

## OBTENÇÃO DE REGIÕES DE MINIMIZAÇÃO DO FENÔMENO DE STICK-SLIP EM COLUNAS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

**MONTEIRO, H. L. S.,** hlsmonteiro@gmail.com<sup>1</sup>  
**TRINDADE, M. A.,** trindade@sc.usp.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica.  
Av. Trabalhador São-Carlense, 400, SEM/EESC, 13566-590 - São Carlos, SP - Brasil.

**Resumo:** O fenômeno de stick-slip, em colunas de perfuração de poços de petróleo, se não controlado, pode induzir um comportamento dinâmico imprevisível ou caótico à coluna de perfuração. Este trabalho trata da busca de condições de controlabilidade utilizando diferentes técnicas de controle no parâmetro velocidade da mesa rotativa, visando a redução de stick-slip e de oscilações respectivas em torno de uma pré-definida velocidade de referência. As leis de controle implementadas são do tipo proporcional integrativa, com parâmetros 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. Foi adotado como critério para avaliar as condições de operação o desvio médio da velocidade em relação à referência, para minimização pelas técnicas de controle implementadas. Foram realizadas análises paramétricas dos ganhos proporcional e integrativo segundo este critério, e obtiveram-se curvas de desvio de velocidade. Nestas curvas, foram encontradas regiões que representam melhores condições de operação com a redução de stick-slip e de oscilações na velocidade. Combinadas com valores otimizados do parâmetro de variação do peso na broca, foi possível a ampliação destas áreas referentes a melhores condições de operação.

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

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de perfuração de poços de petróleo consiste, de acordo com Jansen e van den Steen (1995), na abertura de poços em formações rochosas, com diâmetros de cerca de 10 a 85 cm e profundidades de 0-5000 metros para a extração de petróleo e gás.

A perfuração rotativa ocorre, de acordo com Mihajlovic et al (2006), pela rotação da broca (*drill bit*), que cria o caminho para um poço (*borehole*). Esta broca é componente de um segmento pesado, denominado BHA (Bottom Hole Assembly), cuja ligação com a superfície é feita por uma coluna de perfuração (*drillstring*), que consiste, segundo Tucker e Wang (1999a) de uma série de tubos cilíndricos de aço conectados. A coluna de perfuração e o BHA formam, basicamente, o conjunto de perfuração, que é rotacionado pelo torque motor fornecido pela mesa rotativa (*rotary table*), na superfície.

Durante o processo de perfuração, vibrações axiais, torcionais e laterais, ou combinações destes, são geradas levando a um dos principais problemas no processo de perfuração de poços de petróleo (Schlumberger, 2006).

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, falha prematura dos componentes, mudanças inesperadas na direção da perfuração, e até mesmo quebrar a coluna, inutilizando aquele poço. (KHULIEF e AL-NASER, 2005).

As vibrações torcionais podem causar variação da rotação ao longo da coluna, danificar as brocas e prejudicar o processo de perfuração, segundo Álamo (2004), e podem gerar, segundo Plácido, Santos e Galeano (2002), o fenômeno de stick-slip, que é uma das principais causas de falhas no processo de perfuração.

O stick-slip é caracterizado pela parada da broca (parte inferior), e do conjunto BHA, enquanto a mesa giratória (em cima) continua girando e transmitindo potência, de modo que, aumentando-se a energia de deformação de torção armazenada na coluna de perfuração e, portanto, o torque aplicado à broca, a broca deve superar a resistência de atrito entre a broca e a formação rochosa, continuando o processo de perfuração, mas podendo atingir velocidades muito mais altas do que a esperada (de referência).

Em medições de campo, apresentadas por Plácido, Santos e Galeano (2002), o stick-slip é observado por fortes oscilações na velocidade de perfuração. Essa oscilação é auto-excitada se tornando regular e estável uma vez que o

modo é iniciado e é reduzida se a velocidade é aumentada (Plácido, Santos e Galeano, 2002; Trindade e Sampaio, 2005). A frequência destas oscilações é geralmente um pouco abaixo da primeira freqüência natural de vibração de torção na faixa de 0,05 a 0,5 Hz (Jansen e Van den Steen, 1995).

Apesar de a propagação das ondas de torção ser regida por equações de onda lineares, a interação entre broca e formação rochosa apresenta um comportamento altamente não-linear que pode ser uma causa de regime não-uniforme de penetração (Spanos et al., 1995, Tucker e Wang, 2003). Richard e Detournay (2000) estudaram a resposta autoexcitada de tais sistemas usando um modelo discreto com dois graus de liberdade (DOF) para demonstrar que o acoplamento linear entre os modos normal e tangencial na broca são suficientes para gerar o fenômeno de stick-slip.

Ritto, Soize e Sampaio (2009) também estudaram a interação não linear entre broca e formação rochosa, usando, porém, um modelo estocástico para as principais forças que atuam sobre o sistema.

Jansen e Van den Steen (1995) adotaram um modelo simplificado de atrito que captura a essência do efeito não linear e parece ser suficiente para realizar análises lineares. Tucker e Wang (1999b) utilizaram uma abordagem contínua para a coluna combinada a um modelo de atrito entre broca e formação rochosa, que é uma função do movimento relativo. Uma vez que vibrações induzidas pelo fenômeno de stick-slip têm um papel fundamental no processo de perfuração, várias técnicas diferentes têm sido propostas ao longo dos anos para controlar este fenômeno. Elas podem ser resumidas nas seguintes categorias: amortecimento ativo (Jansen e Van den Steen, 1995), retificação de torque (Tucker e Wang, 1999a), “torque suave” (soft-torque) (Tucker e Wang, 1999a; Tucker e Wang, 2003), controle proporcional-integral (PI) de velocidade (Christoforou e Yigit, 2003; Trindade e Sampaio, 2005) e variação dinâmica do peso na broca (Lopez e Suarez, 2004).

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, anulando 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.

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).

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 das leis de controle PI simples e PI com variação linear do peso na broca, na correção e/ou eliminação de vibrações torcionais e do fenômeno *stick-slip*, presentes no processo de perfuração de poços de petróleo.

## 2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Um modelo físico-matemático foi proposto para o conjunto de perfuração, considerando-se os elementos: mesa rotativa (*rotary table*), que aplica o torque motor ao conjunto de perfuração, sendo que é onde foram aplicadas as leis de controle, à velocidade da mesa; coluna de perfuração (*drillstring*), elo de ligação entre a mesa e a broca; e a broca (*bit*), sendo que a broca, neste caso, representa o conjunto denominado *BHA* (*Bottom Hole Assembly*), que recebe o torque resistivo, oriundo da interação broca e formação rochosa.

O conjunto é descrito por equações que, acopladas, formam uma equação matricial, de acordo com a Eq. 1, sendo  $\mathbf{u}$  o vetor de deslocamentos angulares nodais e  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{K}$  as matrizes de massa, amortecimento e rigidez. O vetor  $\mathbf{F}$  contém os torques aplicados na mesa ( $T_m$ ), no primeiro nó e na broca ( $T_b$ ), no último nó. (MONTEIRO e TRINDADE, 2012).

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

### 2.1. Modelagem do torque na mesa

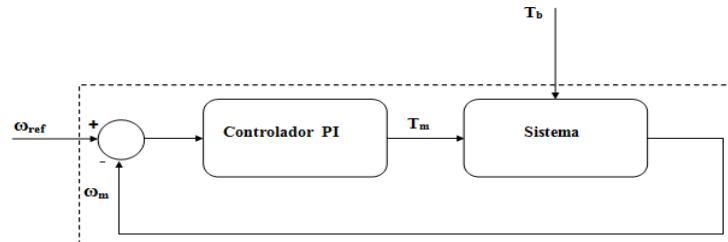
A velocidade da mesa  $\omega_m$  é a variável a ser controlada para este modelo de sistema de perfuração.

O controlador utilizado, do tipo proporcional integrativo, imprime um fator de ganho  $K_p$  proporcional à diferença entre a velocidade da mesa e à 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.

Descrito pela Eq. 2, sendo  $\omega_{ref}$  a velocidade de referência adotada,  $\theta_m$  o deslocamento angular da mesa (topo da coluna), e  $T_m$  o torque na mesa, que propicia o movimento à coluna de perfuração, é não colocalizado, pois apenas responde às variações na mesa e não atua diretamente na broca, e sim, indiretamente.

$$T_m = K_p(\omega_{ref} - \omega_m) + K_i(\omega_{ref}t - \theta_m) \quad (2)$$

## 2.2. Controlador PI com peso na broca constante



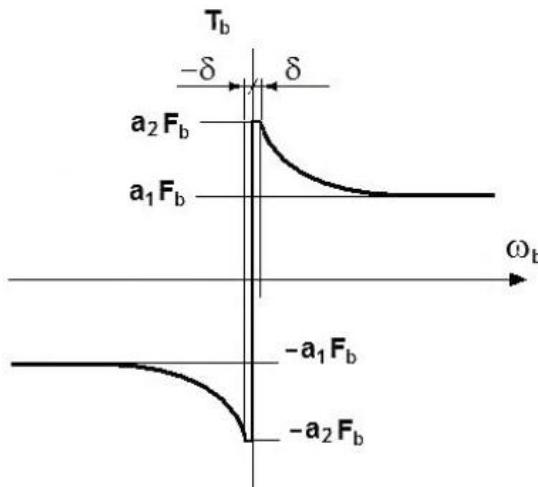
**Figura 1 - Modelo esquemático de um controlador PI com peso na broca constante, adotado para o sistema de perfuração.**

Para o controlador com peso na broca constante, um modelo esquemático é apresentado na Fig. 1. O torque na broca  $T_b$  proveniente da interação da broca com a formação rochosa, e a velocidade de referência  $\omega_{ref}$  representam as entradas do sistema, enquanto que a variável de controle  $\omega_m$  representa a saída. A saída do controlador  $T_m$  é o torque que deve ser aplicado pela mesa rotativa.

A função de torque  $T_b$  depende do peso atribuído na broca (WOB, Weight On Bit).

## 2.3. Modelagem do torque na broca $T_b$

Foi utilizada, para a modelagem do torque esperado na broca, a proposta, segundo atrito de Coulomb, de Navarro-López e Suárez (2004), conforme mostrada na Fig. 2.



**Figura 2 - Modelo de torque na broca segundo atrito de Coulomb, de acordo com proposta de Navarro-López e Suárez (2004), por Manzatto (2011).**

$$T_b = K(\theta_{n-1} - \theta_n); |\omega_b| \leq \delta, |T| \leq a_2 F_b; \quad (3)$$

$$T_b = a_2 F_b \operatorname{sign}(T); |\omega_b| \leq \delta, |T| > a_2 F_b; \quad (4)$$

$$T_b = \left[ a_1 + (a_2 - a_1) e^{-\beta |\omega_b|} \right] F_b \operatorname{sign}(\omega_b); |\omega_b| > \delta; \quad (5)$$

Esta função é definida em três intervalos:

1º. Para velocidades angulares na broca com valor absoluto não nulo, e maiores do que uma tolerância de valor  $\delta = 0.0001$ , o torque decai segundo uma função exponencial de limite de atrito estático até um valor de convergência de atrito dinâmico, segundo a Eq. 3.

2º. Para velocidades menores do que  $\delta$ , 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, segundo a Eq. 4.

3º. Se a velocidade na broca é menor do que  $\delta$  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  $F_b$  segundo a Eq. 5.

Nestas equações,  $K$  é a constante de rigidez da coluna em relação à torção,  $GJ/L$ ;  $\theta_{n-1}$  é o deslocamento angular da extremidade adjacente à broca;  $\theta_n$  é o deslocamento angular da extremidade da broca;  $\text{sign}(\omega_b)$  é a função sinal da velocidade angular na broca;  $a_1$  e  $a_2$  são coeficientes de ajuste similares aos coeficientes do atrito de Coulomb, dinâmico e estático, respectivamente;  $\beta$  é o expoente de decaimento; e  $F_b$  é o Peso na broca, WOB.

### 2.3. Ajuste dos coeficientes $a_1, a_2$ e $\beta$

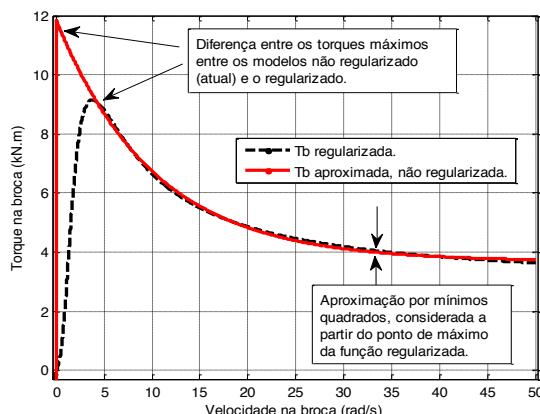
Com valores típicos dos parâmetros de perfuração utilizados por Tucker e Wang (2003), uma típica condição de perfuração foi simulada, com: velocidade angular de referência  $\omega_{\text{ref}} = 100 \text{ rpm}$  ( $10.47 \text{ rad/s}$ ); peso na broca, WOB =  $120\text{kN}$ ; parâmetros de controle proporcional-integrativo  $K_p = 200 \text{ N.m.s}$  e  $K_i = 100\text{N.m}$ ; velocidade angular inicial de  $70 \text{ rad/s}$  em toda a coluna, com intervalo de tempo considerado, para análise, de 0 a  $100\text{s}$ .

A função de decaimento descrita na Eq. 5, foi ajustada às curvas obtidas para a função regularizada em zero encontrada por Trindade e Sampaio (2005), e obteve-se, para cada peso na broca, os coeficientes  $a_1$  e  $a_2$ , e o expoente de decaimento  $\beta$ , que foram registrados na Tab.1.

**Tabela 1. Coeficientes  $A, B, a_1, a_2, \beta$ , para a função modeladora do torque na broca não regularizada, para os valores de pesos na broca: 80, 100, 120, 140 e 160kN.**

Coeficiente s	WOB (kN)				
	80	100	120	140	160
$a_1$	0,037	0,032	0,029	0,026	0,025
$a_2$	0,057	0,070	0,079	0,085	0,089
$\beta$	0,082	0,093	0,097	0,098	0,099

A partir dos valores constantes na Tab. 1, para os coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$ , e  $\beta$ , foram obtidos 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, apresentados na Fig. 3.

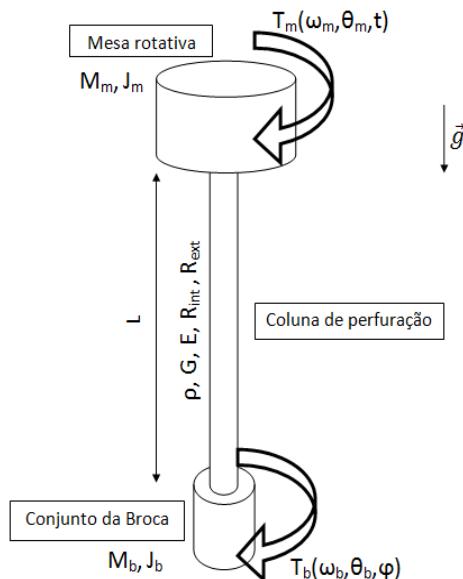


**Figura 3 –Aproximação do modelo proposto para a interação da broca e formação rochosa, em vermelho, a partir do decaimento da função regularizada por Trindade e Sampaio (2005), para o intervalo de velocidades na broca de 0 a 50rad/s.**

### 2.4. Modelo proposto

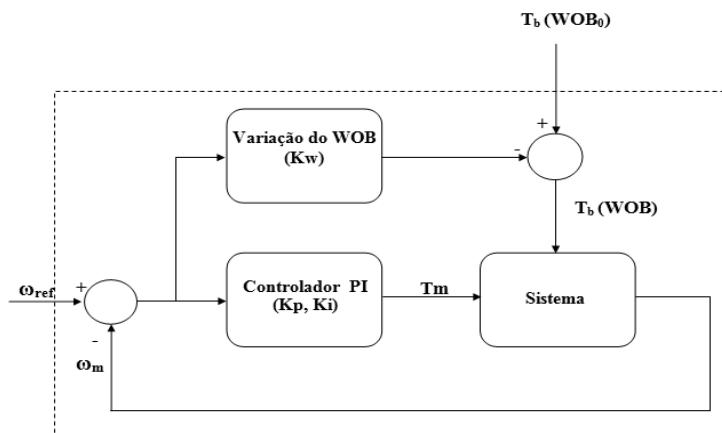
Um esquema para o modelo proposto é apresentado na Fig. 4. Duas inéncias, a inéncia da mesa rotativa,  $J_m$ , e do conjunto da broca (BHA),  $J_b$ , encontram-se ligadas, por um haste flexível à torção (coluna de perfuração), rígida axialmente, cujo movimento considerado foi apenas a rotação, em torno 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,  $T_b$ .

Em resumo, a coluna é discretizada pelo método dos elementos finitos com funções de forma de Lagrange lineares. Ao torque na mesa é aplicado um Controlador PI com peso na broca constante ou variável, enquanto que o torque na broca é não regularizado, segundo proposta de Navarro-López e Suárez (2004).



**Figura 4 - Esquema representativo do modelo do sistema de perfuração, envolvendo a mesa rotativa, o conjunto da broca e a coluna de perfuração.**

## 2.6. Controlador PI com peso na broca variável



**Figura 5 - Modelo esquemático de um controlador PI com peso na broca variável, adotado para o sistema de perfuração.**

Um modelo esquemático para a variação do peso na broca é representado na Fig. 5. 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.

Este controlador utiliza-se de uma variação linear do peso na broca, descrita pela Eq. 6. É composta por: WOB, a função peso na broca variável, em N; WOB<sub>0</sub> - o peso na broca constante, em N; K<sub>w</sub> - o parâmetro de controle de variação do peso na broca, em N.s; ω<sub>m</sub> - velocidade angular da mesa, em rad/s; ω<sub>ref</sub> - velocidade angular de referência para a coluna de perfuração, em rad/s.

$$WOB = WOB_0 + K_w \cdot (\omega_m - \omega_{ref}) \quad (6)$$

## 3. MÉTODO DE ANÁLISE

Foram propostos critérios para avaliação de desempenho e de viabilidade e segurança de operação. Na seção 3.1, descreve-se o critério de desempenho adotado, o desvio médio de velocidade angular na broca, cujos resultados, para análise de controle das vibrações torcionais, foram considerados mais significativos.

### 3.1 Desvio médio de velocidade angular da broca ( $J_1$ )

O desvio  $J_1$  adotado quantifica uma variação média da velocidade angular da broca  $\omega_b$  em relação à velocidade de referência  $\omega_{ref}$  e é constituído da soma de desvios pontuais em cada instante de tempo  $t$ . Entre os instantes de tempo inicial  $t_i$  e final  $t_f$ ,  $J_1$  é representado pela integral descrita pela Eq. 7:

$$J_1 = \int_{t_i}^{t_f} \frac{|\omega_b - \omega_{ref}|}{\omega_{ref}} dt \quad (7)$$

Os resultados apresentados foram obtidos adotando-se este critério para análise, atentando-se para o fato de que, qualquer menção à palavra "desvio", se não especificada, a  $J_1$  se refere.

### 3.2 Ajuste dos parâmetros de controle $K_p$ e $K_i$

Para cada peso na broca, foram analisados pares de valores destes parâmetros, e observou-se que, para determinados pares, o desvio era minimizado, com o tempo de acomodação ao valor da velocidade angular de referência menor do que 100 segundos; para outros pares, em um tempo maior do que 100s; outros pares de  $K_p$  e  $K_i$  provocavam grandes oscilações às velocidades da mesa e da broca.

Verificou-se, para determinados conjuntos de valores destes parâmetros, a formação de figuras semelhantes a elipses, que delimitavam regiões de maiores ou menores valores de desvio.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Resultados obtidos para PI com peso na broca constante

Na Fig. 6, encontram-se gráficos de velocidades obtidos para  $WOB = 120kN$ , com valores de desvio em ordem crescente. Um maior valor de desvio propicia um aumento na amplitude das oscilações e na taxa de ocorrência de *stick-slip*, que graficamente, é a permanência da velocidade da broca em torno de zero. A partir de  $J_1 = 33$ , neste caso, as condições de operação caracterizam-se como indesejáveis.

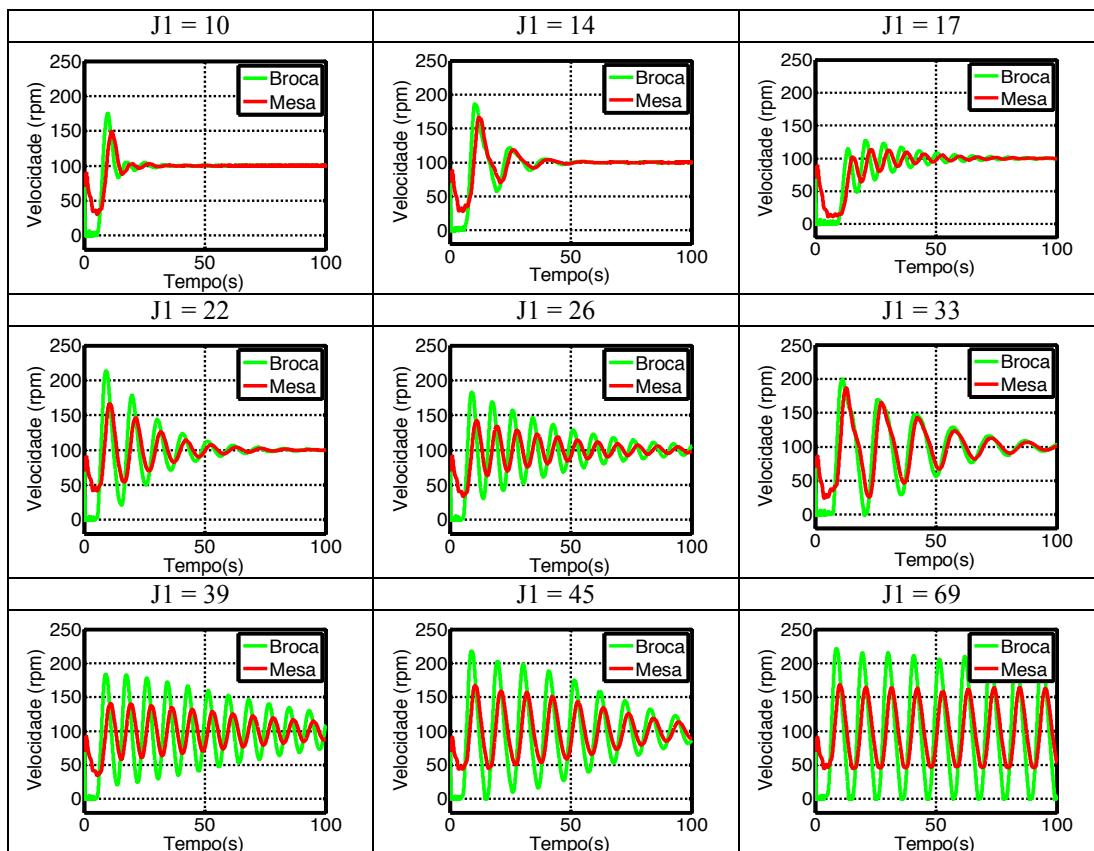
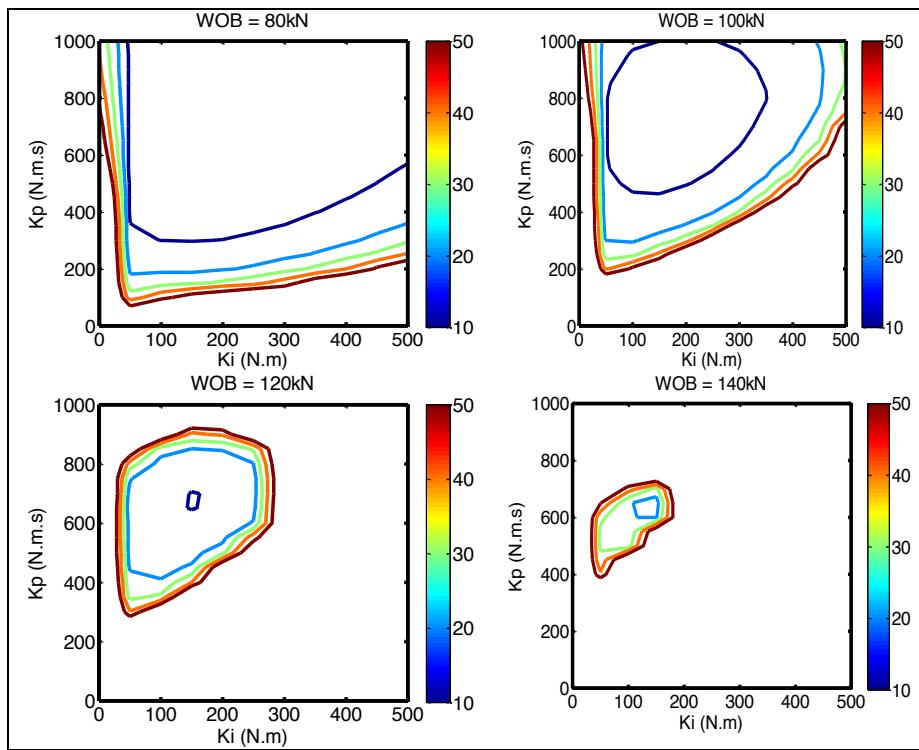


Figura 6 – Velocidades da broca e da mesa no intervalo de tempo de 0 a 100s para diferentes valores de desvio  $J_1$  com Controlador PI com  $WOB$  constante e igual a 120kN.

Com valores de  $K_p$  (0 a 1000 N.m.s, com variação de 50N.m.s) e  $K_i$  (0 a 500 N.m, com variação de 50 N.m), foram obtidas e dispostas na Fig. 7 as curvas de nível de desvio  $J_1$  iguais a 10, 20, 30, 40, 50, para os pesos na broca considerados (80, 100, 120, 140 e 160kN).



**Figura 7 - Curvas de nível obtidas por Controle PI para  $WOB = 80, 100, 120$  e  $140\text{kN}$ , na faixa de valores de  $K_p$  (0 a 1000 N.m.s, com variação de 50N.m.s) e  $K_i$  (0 a 500 N.m, com variação de 50 N.m).**

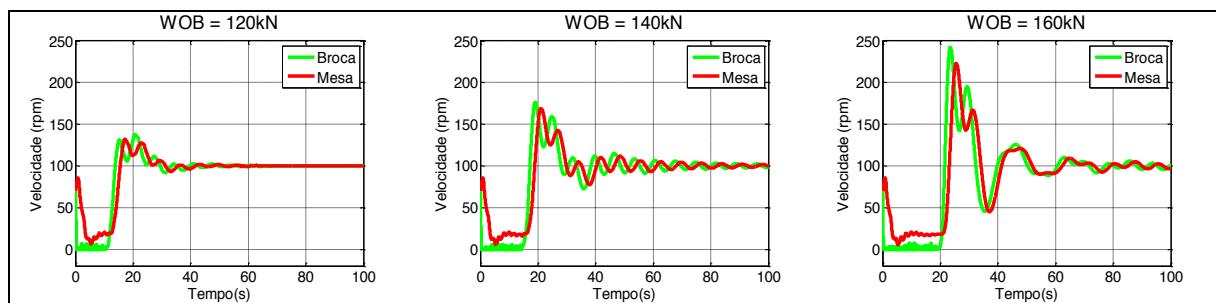
Com o aumento do WOB, uma diminuição das regiões delimitadas pelas curvas de nível pode ser visualizada. Para a curva de  $J_1 = 10$ , a região delimitada diminui com o aumento do peso na broca, até não existir para 140kN.

Para o peso na broca igual a 160kN, não foram encontradas faixas regulares de curvas de desvio, nem curvas para os desvios menores do que 30. Mesmo após os refinamentos nas malhas, não foi encontrada, para este peso na broca, uma região adequada de trabalho, apenas para valores pontuais de  $K_p$  e  $K_i$ .

Interiormente às regiões de menor desvio, buscou-se encontrar pontos (pares de valores de  $K_p$  e  $K_i$ ) que propiciavam o menor desvio, os pontos ótimos.

As malhas deveriam ser mais refinadas, conforme o aumento do peso na broca, para se obter um ponto ótimo, sendo que os valores para os respectivos desvios aumentam.

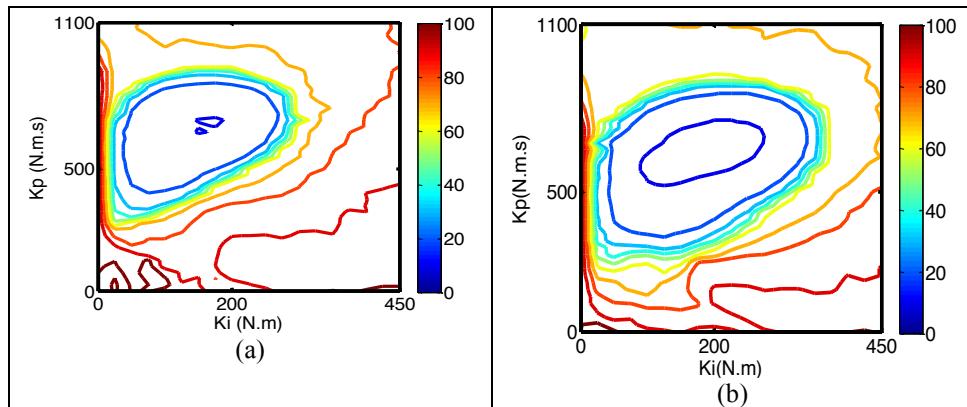
Considerando-se o ponto ótimo obtido para 160kN, que se apresenta como a situação mais crítica, mantendo-se os valores dos parâmetros de controle  $K_p$  e  $K_i$ , foram obtidos, para outros pesos na broca, gráficos de velocidades, cujos comportamentos podem ser observados na Fig. 8.



**Figura 8 – Velocidades na broca e na mesa para  $K_p = 512\text{N.m.s}$  e  $K_i = 63\text{N.m}$ , para os pesos na broca: 120, 140 e 160kN.**

Pode ser visualizado um aumento das amplitudes de oscilação nas velocidades, com o aumento do peso na broca, sendo que, com o mesmo par de valores de  $K_p$  e  $K_i$  que representam o ponto ótimo obtido para 160kN, para pesos na broca menores, boas condições de operação podem ser obtidas.

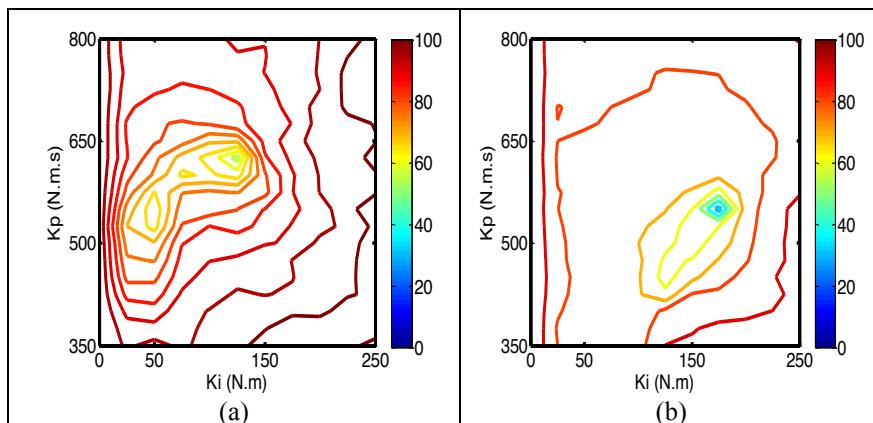
#### 4.4. Resultados obtidos para PI com peso na broca variável



**Figura 9 - Curvas de nível de desvio  $J_1$  para  $K_p$  (0 a 1100 N.m.s, com variação de 25 N.m.s) e  $K_i$  (0 a 450 N.m, com variação de 25 N.m) para PI com: (a)  $WOB = 120\text{kN}$ . (b)  $WOB$  variável com  $WOB_0 = 120\text{kN}$  e  $K_w = 1.4$ .**

O parâmetro  $K_w$  de variação linear do peso na broca foi avaliado, sobre as malhas paramétricas já consideradas, para diferentes valores iniciais de peso na broca. Faixa de valores para  $K_w$  foi encontrada buscando a minimização do desvio para pares de valores de  $K_p$  e  $K_i$ , inclusive dos ponto ótimos.

Para o peso na broca inicial de 120kN e  $K_w = 1.4$ , apresentam-se na Fig. 9, as curvas de nível obtidas para o peso na broca constante e variável. De (a) para (b), com peso na broca constante e variável, respectivamente, houve uma ampliação da região delimitada pela curva de desvio  $J_1 = 10$ , 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. Um relativo aumento das áreas de abrangência de todas as curvas pode ser visualizado, e as curvas de nível  $J_1 = 70$ , alongaram-se de  $K_i = 350\text{N.m}$  para  $K_i = 450\text{N.m}$ , aproximadamente.



**Figura 10 - Curvas de nível  $K_p$  (350 a 800 N.m.s, com passo 25 N.m.s) e  $K_i$  (0 a 250 N.m, com passo 25 N.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 Fig. 10, que a variação do peso na broca diminuiu os desvios de velocidade para a malha considerada, e fez aparecer uma pequena região representando desvios menores do que 30, que faz deslocar o ponto ótimo para a direita, em relação ao obtido com peso na broca constante.

#### 5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Com a técnica de controle Proporcional Integrativo com  $WOB$  constante, foram obtidas regiões bem delineadas de desvios médios de 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 a discretização, encontrar-se um ponto ótimo, ponto de menor desvio para a malha considerada.

Aumentando-se o peso na broca, as regiões limitadas pelas curvas de desvio se fecham consideravelmente, e a região de trabalho adequada com 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.

Com a implementação da variação do peso na broca, foi observado um aumento das regiões de desvio de forma geral, nas malhas consideradas, aumentando-se as áreas de menor de desvio, principalmente quanto menor o peso na broca.

Pesos na broca maiores provocaram, por outro 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  $Ki$ , o que, consequentemente, aumenta a frequência das oscilações das velocidades.

A construção de malhas paramétricas dos parâmetros integral e proporcional, para os desvios médios de velocidade, para os diferentes pesos na broca considerados, apresentou-se útil aos objetivos deste trabalho, na investigação da possibilidade de encontrar-se regiões bem comportadas de velocidade.

A dificuldade encontrada foi a conveniente adequação dos valores dos parâmetros proporcional, integral e de variação do peso na broca, com o definir a melhor maneira de realizar-se uma conveniente análise paramétrica.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do MCT/CNPq/FAPEMIG Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Estruturas Inteligentes em Engenharia, proc. 574001/2008-5. Os autores também agradecem a Universidade de São Paulo, bem como o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, e a Universidade Federal de São Carlos, o Centro de Ciências Exatas e Tecnologia e a Coordenação do curso de Graduação em Engenharia Mecânica desta instituição, pelo apoio.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álamo, F. J. C., 2004. "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.
- Christoforou, A. P.; Yigit, A. S., 2003. "Fully coupled vibrations of actively controlled drillstrings". Journal of Sound and Vibration, v. 267, p.1029-1045, 2003.
- Coletti, A. Y. Y., 2011. "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.
- Jansen, J.D. and van den Steen, L., 1995. "Active damping of self-excited torsional vibration in oil well drillstrings". Journal of Sound and Vibration, Vol. 179, No. 4, pp. 647-668.
- Khulief,, Y. A.; Al-Naser, 2005. "H. Finite element dynamic analysis of drillstrings." Finite Elements in Analysis and Design, v. 41, p. 1270-1288, 2005.
- Manzatto, L. M., 2011. "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.
- Mihajlovic, N. et al., 2006. "Friction-induced limit cycling in flexible rotor systems: an experimental drill-string set-up." Nonlinear Dynamics, v. 46, n. 3, p. 273-291, 2006.
- Monteiro, H. L. S., 2012. "Análise de desempenho de diferentes leis de controle de vibrações torcionais em colunas de perfuração de poços de petróleo." 2012. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, USP, São Carlos, 2012.
- Navarro-López, M.N. and Suarez, R., 2004. "Practical approach to modeling and controlling stick-slip oscillations in oilwell drillstring". Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, Taipei, Taiwan, pp. 1454-1460.
- Placido, J.C.R., Santos, H.M.R. and Galeano, Y.D., 2002. "Drillstring vibration and wellbore instability". Journal of Energy Resources Technology, Vol. 124, pp. 217-222.
- Richard, T. and Detournay, E., 2000. "Stick-slip motion in a friction oscillator with normal and tangential mode coupling". Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Série IIb, Vol .328, pp. 671-678.
- Ritto, T.G., Soize, C. and Sampaio, R., 2009. "Non-linear dynamics of a drill-string with uncertain model of the bit-rock interaction". International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 44, pp. 865-876.
- Schlumberger Ltd., 2006. "Shock and vibration in the drilling environment". Tutorial video. 8min20s. <http://www.slb.com/services/drilling.aspx>.
- Spanos, P. D. et al., 1995. "Modeling of Roller Cone Bit Lift-Off Dynamics in Rotary Drilling". Journal of Energy Resources Technology, Houston, v. 117, p. 197-207, 1995.
- Trindade, M.A. and Sampaio, R., 2005. "Active control of coupled axial and torsional drill-string vibrations". Proceedings of 18th COBEM International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, MG, in CD-ROM.
- Tucker, R.W. and Wang, C., 1999a. "On the effective control of torsional vibrations in drilling systems". Journal of Sound and Vibration, Vol. 224, No. 1, pp. 101-122.
- Tucker, R.W. and Wang, C., 1999b. "An integrated model for drill-string dynamics". Journal of Sound and Vibration, Vol. 224, No. 1, pp. 123-165.
- Tucker, R.W. and Wang, C., 2003. "Torsional vibration control and cosserat dynamics of a drill-rig assembly". Meccanica, Vol. 38, pp. 143-159.

## 5. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

# IN THE SEARCH OF REGIONS THAT MINIMIZES THE STICK-SLIP PHENOMENON IN COLUMNS OF OIL WELL DRILLING

MONTEIRO, H. L. S., [hlsmonteiro@gmail.com](mailto:hlsmonteiro@gmail.com)<sup>1</sup>

TRINDADE, M. A., [trindade@sc.usp.br](mailto:trindade@sc.usp.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica.  
Av. Trabalhador São-Carlense, 400, SEM/EESC, 13566-590 - São Carlos, SP - Brasil.

**Abstract** - The stick-slip phenomenon on oil wells drillstrings, if not controlled, can lead to an unpredictable and chaotic dynamic behavior of this drillstring. This work deals with searching of controllability conditions using different controlling techniques in parameter speed of the rotary table, in order to reduce stick-slip and oscillations around a preset reference speed. The control laws implemented are the type proportional integrative, with proportional and integral parameters to the speed of the table, with a constant or variable weight on bit. It was proposed, for the drillstring, a finite element model, with a linear shape function. The torque on the drill bit was modeled as a Coulomb friction by an unregulated way and this curve was adjusted by empirical data founded in the literature. It was adopted as a criterion to evaluate the operating conditions, the average deviation of the table speed relatively to the reference speed. According to this criterion, it was realized a parametric analysis of the proportional and integrative gains and it were obtained speed deviation curves. In these curves, it were found regions representing the best operating condition by reducing stick-slip and oscillations in the speed. Combined with optimized values of the variation in the weight on bit parameter, it was possible the expansion of regions regarding to the best operating condition.

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