-se, ainda, curvas regulares, para os desvios J_1 até 60, porém em limites para K_p e K_i bem mais estreitos quando comparados aos obtidos para menores pesos na broca.

As curvas de desvio $J_1 = 10$, em azul mais escuro, no entanto, apresentam-se relativamente pequenas em relação às curvas para outros valores de desvio, quase entrando em colapso.

Em termos relativos à área de abrangência das curvas de desvio de 10 a 60 (do azul ao amarelo), em relação ao aumento de 20% no peso na broca (de 100 a 120kN), para limites de Kp e Ki considerados com Kp de 250 a 950N.m.s e Ki de 20 a 320N.m, houve uma redução de 71%.

Os limites para Kp de 400 a 950N.m.s e Ki de 20 a 280N.m abrangem as regiões formadas pela curva para desvios menores do que 20 (as de $J_I = 10$ estão interiores), apresentam esta área diminuída 67% em relação ao peso de 100kN e 93% em relação ao peso na broca igual a 80kN.

Na tabela 9 apresentam-se a malha A_3 para este peso na broca considerado (120kN) e o ponto ótimo, obtido para $Kp = 700$ N.m.s e $Ki = 175$ N.m, bem como o desvio J_I para este par de valores. A apresentação desta malha foi considerada suficiente para visualização das curvas de desvio para comparação com outros pesos na broca, sendo já esta um refinamento de uma malha maior, proposta inicialmente, mas que dificultaria a melhor visualização.

Tabela 9 - Descrição da malha de otimização, com os valores de Kp e Ki e pontos ótimos com respectivos desvios relativos (J_I), obtida com Controle PI e WOB igual a 120kN.

Malha		De	A	Delta	Ponto ótimo	Desvio do Ponto Ótimo
A_3	Kp	0	1100	25	700	9.68
	Ki	0	450	25	175	

Apresenta-se este valor para o peso na broca como mais difícil de se trabalhar, tendo de se ajustar os parâmetros com mais propriedade.

Para visualização do comportamento das velocidades da mesa e da broca conforme o desvio J_I é apresentado na tabela 10 um segmento da malha para $WOB = 120$ kN, com os pares de valores para Kp e Ki com Kp de 400 a 1000N.m.s e Ki de 0 a 350N.m.

Foram marcados, em amarelo, 8 pontos, escolhidos visando exemplificar o comportamento para as velocidades da broca e da mesa em relação a diferentes desvios J_I . O número entre parênteses sobrescrito em cada valor de desvio do ponto escolhido serve para a identificação deste. O desvio marcado em azul corresponde ao ponto ótimo da malha considerada.

Foram escolhidos pontos de valores diferentes, $J_I = 10, 14, 17, 22, 26, 33, 39, 45$ e 69. Os gráficos das velocidades da mesa e da broca no tempo para estes valores de desvio são apresentados na figura 39.

Tabela 10 - Planilha de desvios J_I para pares de K_p (N.m.s) e K_i (N.m) obtidos com Controle PI e WOB igual a 120kN.

		K_i (N.m)														
		0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
K_p (N.m.s)	400	100	32	22	20	21	24	40	66	73	76	77	79	82	83	85
	425	100	30	20	19	19	20	26	62	67	73	75	78	80	82	85
	450	100	29	19	17	17	18	21	33 ⁽²⁾	62	64	72	77	79	82	84
	475	100	27	18	16	16	15	18	26	40	62	68	74	78	81	81
	500	99	26	17	15	15	15	16	19	27	61	64	71	77	79	81
	525	99	25	17	14	14	14	15	16	20	31	63	67	73	78	80
	550	99	25	15	14	13	13	14	14 ⁽³⁾	16	21	42	65	70	78	80
	575	99	25	16	13	12	12	12	13	14	18	26	65	70	73	80
	600	99	25	15	13	12	12	12	12	13	15	21	50	68	72	77
	625	99	26	16	13	11	12	11	11	12	14	18	33	68	71	76
	650	99	26	15	12	12	11	10	10	11	13	17	27	69	71	75
	675	99	30	16	13	12	10	10	10	11	12	15	23	67	70	72
	700	99	32	17 ⁽¹⁾	13	12	11	10	10	10	12	15	22 ⁽⁴⁾	45 ⁽⁵⁾	69 ⁽⁶⁾	72
	725	99	48	19	14	12	11	11	11	11	12	15	22	68	70	71
	750	99	53	21	16	13	12	11	11	11	13	15	23	68	69	70
	775	99	61	23	18	13	13	13	12	13	14	17	26	68	70	71
	800	99	63	35	20	16	14	14	14	14	15	20	26	69	71	72
	825	99	64	58	25	19	17	16	16	17	18	24	47	68	71	71
	850	99	64	64	35	25	21	20	20	21	24	31	68	69	71	72
	875	99	64	65	65	35	29	26	26 ⁽⁷⁾	28	35	66	68	69	71	72
	900	98	64	66	67	66	52	37	39 ⁽⁸⁾	42	66	67	68	70	71	73
	925	88	64	67	68	68	68	68	68	66	68	69	70	71	72	73
	950	83	64	67	68	69	68	68	69	68	68	69	70	71	72	73
	975	79	65	68	69	69	69	69	70	70	69	69	71	71	72	73
	1000	75	65	68	69	70	70	70	70	70	70	70	71	72	73	73

Figura 39 – Velocidades da broca e da mesa no intervalo de tempo de 0 a 100s para diferentes valores de desvio J_I com Controlador PI com WOB constante e igual a 120kN.

De acordo com a figura 39, para valores de desvio menores do que 25, o tempo de acomodação das velocidades da broca e da mesa em relação à velocidade de referência é menor do que 100s. Para valores de desvio maiores do que 30, em (2) e (8), torna-se mais difícil de as velocidades serem menos oscilantes em torno da referência, possuindo um tempo de acomodação maior do que 100s.

Para $J_I = 69$, encontra-se o caso mais crítico, em que as velocidades da mesa e da broca se mantêm oscilantes, com alta frequência de stick-slip ($\sim 10\text{Hz}$), embora com amplitudes diferentes.

Para valores de iguais e acima de $J_I = 26$, apesar deste valor ser menor do que 30, não há acomodação completa à velocidade de referência, ainda permitindo oscilações às velocidades no período de tempo considerado. Percebeu-se que, para valores próximos de desvio, quanto maior o K_p , maior é a tendência de as velocidades manterem oscilações em torno da referência, ainda que de pequenas amplitudes.

Mas para valores superiores a 30, com $J_I = 39$, o caso apresenta-se menos favorável à convergir para a velocidade de referência, apresentando oscilações mais acentuadas.

▪ **Curvas para WOB = 140kN**

Figura 40 - Desvio médio da velocidade angular da broca (J_I), para K_p de 0 a 800N.m.s, a cada 25N.m.s e K_i de 0 a 250N.m, a cada 25N.m, com controlador PI e WOB constante igual a 140kN. Em 3 (três) dimensões (a); em 2 (duas) dimensões (curvas de nível) (b).

Encontraram-se ainda curvas ainda regulares para os desvios J_I , em área mais restrita, em relação a menores pesos na broca, para este valor de WOB igual a 140kN, conforme a figura 40. No intervalo de valores para K_p e K_i , com K_p de 350 a 700N.m.s e K_i de 10 a 200N.m, encontram-se curvas regulares de $J_I = 20$ até 70. Não há desvios J_I menores do que 10, pois a curva para $J_I = 10$ é inexistente.

A redução de área para as curvas de $J_I = 20$ a 60, que praticamente é equivalente área delimitada pelas curvas de $J_I = 20$ a 70, em comparação ao peso na broca de 120kN, é de 68%, enquanto que para a área de menor desvio, $J_I = 20$, houve redução, em termos aproximados, de 94%, sendo os limites para Kp e Ki dessa área, Kp de 580 a 700N.m.s e Ki de 110 a 180N.m.

A malha adotada para a representação gráfica, A_4 , é apresentada na tabela 11, sendo B_4 um refinamento de A_4 .

Tabela 11 - Descrição das malhas de otimização com os valores de Kp e Ki e pontos ótimos com respectivos desvios relativos (J_I), obtidas com Controle PI e WOB igual a 140kN.

Malha		De	A	Delta	Ponto ótimo	Desvio do Ponto Ótimo
A_4	Kp	0	800	25	650	14.99
	Ki	0	250	25	150	
B_4	Kp	350	750	10	650	14.99
	Ki	0	250	10	150	

Na tabela 12, encontra-se descrito um trecho da malha A_4 , e, neste trecho, foram escolhidos 8 pontos (destacados na cor amarela) além do ponto ótimo (em azul), representados por pares de valores de Kp e Ki , cujos índices encontram-se sobrescritos ao valor do desvio, para a visualização do comportamento das velocidades da mesa e da broca no tempo relativamente ao desvio J_I considerado.

Tabela 12 - Planilha de desvios J_I para pares de Kp (N.m.s) e Ki (N.m) obtidos com Controle PI e WOB igual a 140kN.

		Ki (N.m)										
		0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
Kp (N.m.s)	400	100	51	41	70	82	85	87	89	88	89	90
	425	100	48	35	58	78	82	84	86	86	89	91
	450	100	45	32	31	70	80	82	82	86	87	91
	475	100	44	30	27	50	72	78	80	84	87	90
	500	100	42	29	24	24	65	70	76	80	86	89
	525	100	40	29	23	23	61	65	73	78	81	86
	550	100	44	28	22	21	28	61 ⁽²⁾	68	76	81	86
	575	100	47	29	23	21	22	32 ⁽³⁾	65	71	81	85
	600	100	64	31	24	21	19	18	26	72	81	86
	625	99	74	38 ⁽¹⁾	27	22	18	17	19	73	81	84
	650	99	75	53 ⁽⁸⁾	30	23 ⁽⁶⁾	19	15	18	73 ⁽⁴⁾	79	85
	675	99	74	71	43 ⁽⁷⁾	29	22	19	20	73	77	85
	700	99	75	73	70	45	32	26 ⁽⁵⁾	35	74	81	84
	725	99	75	74	73	70	69	71	73	74	78	85
	750	99	74	74	74	73	72	73	75	75	79	84
	775	99	75	75	74	74	73	74	74	77	79	84
	800	99	75	75	75	75	74	75	76	77	80	85

Os gráficos relativos a cada ponto destacado na tabela 12 são apresentados na figura 41. Pode-se notar, que para valores de J_I maiores do que 38, as velocidades apresentam oscilações acentuadas e não convergem para a velocidade de referência. Enquanto que, para $J_I = 32$, pode-se notar a acomodação em torno da referência no intervalo de 0 a 100s.

Figura 41 – Velocidades da broca e da mesa no intervalo de tempo de 0 a 100s para diferentes valores de desvio J_I com Controlador PI com WOB constante e igual a 140kN.

Para $J_I = 23, 26, 32$, de acordo com a figura 41, pode-se observar que os comportamentos não são de todo previsíveis apenas analisando-se os valores de desvios isoladamente, pois para $J_I = 32$ ocorre uma melhor adequação das velocidades da mesa e da broca à de referência, apesar das maiores oscilações em relação aos gráficos de $J_I = 23$ e $J_I = 26$.

Pode-se dizer apenas que para valores acima de determinado valor de J_I , no caso para $J_I = 38$, não é mais possível encontrar a convergência à velocidade de referência, e o tempo de acomodação, se houver, é maior do que 100s.

▪ **Curvas para $WOB = 160\text{kN}$**

Figura 42 - Desvio médio da velocidade angular da broca (J_1), para K_p de 500 a 680N.m.s, a cada 10N.m.s e K_i de 20 a 180N.m, a cada 10N.m, com controlador PI e WOB constante igual a 160kN. Em 3 (três) dimensões (a); em 2 (duas) dimensões (curvas de nível) (b).

Para $WOB = 160\text{kN}$, reiterando a tendência já observada de diminuição de área de abrangência das curvas de desvio, não foram encontradas faixas regulares do comportamento das curvas de desvio. Foram encontradas em dois lugares diferentes, de acordo com a figura 42, curvas em região demasiado restrita. Não foram encontradas curvas para os desvios menores do que 30, indicando o colapso destas regiões, em comparação aos resultados obtidos para menores pesos na broca.

As malhas adotadas, A_5 , B_5 e C_5 , são apresentadas na tabela 13. Para a malha A_5 , não foi possível encontrar nenhum par de valores de K_p e K_i que propiciassem uma relativa

convergência das velocidades à velocidade de referência. Para a malha B₅, obtiveram-se regiões extremamente estreitas, em dois lugares diferentes, uma em torno de K_i igual a 60N.m e outra para valores próximos de K_i igual a 130N.m.

Tabela 13 - Descrição das malhas de otimização com os valores de K_p e K_i e pontos ótimos com respectivos desvios relativos (J_I), obtidas com Controle PI e WOB igual a 160kN.

Malha		De	A	Delta	Ponto ótimo	Desvio do Ponto Ótimo
A ₅	K_p	350	800	25	625	52.78
	K_i	0	250	25	125	
B ₅	K_p	450	700	10	530	42.94
	K_i	0	150	10	60	
C ₅	K_p	500	550	2	512	35.39
	K_i	50	80	1	63	

A figura 43 apresenta o refinamento da malha A₅. Selecionou-se um retângulo, como mostrado em (a), para ser ampliado, e que é apresentado em (b).

Figura 43 – Malhas de parametrização em (a) e (b) refinamento de (a), de valores K_p e K_i com Controle PI e $WOB = 160kN$.

Mesmo após o 3º. Refinamento, apresentado na tabela 13, para malha C₅, da qual foi obtido o ponto ótimo para este peso na broca, não foi encontrada uma região adequada de trabalho, tratando-se apenas de valores pontuais de K_p e K_i que propiciam menor desvio.

O ponto ótimo obtido para esta região foi o par $K_p = 512$, $K_i = 63$, com desvio $J_I = 35$. Mas, para pequenas mudanças nos valores de K_p e K_i , como se trata de um valor de desvio crítico, em analogia de comportamento ao equilíbrio instável, com pequenas possíveis variações de K_p e K_i , o desvio J_I apresenta mudanças acentuadas, dificultando ou mesmo impossibilitando encontrarem-se respostas com o tempo de acomodação até 100s e que não apresentem elevadas e constantes oscilações na velocidade.

3.3.2 Pontos ótimos encontrados para PI com *WOB* constante

Neste tópico apresentam-se, na figura 44, os gráficos das velocidades da mesa e da broca dos pontos ótimos encontrados para os pesos na broca 80, 100, 140 e 160kN.

Para os pesos na broca iguais a 80 e 100kN, em (a) e (b), respectivamente, os tempos de acomodação são próximos de 25 segundos, sendo que as velocidades após este tempo não apresentam mais oscilações, permanecendo constantes e iguais à velocidade de referência, 100rpm.

Figura 44 - Velocidades da broca e da mesa para os pontos ótimos encontrados para valores de K_p e K_i e com Controle PI e *WOB* igual a 80kN.

Conforme o aumento do peso na broca, os desvios J_1 para os pontos ótimos também aumentam, e o período inicial em que a broca fica em *stick-slip* também aumenta, sendo este tempo o necessário para fazer a broca iniciar o movimento de rotação. Para os pesos na broca iguais a 140 e 160kN, em (c) e (d), respectivamente, as velocidades atingem mais de 200rpm, duas vezes a velocidade de referência.

Para $WOB = 140\text{kN}$, o tempo de acomodação é próximo de 60s, permanecendo, após este valor de tempo, as velocidades constantes e iguais à velocidade atingida, de referência; enquanto que, em (d), para $WOB = 160\text{kN}$, as velocidades da mesa e da broca, a partir de 80s, estão sujeitas a pequenas oscilações (aproximadamente 15% de amplitude), em torno de 100rpm.

3.3.3 Comparação das curvas de nível para diferentes pesos na broca obtidas por PI com WOB constante

Para se obter uma comparação gráfica do comportamento das curvas de nível para o desvio J_I , considerando-se intervalos iguais de K_p e K_i , foram obtidas as curvas de nível para desvios J_I iguais a 10, 20, 30, 40, 50, para os pesos na broca considerados (80, 100, 120, 140 e 160kN). Para todos os casos foi considerado o mesmo intervalo de K_p e K_i , com variação de 50N.m.s para K_p e 50N.m para K_i . Os resultados para esta comparação são apresentados na figura 45.

Figura 45 - Quadro comparativo das curvas de nível obtidas por Controle PI para diferentes valores de peso na broca.

A figura 45 apresenta os gráficos para os pesos na broca iguais a 80, 100, 120 e 140kN, sendo que, para $WOB = 160\text{kN}$, não foram encontradas curvas para a malha considerada, resultando em um gráfico vazio, e por isso, não apresentado. Por este quadro comparativo, pode-se ver a diminuição das regiões delimitadas pelas curvas referentes aos desvios J_I com o aumento do WOB . Visualiza-se a diminuição da curva de $J_I = 10$, de (a) para (b) e de (b) para (c), sendo que, em (d), a curva para este valor de desvio já não existe.

Em (a), referente ao peso na broca de 80kN, as curvas apresentam-se abertas para esta região delimitada pelo intervalo de Kp e Ki , com Kp de 0 a 1000N.m.s e Ki de 0 a 500N.m. Estas curvas tornam-se mais fechadas à medida em que se aumenta o valor do peso na broca.

Tabela 14 – Quadro-resumo para os resultados das malhas paramétricas obtidas para cada WOB com Controle PI e WOB constante e $\omega_{ref} = 100\text{rpm}$.

Peso na broca (kN)	Observações e Conclusões
80	As regiões que propiciam menor desvio apresentam-se delimitadas pelas curvas na cor azul, e pontos interiores a estas regiões (de desvios menores do que 10 e 20) propiciam minimização ou eliminação do problema de oscilações acentuadas e do <i>stick-slip</i> . Tais curvas ficam interiores ao intervalo com Kp de 150 a 2200N.m.s de Ki de 100 a 900N.m.
100	As curvas de desvio J_I de 10 até 60 apresentam-se em faixas regulares, e houve uma redução de 84% em relação à área que delimita os mesmos desvios para 80kN. Para as curvas de menor desvio, que propiciam as melhores condições de operação, com J_I igual a 10 e 20, houve uma redução de área de abrangência de 79%.
120	Encontraram-se curvas regulares para os desvios J_I até 60, porém em limites mais estreitos, comparativamente a menores pesos na broca. A região que delimita as curvas de desvio de 10 a 60, em relação ao aumento de 20% do WOB (de 100 para 120kN), apresentou uma redução de área de 71%. A região formada para a curva de desvio $J_I = 20$, apresentou diminuição de área de 67% em relação à obtida para 100kN e 93% em relação a 80kN.
140	Encontraram-se ainda curvas regulares para os desvios J_I , em área mais restrita, comparativamente às obtidas com menores pesos na broca. Para Kp e Ki , com Kp de 350 a 700N.m.s e Ki de 10 a 200N.m, encontram-se curvas regulares de $J_I = 20$ até 70. Não há desvios J_I menores do que 10. A redução de área para as curvas de J_I de 20 a 60 foi de 68%, enquanto que para a área de menor desvio, $J_I = 20$, houve redução, em termos aproximados, de 94%, em relação à obtida com $WOB = 120\text{kN}$.
160	Não foram encontradas faixas regulares do comportamento das curvas de desvio, nem curvas para os desvios menores do que 30, indicando o colapso destas regiões, em comparação aos resultados obtidos para menores pesos na broca. Mesmo após os refinamentos nas malhas, não foi encontrada uma região adequada de trabalho, apenas de valores pontuais de Kp e Ki que propiciam menor desvio.

3.3.4 Efeitos da variação da velocidade de referência

A seguir, disponibilizam-se na figura 46 as curvas de nível referentes a pares de peso na broca e velocidade de referência para a coluna (WOB e ω_{ref}), e na tabela 15, as principais observações a respeito dos resultados obtidos.

Figura 46 – Quadro comparativo para diferentes velocidades de referência (80, 100, 120rpm) e pesos na broca (80, 100, 120, 140 e 160kN), em curvas de nível para o desvio J_1 (0 a 100) obtidas por Controle PI, para valores de K_p de 350 a 800N.m.s e K_i de 0 a 250N.m.

Tabela 15 – Quadro-resumo para as malhas paramétricas obtidas por Controle PI para diferentes pesos na broca e velocidades angulares de referência.

WOB (kN)	Observações e conclusões
100	<p>As regiões de menor desvio J_I, em azul mais escuro, indicando pela escala de cores valores para o desvio de 10 ou 20, aparecem dentro do intervalo de Kp de 400 até 1100N.m.s, e Ki de 50 a 400N.m, aproximadamente. Estas mesmas regiões se restringem a Kp de 300 a 1200N.m.s e Ki de 100 a 450N.m, um aumento de aproximadamente 30%, para efeitos comparativos em termos de área definida pelo intervalo. Houve também ampliação das áreas delimitadas pelas regiões de desvios maiores que 20 até 60.</p> <p>Para os desvios J_I nas curvas de 10 e 20, em azul, considerando-se as regiões pelas curvas delimitadas, estas se expandem para maior intervalo, com Kp de 250 a 1400N.m.s e Ki de 50 a 550N.m. Em termos comparativos, houve um aumento dessas áreas de menor desvio de 80% em relação às obtidas para 100rpm e 135% em relação às obtidas para 80rpm.</p>
120	<p>Para 80rpm, a região em azul, que representa o menor desvio, $J_I = 20$, fica delimitada entre Kp de 500 até 700N.m.s e Ki de 50 até 200N.m, enquanto que, para 100rpm, para o mesmo valor de J_I a região fica delimitada por Kp entre 400 e 800N.m.s e Ki de 50 a 300N.m.</p> <p>Observa-se surgir também uma região pequena de desvio menor, relativa a $J_I = 10$. Esta região de menor desvio expande-se com $\omega_{ref} = 120rpm$, em um tamanho maior do que a região de desvio $J_I = 20$ para 80 rpm.</p> <p>A região de $J_I = 20$ amplia-se para os limites: Kp de 380 a 950N.m.s e Ki de 20 a 350N.m, aproximadamente, apresentando um aumento de seis vezes relativamente à mesma área para 80rpm.</p>
140	<p>Para 80rpm, para quaisquer pares de valores de Kp e Ki na faixa considerada ocorrem oscilações acentuadas e não há acomodação da velocidade para o intervalo de tempo de 0 a 100s. A pequena região de desvio J_I igual ou menor que 40, formada em torno dos valores de $Kp = 600N.m.s$ e $Ki = 130N.m$, é a que propicia os menores valores de J_I.</p> <p>O quadro de 100rpm apresenta regiões bem delineadas, a partir de J_I de 70 (em laranja) até 20 (azul mais escuro). Esta região, que para J_I corresponde a valores menores do que 20, para 120rpm, estende-se, para os limites de Kp de 400 a 800N.m.s e Ki de 50 a 220N.m, aumentando em mais de 13 vezes em relação à obtida para a velocidade de referência de 100rpm.</p>
160	<p>Para este peso na broca, com relação às velocidades de referência de 80 e 100rpm e esta malha de valores de Kp e Ki, não aparecem regiões com desvios J_I menores do que 50 (em verde), a não ser pontualmente, para 100rpm, que pode ser refinada para regiões menores.</p> <p>Para os termos considerados, o tempo de acomodação é geralmente maior do que 100s, ou as velocidades na mesa e na broca apenas oscilam em torno da respectiva velocidade de referência, sem convergir, com exceção de casos mais pontuais, como o par ótimo encontrado para 100rpm, com $Kp = 512$ e $Ki = 63$.</p> <p>Com a velocidade de referência igual a 120rpm, no entanto, houve a formação de uma região para desvios J_I menores do que 20, em azul, delimitada por Kp de 620 a 670N.m.s e Ki de 120 a 170N.m, o que permite afirmar que o tempo de acomodação é menor do que 100s, para pontos interiores a esta região, e as grandes oscilações e o <i>stick-slip</i> são minimizados.</p>

Os resultados observados são favoráveis à conclusão de que o aumento da velocidade de referência é propício à criação ou aumento de regiões paramétricas de menor desvio. Este aumento, no entanto, apresenta o inconveniente de que, quando se aumenta a

velocidade, pode-se correr o risco de aumentar outros tipos de vibrações a que a coluna de perfuração possa estar sujeita.

3.4 Resultados obtidos para PI com WOB variável e comparação entre as duas técnicas de Controle

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos com o Controle Proporcional Integrativo com peso na broca variável. No item 3.4.1, tratam-se da análise pontual para diferentes pares de valores de K_p e K_i (pontos), com melhor valor de K_w obtido para cada ponto, considerando-se o critério de desvio J_I . Obtém-se gráficos de alguns pontos e analisam-se a alteração no desvio J_I para o peso na broca constante e peso na broca variável.

Apresentam-se gráficos das velocidades da mesa e da broca no tempo e peso na broca no tempo para alguns valores dos pares K_p e K_i adotados, e a comparação dos desvios obtidos.

3.4.1 Análise pontual para estudo comparativo da influência da variação do peso na broca

Foram escolhidos quatro pares de valores para K_p e K_i com diferentes desvios, além do ponto ótimo para cada WOB. O critério para escolha destes pontos foi utilizarem-se os pontos de um retângulo imaginário para os pares de valores de K_p e K_i , de menor tamanho possível, situando o ponto ótimo obtido para a malha paramétrica de K_p e K_i próximo ao centro deste retângulo, e cujos vértices, não necessariamente todos, apresentassem desvios J_I maiores do que 30.

Este retângulo imaginário construído visa simbolizar uma fronteira entre baixas e altas oscilações nas velocidades da broca e da mesa. Os pontos (1), (2), (3), (4) e os pontos ótimos são apresentados na tabela 16, sendo que para cada peso na broca os pontos atribuídos possuem valores diferentes para K_p e K_i .

Para se avaliar quais os valores de K_w , utilizou-se do mesmo critério para a obtenção das malhas paramétricas de K_p e K_i . Para cada ponto (par de valores de K_p e K_i), fez-se variar K_w para encontrar um valor que proporcionasse o menor desvio médio de velocidade angular (J_I). Os valores de K_w obtidos para cada ponto adotado estão relacionados na tabela 17. Alguns destes valores de K_w superaram aqueles propostos na

tabela 5, porém estes valores de K_w obtidos são para pontos (pares de K_p e K_i), e não referentes a malhas paramétricas (conjunto de pontos).

Tabela 16 – Pares de parâmetros K_p e K_i adotados para avaliar o desempenho das duas formas de Controle propostas.

WOB(kN)		Parâmetros de controle proporcional integrativo		Desvio J_I
		K_p	K_i	
80	(1)	3000	50	18
	(2)	3000	450	51
	(3)	200	50	44
	(4)	200	450	40
	P.O.	700	175	4
100	(1)	350	100	15
	(2)	350	300	62
	(3)	1350	100	61
	(4)	1350	300	46
	P.O.	675	125	6
120	(1)	525	75	14
	(2)	525	250	63
	(3)	875	75	65
	(4)	875	250	66
	P.O.	700	175	10
140	(1)	575	125	22
	(2)	575	175	65
	(3)	725	125	69
	(4)	725	175	73
	P.O.	650	150	16
160	(1)	500	50	71
	(2)	500	70	83
	(3)	550	50	59
	(4)	550	70	77
	P.O.	512	63	35

Figura 47 - Velocidades na broca e na mesa em função do tempo para o ponto 4 adotado para $WOB = 80\text{kN}$ ($K_p = 200\text{N.m.s}$, $K_i = 450\text{N.m}$); (a) Controle PI com peso na broca constante; (b) Controle PI com peso na broca variável ($WOB_0 = 80\text{kN}$, $K_w = 3.1$); (c) Variação do peso na broca em função do tempo para estes valores de WOB_0 e K_w .

São apresentados, nas figuras 47, 48, 49 e 50, alguns gráficos dos pontos adotados, os que foram considerados mais importantes para visualizar a influência que possa ter a implementação do peso na broca variável. Os desvios médios de velocidade (J_I) de cada ponto, no entanto, foram anotados e constam nas tabelas 16 e 17.

A figura 47 apresenta, em (a), um comportamento oscilatório uniforme para as velocidades da broca e da mesa. Com a aplicação do peso na broca variável, em (b), nota-se uma diminuição da amplitude das oscilações, com o detalhe de que o valor de K_w possa ter excitado algum dos modos de vibração da coluna de perfuração. O tempo de acomodação com o peso na broca variável é de aproximadamente 70s, sendo que as velocidades mantêm-se iguais à velocidade de referência.

Figura 48 - Velocidades na broca e na mesa em função do tempo para o ponto 2 adotado para $WOB = 100\text{kN}$ ($K_p = 350\text{N.m.s}$, $K_i = 300\text{N.m}$); (a) Controle PI com peso na broca constante; (b) Controle PI com peso na broca variável ($WOB_0 = 100\text{kN}$, $K_w = 3.7$); (c) Variação do peso na broca em função do tempo para estes valores de WOB_0 e K_w .

Na figura 48 encontra-se um caso semelhante ao da figura 47. A influência da variação do WOB se mostrou evidente e positiva, no sentido de provocar a diminuição das oscilações, obtendo-se um tempo de acomodação menor do que 50s, em detrimento ao comportamento oscilatório da velocidade detectado em (a).

Figura 49 - Velocidades na broca e na mesa em função do tempo para o ponto 2 adotado para $WOB = 120\text{kN}$ ($K_p = 525\text{N.m.s}$, $K_i = 250\text{N.m}$); (a) Controle PI com peso na broca constante; (b) Controle PI com peso na broca variável ($WOB_0 = 120\text{kN}$, $K_w = 3.9$); (c) Variação do peso na broca em função do tempo para estes valores de WOB_0 e K_w .

Para o ponto (2) adotado para o peso na broca 120kN , cujos gráficos encontram-se expressos na figura 49, houve melhoras significativas com a aplicação do peso na broca variável. Um valor para K_w igual a 3.9, transforma uma situação de grandes oscilações (duas vezes a velocidade de referência) e de stick-slip em outra situação em que as velocidades igualam-se a partir de 40s, mantendo-se constantes até 100s.

Figura 50 - Velocidades na broca e na mesa em função do tempo para o ponto 2 adotado para $WOB = 140\text{kN}$ ($K_p = 575\text{N.m.s}$, $K_i = 175\text{N.m}$); (a) Controle PI com peso na broca constante; (b) Controle PI com peso na broca variável ($WOB_0 = 140\text{kN}$, $K_w = 1.4$); (c) Variação do peso na broca em função do tempo para estes valores de WOB_0 e K_w .

A figura 50 em (a) apresentava severas condições de *stick-slip*, com velocidades de amplitude maiores que 2 vezes a velocidade de referência, e foi corrigida com a variação do *WOB* para $K_w = 1.4$, alcançando e mantendo-se igual à velocidade de referência de 100rpm a partir de 40s.

Para comparação dos resultados de todos os desvios pontos adotados, considerando-se as duas técnicas de Controle, PI com *WOB* constante e PI com *WOB* variável, os mesmos são apresentados na tabela 17, para os pontos (1), (2), (3) e (4) bem como dos pontos ótimos (P.O.), sendo estes diferentes para cada peso na broca.

Tabela 17 – Relação comparativa dos desvios J_I obtidos para as duas técnicas de controle propostas para os pares de valores dos parâmetros K_p e K_i .

WOB (kN)		Desvio J_I		K_w	Redução do desvio J_I em
		PI	PI com <i>WOB</i> variável		
80	(1)	42.83	17.7	13.7	59%
	(2)	39.24	22.59	13.5	42%
	(3)	18.02	13.07	1	27%
	(4)	50.15	8.62	3.1	83%
	P.O.	3.78	3.68	0.5	3%
100	(1)	15.26	10.07	1.8	34%
	(2)	62.21	7.08	3.7	89%
	(3)	62.95	58.17	3.5	8%
	(4)	44.79	32.00	2.7	29%
	P.O.	5.84	5.74	0.5	2%
120	(1)	14.21	10.92	1.9	23%
	(2)	63.49	7.15	3.9	89%
	(3)	65.38	63.99	2.7	2%
	(4)	42.72	26.08	1.6	39%
	P.O.	9.73	8.21	1.4	16%
140	(1)	21.87	18.31	0.5	16%
	(2)	64.26	15.06	1.4	77%
	(3)	68.78	68.09	2.5	1%
	(4)	72.99	68.37	2.7	6%
	P.O.	16.12	15.78	0.2	2%
160	(1)	69.88	57.69	0.4	17%
	(2)	83.48	48.13	0.6	42%
	(3)	59.79	59.79	0	0%
	(4)	76.55	59.65	0.4	22%
	P.O.	35.39	35.39	0	0%

Analisando-se tais resultados apresentados na tabela 17, observou-se que a implementação do peso na broca variável provocou redução do desvio médio de velocidade angular (J_I) em 92% dos casos tratados.

Não foi encontrado valor de K_w maior que 0.01 que propiciasse alteração no desvio nos restantes 8%. Dos 16 casos, entre os 25 pontos considerados, pela implementação do peso na broca variável foi possível a eliminação das oscilações/*stick-slip* em sete pontos, propiciando um sucesso efetivo de 43%, em relação a esta implementação e o modo como foram obtidos tais pontos.

Na figura 51, apresentam-se as curvas dos desvios dos pontos ótimos obtidos com e sem a variação do peso na broca, para efeitos de comparação. Observam-se que, com o aumento do *WOB*, os desvios para os pontos ótimos aumentam, e tendencialmente, para determinado valor alto de peso na broca, já não será possível obter-se pontos de desvios J_I relativamente baixos, em que as velocidades da mesa e da broca aproximem-se da velocidade de referência, diminuindo a amplitude das oscilações.

Verifica-se, para as curvas em vermelho (PI) e azul (PI com variação do *WOB*), na figura 51, uma similaridade entre as mesmas, tendo os desvios para o PI com variação do *WOB* um pouco menores do que os obtidos com PI para *WOB* constante.

Figura 51 - Desvio médio da velocidade angular do ponto ótimo (J_I) em relação ao *WOB*(kN), em vermelho para PI, em azul para PI com *WOB* variável.

Consequentemente, a variação do peso na broca, a partir de determinado valor de peso na broca inicial, por mais promova a diminuição do desvio pontual, não provoca o surgimento de pontos ótimos melhores do que os obtidos por controle PI, considerando-se o peso na broca constante.

Deve-se salientar que o ponto ótimo é o par de valores para K_p e K_i que propiciam o menor desvio J_I , mas à medida que o peso na broca é aumentado, este desvio também aumenta, e pode-se ter um ponto ótimo que não apresente efetiva aproximação à velocidade de referência, apresentando, ao contrário, elevadas oscilações e alta frequência de *stick-slip*.

Baseado nestas observações feitas sobre o comportamento das curvas de desvio na figura 51, percebe-se que, adequando-se os parâmetros de Kp e Ki para os valores de menor desvio, a implementação da variação do peso na broca pouca influência exerce na diminuição do desvio médio da velocidade angular, J_I .

3.4.2 Análise em curvas de nível para estudo comparativo da influência da variação do peso na broca

Para $WOB = 80\text{kN}$, com $Kw = 1$, foram obtidas falhas na obtenção das curvas de nível para o desvio J_I relacionadas a este valor de Kw , mostrando que Kw precisava ser menor do que o planejado inicialmente.

Adotou-se $Kw = 0.5$, e obtiveram-se as curvas de nível da malha paramétrica de Kp e Ki para este peso na broca, que está apresentada na figura 52, em (b). Em (a), está reproduzida novamente, para efeitos de comparação, as curvas de nível obtidas para o mesmo peso na broca, constante ($Kw = 0$).

Figura 52 - Curvas de nível para Kp (0 a 4000N.m.s, com passo 100N.m.s) e Ki (0 a 1600N.m, com passo 50N.m), com Controle PI e (a) $WOB = 80\text{kN}$. (b) WOB variável com $WOB_0 = 80\text{kN}$ e $Kw = 0.5$.

Visualiza-se, na figura 52, para 80kN, que a variação do peso na broca, em (b), amplia todas as curvas de nível para o desvio J_I , aumentando a área de abrangência para todas as curvas, provocando a diminuição de forma geral do desvio neste limite dos parâmetros Kp e Ki , com Kp de 0 a 4000N.m.s e Ki de 0 a 1600N.m.

Figura 53 - Curvas de nível para K_p (0 a 1500N.m.s, com passo 50N.m.s) e K_i (0 a 750N.m, com passo 50N.m) com Controle PI e (a) $WOB = 100\text{kN}$. (b) WOB variável, com $WOB_0 = 100\text{kN}$ e $K_w = 1.2$.

A figura 53 apresenta as curvas de nível para 100kN, mantendo-se este peso na broca, em (a), e variando-o linearmente, a partir deste valor, em (b), com o fator de variação linear $K_w = 1.2$. Mudanças significativas foram encontradas na configuração das curvas.

Em (b), a curva de menor desvio $J_I = 10$, amplia-se consideravelmente, alongando-se para a direita, no sentido crescente dos valores de K_i , e também para cima e para baixo, resultando em uma maior faixa de valores de K_p e K_i para pontos interiores à curva. Isso equivale a dizer a implementação do peso na broca variável com este valor de K_w , provocou a redução dos desvios para certo número de pontos, tornando pontos antes exteriores em interiores à curva de $J_I = 10$.

Para outras curvas de desvios $J_I = 10$ até 60 (do azul ao amarelo), ainda na figura 53, é possível visualizar uma ampliação das regiões delimitadas pelas mesmas; para $J_I = 60$ (na cor amarela), o limite para K_i se estende, de 500N.m em (a) para 600N.m em (b), bem como as curvas para 70 e 80 também são ampliadas.

Figura 54 - Curvas de nível para K_p (0 a 1100N.m.s, com passo 25N.m.s) e K_i (0 a 450N.m, com passo 25N.m) com Controle PI e (a) $WOB = 120\text{kN}$. (b) WOB variável com $WOB_0 = 120\text{kN}$ e $K_w = 1.4$.

Para o peso na broca de 120kN, foram expressas, na figura 54, as curvas de nível para o desvio J_I obtidas para o peso na broca constante e para o peso na broca variável, a partir deste valor, em (b), com Controle PI. De (a) para (b) houve uma ampliação da região delimitada pela curva de desvio $J_I = 10$, extremamente reduzida em (a), e apresentando contornos bem definidos em (b), nos limites para K_p e K_i com K_p de 500 a 750N.m.s e K_i de 100 a 300N.m.

Houve, também, de (a) para (b) na figura 54, um relativo aumento das áreas de abrangência de todas as curvas. A curva em amarelo, que representa $J_I = 60$, tornou-se mais regular, suave, em (b), estendendo-se, bem como todo o conjunto de curvas para desvios menores em seu interior, de $K_i = 300$ N.m para $K_i = 400$ N.m, e as curvas de nível em laranja ($J_I = 70$), alongaram-se de $K_i = 350$ N.m para $K_i = 450$ N.m, aproximadamente.

Figura 55 - Curvas de nível K_p (0 a 800N.m.s, com passo 25N.m.s) e K_i (0 a 250N.m, com passo 25N.m) com Controle PI e (a) $WOB = 140$ kN. (b) WOB variável com $WOB_0 = 140$ kN e $K_w = 1.7$.

Para avaliar por comparação de efeitos a influência da variação do peso na broca para $WOB = 140$ kN, apresentam-se, na figura 55, as curvas de nível para o desvio médio da velocidade angular (J_I), obtidas com Controle PI e peso na broca constante, em (a) e peso na broca variável, a partir de $WOB_0 = 140$ kN e $K_w = 1.7$, em (b).

A variação linear do peso na broca proporcionou um aumento relativo da área formada pela curva $J_I = 20$, de (a) para (b), na figura 55. Proporcionou, no entanto, uma diminuição da área para desvio $J_I = 30$, deslocando-a, ainda, para a direita, para valores crescentes de K_i , aumentando-se a frequência de oscilações das velocidades. Já a curva de desvio $J_I = 70$ (em laranja) dilatou-se consideravelmente, de (a) para (b).

Figura 56 - Curvas de nível K_p (350 a 800N.m.s, com passo 25N.m.s) e K_i (0 a 250N.m, com passo 25N.m) com Controle PI e (a) $WOB = 160\text{kN}$. (b) WOB variável com $WOB_0 = 160\text{kN}$ e $K_w = 2$.

Para $WOB = 160\text{kN}$, nota-se, na figura 56, que a variação do peso na broca conseguiu diminuir os desvios de velocidade para a malha considerada, e fez aparecer uma pequenina região em azul mais claro, representando desvios menores do que 30.

Na primeira figura, em (a), a malha considerada não é suficiente para fazer aparecer regiões de desvio menores, notificando que o ponto ótimo para esta malha, de desvio $J_I = 35$, é para o par $K_p = 512\text{N.m.s}$ e $K_i = 63\text{N.m}$, de cuja região encontra-se circunscrita a outra de desvio 70, identificável apenas após refinamento; o que mostra tratar-se de um caso pontual de relativamente baixo desvio, considerando-se a dificuldade de se encontrar regiões de desvios baixos para este valor de peso na broca.

Verifica-se, em (b), com o surgimento da região em azul claro representado desvios J_I menores do que 30, situada para valores de K_i próximos a 170N.m, que o ponto ótimo foi deslocado para a direita, em relação ao obtido com peso na broca constante.

Por outro lado, a variação do peso na broca diminuiu os desvios em caráter geral para a malha considerada; a região para $J_I = 70$ foi diminuída e deslocada para a direita, enquanto que a curva em amarelo apresentou um aumento considerável. As curvas apresentadas em (b) apresentam-se mais bem delineadas e regulares.

3.4.3 Comparação entre curvas de nível obtidas com Controle PI com WOB variável para diferentes valores de K_w

Figura 57 - Curvas de nível para Controle PI com WOB variável com $WOB_0 = 100\text{kN}$ e (a) $K_w = 0.5$; (b) $K_w = 1.2$.

Observam-se, na figura 57, a ampliação das regiões interiores às curvas de desvio $J_l = 10, 20, 30, 40, 50, 60$ (do azul mais escuro ao amarelo), pois, em (b), as mesmas se estendem para além de K_i maior do que 600N.m , enquanto que, em (a), valores de K_i maiores do que 600N.m ficam exteriores a estas regiões. Para a região de menor desvio (em azul escuro), $J_l = 10$, houve uma extensão da área delimitada pela curva, que estendeu os limites de K_i até valores maiores do que 400N.m .

Figura 58 - Curvas de nível para Controle PI com WOB variável com $WOB_0 = 140\text{kN}$ e (a) $K_w = 0.2$; (b) $K_w = 1.7$.

Para as curvas de menor desvio J_I para $WOB = 140\text{kN}$, no caso, $J_I = 20$, de acordo com a figura 58, houve um deslocamento para a direita de (b) em relação a (a), no sentido crescente de K_i . Estas curvas para $J_I = 20$, em (a), são limitadas por K_p de 570 a 700 N.m.s e K_i de 100 a 180 N.m, enquanto que, em (b), por K_p de 140 a 230 N.m.s e K_i de 520 a 640 N.m, o que representa, de (a) para (b), um aumento relativo de área de abrangência de 4%.

Por outro lado, a curva que representa o desvio $J_I = 40$ (desvios menores do que 40), na cor azul mais claro, tem, de (a) para (b), seus limites um pouco reduzidos. A partir de $K_i = 200\text{N.m}$, em (a), somente há desvios J_I maiores do que 70, enquanto que, em (b),

como todas as curvas sofreram um deslocamento para a direita, há pontos de desvios menores do que 20.

Como todas as curvas estão deslocadas para a direita, de (a) para (b), mesmo que haja um aumento das regiões formadas pelas curvas de desvio J_I , para valores de K_i maiores, outra dificuldade apresenta-se, que é o aumento da frequência das oscilações.

3.4.4 Quadro-resumo dos resultados obtidos para as técnicas de Controle consideradas

Neste tópico, busca-se resumir as principais observações a respeito das duas técnicas de Controle trabalhadas, e para tanto, são apresentadas na tabela 18.

Tabela 18 – Quadro-resumo de análise dos resultados obtidos com Controle PI com WOB constante e Controle PI com WOB variável.

Técnica de Controle	Observações e Conclusões
Controle Proporcional Integrativo com <i>WOB</i> constante	<p>Apresentaram-se regiões bem delineadas de determinado desvio J_I, em formas mais regulares quanto menor o peso na broca. As malhas paramétricas consideradas foram menores conforme o peso na broca, e de cada malha, foi possível, conforme a discretização, encontrar-se um ponto ótimo, ponto de menor desvio para a malha considerada.</p> <p>Aumentando-se o peso na broca, as regiões limitadas pelas curvas de desvio se fecham consideravelmente, e a região de trabalho adequada no sentido de baixas oscilações nas velocidades e ausência ou minimização do fenômeno de <i>stick-slip</i>, torna-se cada vez mais restrita, extinguindo-se a partir de determinado valor de peso na broca; no caso, para 160kN.</p>
Controle Proporcional Integrativo com <i>WOB</i> variável	<p>A implementação da variação do peso na broca apresentou-se como auxiliar do Controle PI, diminuindo pontualmente os desvios obtidos com <i>WOB</i> constante, obtendo-se para tanto, o melhor valor do parâmetro K_w que minimizasse J_I.</p> <p>Foi observado um aumento das regiões de desvio de forma geral, nas malhas consideradas, aumentando as áreas de menor desvio, principalmente quanto menor o peso na broca.</p> <p>Para pesos na broca maiores, provocou, por um lado, o aumento de algumas regiões e a diminuição de outras, ainda também as deslocando para a direita, no sentido de aumento dos valores do parâmetro K_i, o que consequentemente, aumenta a frequência das oscilações das velocidades.</p> <p>Não alterou significativamente os desvios obtidos dos pontos ótimos obtidos com <i>WOB</i> constante.</p>

Conclusões e considerações finais

Na perfuração de poços de petróleo, extensa programação e elaboração de estudos revelaram-se indispensáveis, já que se trata de um processo de alto custo; quanto mais se permita simulações numéricas, para bem considerar o comportamento dinâmico do conjunto durante a perfuração, melhor se compreende e pode se controlar todo o processo.

Observações de campo relatadas na literatura indicam que as colunas de perfuração sofrem severas vibrações, constatadas mais intensas no BHA; estas vibrações são devidas às interações entre a broca e a formação rochosa, e, em segundo lugar, devido ao contato da coluna de perfuração com a parede do poço.

Para a consideração do problema de vibrações torcionais, propôs-se um modelo linear em elementos finitos para a coluna de perfuração. Na extremidade superior desta coluna encontra-se a mesa rotativa, que fomenta o movimento, e, na extremidade inferior, o BHA, conjunto que contém a broca e que estabelece contato com a formação rochosa.

Considerou-se a aproximação da função modeladora do torque na broca a partir do decaimento de uma função regularizada, obtida com dados típicos de um processo de perfuração, apresentado na literatura.

A proposta deste trabalho utilizou-se da hipótese de a coluna de perfuração e seu conjunto serem rígidos axialmente, podendo-se, então, aplicar-se a variação do peso na broca, pois, em outro caso, estaria sujeita a deformações axiais, não consideradas neste trabalho.

Realizou-se uma pré-investigação da influência dos parâmetros de Controle considerados, os parâmetros proporcionais, integrais, do Controle Proporcional Integrativo e do parâmetro para a variação do peso na broca, proporcional à diferença entre a velocidade da mesa e a velocidade angular de referência.

Avaliou-se também a influência do peso na broca na amplitude das oscilações de velocidade. Constatou-se que, ao se aumentar o peso na broca, maiores se tornam as amplitudes de velocidades na mesa e na broca, e, portanto, mais instabilidades a coluna de perfuração pode estar sujeita, aumentando-se as chances de oscilações ocorrências *stick-slip*.

Os critérios de desempenho e segurança propostos para análise apresentaram resultados que, de forma combinada, reduziram a investigação ao critério de desvio médio da velocidade angular, tendo-se em vista que este apresentou regiões de menor desvio bem características. Para baixos valores deste desvio, os outros critérios não exerceram influência significativa.

Foram construídas malhas paramétricas dos parâmetros integral e proporcional, para os desvios médios de velocidade, para os diferentes pesos na broca considerados.

Verificou-se a formação de figuras semelhantes a elipses, que delimitavam regiões em que, em seu interior, os pares desses parâmetros propiciavam determinado desvio médio da velocidade.

Para o modo de controle proporcional integrativo com peso na broca constante, foram observadas regiões bem delineadas de determinado desvio médio da velocidade angular, em formas mais regulares quanto menor o peso na broca. As malhas paramétricas consideradas foram menores conforme o peso na broca, e, de cada malha, foi possível, conforme o refinamento da discretização, encontrar-se um ponto ótimo, ponto este de menor desvio para a malha considerada.

Aumentando-se o peso na broca, as regiões limitadas pelas curvas de desvio reduziam-se em proporcionalidade inversa, e a região de trabalho adequada no sentido de baixas oscilações nas velocidades e ausência ou minimização do fenômeno de *stick-slip*, torna-se cada vez mais restrita, extinguindo-se a partir de determinado valor de peso na broca; no caso, para 160kN.

A variação da velocidade de referência apresentou proporcionalidade com o aumento ou diminuição das áreas de desvio da velocidade obtidas, conforme se aumentava o valor para a referência, respectivamente.

Para o modo de controle proporcional integrativo com peso na broca variável, foi observada uma diminuição pontual dos desvios obtidos com o peso na broca constante, com o valor do ganho K_w que propiciava o menor valor para o desvio médio de velocidade.

Esta implementação com peso na broca variável, ainda, provocou um aumento das regiões de desvio, de forma geral, nas malhas consideradas, propiciando um aumento das áreas de menor desvio, principalmente para menores valores de peso na broca. Para pesos na broca maiores, provocou, por um lado, o aumento de algumas regiões e a diminuição de outras; ainda, também, as deslocando para a direita, no sentido de aumento dos valores do parâmetro integral de controle; o que, conseqüentemente, provoca o aumento da frequência das oscilações das velocidades.

Também a variação do peso na broca não alterou significativamente os desvios obtidos dos pontos ótimos, obtidos com peso na broca constante. A correta escolha dos parâmetros proporcional e integral, portanto, apresentou-se de maior relevância para a técnica de controle, pois, adequando-os incorretamente, a implementação da variação do peso na broca não adquire êxito, por vezes, na diminuição do desvio de velocidade para excelentes condições de operação.

Em relação a trabalhos futuros, em primeiro lugar, poder-se-ia considerar a avaliação de desempenho para outras técnicas de Controle, como por exemplo, o *Soft Torque*, que envolve o conceito de ondas torcionais, e estabelece um fator de multiplicativo de retificação de torque.

Em segundo lugar, em relação às vibrações a que a coluna de perfuração está sujeita, se consideradas as vibrações axiais e laterais, seriam aumentadas as dificuldades na implementação numérica, bem como aumentaria o tempo de simulação. A coluna poderia deixar de ser considerada rígida axialmente, e permitir-se-ia que ela sofresse deslocamentos laterais devidos à flexão.

Um trabalho com uma análise paramétrica mais ampla também pode ser considerado, em terceiro lugar. Encontrar valores adequados de trabalho para um peso na broca inicial e valor do ganho para a variação linear deste valor, conforme a necessidade e

para a velocidade de referência, que também poderia ser considerada variável conforme as circunstâncias pode ser uma das possibilidades.

Poder-ser-ia considerar, também, para trabalhos futuros, a influência do fluido de pressurização que passa entre o canal anular formado entre a coluna de perfuração e as paredes do poço. O modelo, então, tornar-se-ia mais complexo, e, obrigatoriamente, as vibrações laterais deveriam ser consideradas, bem como a influência que exerceriam na variação do peso na broca.

Referências

- ALAMO, F. J. C. **Vibrações Axiais e Torcionais em Colunas de Perfuração**. Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- BATAKO, A. D.; BABITSKY, V. I.; HALLIWELL, N. A. A self-excited system for percussive-rotary drilling. **Journal of Sound and Vibration**, v. 259, n. 1, p. 97-118, 2003.
- CHI-CHENG, C.; CHENG-YI, C. A PID approach to suppressing stick-slip in the positioning of transmission mechanisms. **Control Engineering Practice**, v. 6, p. 471-479, 1998.
- CHRISTOFOROU, A. P.; YIGIT, A. S. Fully coupled vibrations of actively controlled drillstrings. **Journal of Sound and Vibration**, v. 267, p.1029-1045, 2003.
- COLETTI, A. Y. Y. **Dinâmica e controle de vibrações torcionais em colunas de perfuração de poços de petróleo**. São Carlos: Departamento de Engenharia Mecânica, 2011. 53 p. Relatório Técnico de Iniciação Científica.
- CULL, S. J.; TUCKER, R. W. On the modelling of Coulomb friction. **J. Phys. A: Math. Gen.**, v. 32, p. 2103-2113, 1999.

- CZERWINSKI, R. J.; **Aspectos de resistência mecânica de uma coluna de perfuração em análise tridimensional.** 1994. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia de Petróleo, UNICAMP, 1994.
- ECOLOGYBRASIL. **Atividade de Perfuração Marítima no Bloco BM-J-2:** Estudo de Impacto Ambiental - EIA. Brasil: Ecologus Engenharia Consultiva, 2006. 65 p. Apostila.
- JANSEN, J. D.; VAN DEN STEEN, L. Active damping of self-excited torsional vibrations in oil well drillstrings. **Journal of Sound and Vibration**, v. 179, n.4, p. 647-668, 1995.
- KHULIEF, Y. A.; AL-NASER, H. Finite element dynamic analysis of drillstrings. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 41, p. 1270-1288, 2005.
- MANZATTO, L. M. **Análise dinâmica colunas de perfuração de poços de petróleo usando controle de velocidade não-colocalizado.** 2011. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, USP, São Carlos, 2011.
- MELAKHESSOU H.; BERLIOZ A.; FERRARIS, G. A nonlinear well-drillstring interaction model. **Journal of Vibration and Acoustics**, v. 125, p. 47-52, 2003.
- MIHAJLOVIC, N. et al. Friction-induced limit cycling in flexible rotor systems: an experimental drill-string set-up. **Nonlinear Dynamics**, v. 46, n. 3, p. 273-291, 2006.
- NAVARRO-LÓPEZ M. N.; SUÁREZ, R. Practical approach to modeling and controlling stick-slip oscillations in oilwell drillstring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS, 2004, Taipei. **Proceedings...**Taipei: IEEE , 2004. p. 1454-1460.
- OLIVEIRA, L. K. **O que é o Pré-Sal:** petróleo - sonda de perfuração petrolífera. Disponível em: <<http://diariodopresal.wordpress.com/o-que-e-o-pre-sal/petroleo-sonda-de-perfuracao-petrolifera-2>>. Acesso em: 21 nov. 2011.
- PLÁCIDO, J. C. R.; PINHO, R. **Brocas de perfuração de poços de petróleo.** Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Mecânica, 2009. 63 p. Apostila.

- PLÁCIDO, J. C. R.; SANTOS, H. M. R.; GALEANO, Y. D. Drillstring vibration and wellbore instability. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 124, p. 217-222, 2002.
- RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**, 4. ed. Miami: Pearson Prentice Hall, 2003. 1078 p.
- THOMAS, J. E. (Org.). **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. 271 p.
- TRINDADE, M. A.; SAMPAIO, R. Active Control of Coupled Axial and Torsional Drill-String Vibrations. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 18., 2005, Ouro Preto. **Proceedings...** Ouro Preto: COBEM, 2005.
- TUCKER, R.W.; WANG, C. An integrated model for drill-string dynamics. **Journal of Sound and Vibration**, v. 224, n. 1, p. 123-165, 1999a.
- TUCKER R.W.; WANG C. On the effective control of torsional vibrations in drilling systems. **Journal of Sound and Vibration**, v. 224, n. 1, p. 101-122, 1999b.
- TUCKER R.W.; WANG C. Torsional vibration control and cosserat dynamics of a drill-rig assembly. **Meccanica**, v. 38, p. 143-159, 2003.
- VAN DE VRANDE, B. L.; VAN CAMPEN, D. H.; KRAKER, A. D. An approximate analysis of dry-induced stick-slip vibrations by a smoothing procedure. **Nonlinear Dynamics**, v. 19, n. 2, p. 159-169, 1999.
- YIGIT, A. S.; CHRISTOFOROU, A. P. Coupled axial and transverse vibrations of oilwell drillstrings. **Journal of Sound and Vibration**, v. 195, n. 4, p. 617-627, 1996.