



XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP  
Artigo CREEM2012

## DINÂMICA E CONTROLE DE VIBRAÇÕES TORSIONAIS EM COLUNAS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

**Andre Yuji Yoneda Coletti**

USP, Universidade de São Paulo, Curso de Engenharia Mecânica  
Campus São Carlos - Bairro Centro - CEP 13566-590 – São Carlos – São Paulo  
E-mail para correspondência: [andre.coletti@gmail.com](mailto:andre.coletti@gmail.com)

### Introdução

A exploração de petróleo apresenta-se cada vez mais escassa em águas rasas e a tecnologia para a extração de petróleo em águas profundas se torna cada vez mais necessária. A Petrobrás detém vários recordes de profundidade por lâmina de água em extração de petróleo e atualmente se fala de atingir profundidades da ordem de 7000 a 8000 metros na região de pré-sal. Esta exploração vem crescendo em profundidades a partir de 2000 metros, sobretudo na costa do Brasil e do Ocidente africano. Justificam-se assim os vários estudos na área visando segurança e velocidade na extração.

A Petrobrás já utiliza vários modelos que descrevem o comportamento de uma coluna de perfuração. Os modelos, em sua maioria, são lineares, muito simplificados, mas que, para baixas profundidades, funcionam a contento e permitem ao operador controlar o processo de perfuração e prevenir danos na coluna. À medida que a profundidade aumenta, verifica-se que as previsões dos modelos se deterioram chegando mesmo a não funcionarem. Não se sabe ao certo qual a dinâmica do fenômeno à medida que a flexibilidade não pode mais ser desconsiderada. Sabe-se por experiência, no entanto, que os movimentos axiais, torcionais e flexionais da coluna (incluindo o escoamento da lama de perfuração e os impactos da coluna com as paredes do poço assim como a interação da broca com a rocha) são importantes para uma boa descrição do problema.

Problemas de vibrações são frequentes durante a perfuração de poços de petróleo. Entre outros, alguns problemas típicos são: Falhas do elemento da coluna por fadiga do material devido aos três modos de vibração; Instabilidade da parede do poço devido aos choques da coluna de perfuração gerados pelas vibrações transversais; Redução da taxa de penetração devido à vibração axial e ao fenômeno de stick-slip; Controle do processo de perfuração à medida que a profundidade do poço aumenta.

Para que, se possa, de fato, perfurar poços de maior profundidade é necessário estudar o problema.

Diversos modelos levam em consideração, principalmente, a dinâmica torcional devido à observação de que a coluna de perfuração se comporta como um pêndulo de rotação torcional. Com a intenção de manter uma velocidade angular constante aplica-se um torque a partir de um motor elétrico. Porém, são observadas vibrações torcionais auto excitáveis de stick-slip causadas pela relação não linear entre o torque e a velocidade angular da broca que desaparecem quando a velocidade média é maior que um valor limite. No entanto o aumento da velocidade média pode causar vibrações laterais na coluna causando impactos com a parede do poço e instabilidades paramétricas, logo se torna necessário o controle sobre o stick-slip.

As condições do poço podem fazer com que a broca pare de girar enquanto a mesa continua girando. Quando a energia torcional armazenada chega a um ponto que o atrito na broca é menor que o torque aplicado, a broca se solta e inicia uma rotação com velocidades muito altas. O stick-slip causa uma onda torcional que viaja da broca até a mesa pela coluna de perfuração até a mesa. Por causa da alta inércia da mesa, ela atua como um engaste fixo para a coluna de perfuração e, portanto refletindo a onda torcional de volta para a broca, podendo ocasionar sua parada novamente e o ciclo se repete.

O stick-slip é muito prejudicial para os componentes da coluna de perfuração e para a broca, apresenta flutuações na velocidade angular da broca e torque na mesa podendo causar rotações muito maiores do que a planejada até a completa parada da broca ou, em casos extremos, rotações reversas. Altas RPM aceleram o desgaste, causam lascamento e ruptura da broca.

### Objetivo

O trabalho busca obter resultados que indiquem condições seguras, com relação a vibrações torcionais, para os componentes de perfuração de um poço de petróleo a partir da aplicação de leis de controle sobre o torque aplicado na mesa da coluna de perfuração.

Através de parâmetros que causam uma perfuração mais suave e otimizada, evitando a ocorrência de stick-slip, comparou-se as diferentes leis de controle aplicadas.

## Metodologia

Os procedimentos adotados para análise se resumem em quatro passos principais:

- i) Modelo mecânico do sistema Mesa-Coluna de perfuração-Broca;
- ii) Análise dos diferentes modelos de interação entre Broca-Rocha;
- iii) Aplicação de diferentes leis de controle;
- iv) Análise dos parâmetros das leis de controle.

No modelo mecânico, considerou-se os momentos de inércia da mesa e da broca, a rigidez torcional da coluna de perfuração e o amortecimento causado pelas perdas de energia na deformação elástica da coluna de perfuração e atrito viscoso com a água do mar. O modelo representa, de forma satisfatória, a dinâmica torcional do conjunto podendo observar as vibrações torcionais decorrentes de stick-slip. O sistema de dois graus de liberdade, embora simplificado, com certos ajustes de parâmetros torna o modelo suficiente para entender os principais aspectos para o controle do sistema e é de fácil implementação.

Os diferentes modelos de atrito estudados descrevem a interação entre a broca e a rocha durante a perfuração dos poços de petróleo. Embora o atrito de Coulomb seja de difícil interpretação microscopicamente, conseguimos entender os resultados macroscópicos, podendo assim aplicá-los ao modelo. Alguns modelos procuram aproximar o atrito de Coulomb entre a broca e o solo por uma função matemática contínua da velocidade angular da broca, ou seja, tratam o atrito como uma função suave do movimento da broca, outros tratam o problema descontínuo. No caso real, temos diferentes tipos de rochas e a influência da água do mar, da lama usada como fluido de corte, das paredes do poço, no entanto, o modelo contínuo é satisfatório para o estudo do caso.

Aplicaram-se leis de controle sobre o modelo a fim de controlar a velocidade da broca mantendo a velocidade da mesa constante. As técnicas de controle aplicadas foram: proporcional-integral (PI) sobre a velocidade da mesa (proporcional à velocidade e ao deslocamento angular); o controle soft-torque composto por um controle PI com um filtro passa-alta para mitigar o stick-slip; um controle axial/torcional variando o torque na mesa com um controle PI e o peso na broca (ou seja, variação do torque na broca). Notou-se a diferença obtida pelas leis de controle e compararam-se seus resultados.

## Procedimento experimental e equações governantes

- i) Modelo mecânico para o conjunto Mesa-Coluna de perfuração-Broca:

Para representar o conjunto da mesa de controle, coluna de perfuração e conjunto da broca (Bottom-Hole Assembly, BHA) utilizou-se um modelo mecânico de um pêndulo torcional simplificado de dois graus de liberdade. No modelo mecânico, a mesa e a broca (BHA) foram representados por duas inércias de rotação ( $J_m$  e  $J_b$ , respectivamente). A coluna por uma mola de torção ( $k$ ) e um amortecedor torcional ( $c$ ).

Embora o modelo usado seja uma simplificação do comportamento da coluna de perfuração, ele abrange os fenômenos mais importantes com relação às vibrações torcionais.

Aplicando ao modelo um torque de controle ( $T_m$ ), torque de atrito ( $T_b$ ) devido à interação broca-rocha, o peso na broca ( $W_{ob}$ ) e representando os deslocamentos angulares ( $\theta_m$  e  $\theta_b$ ), velocidades angulares da mesa e da broca ( $\dot{\theta}_m$  e  $\dot{\theta}_b$ ) e um amortecimento viscoso ( $c$ ) devido à torção do material da coluna e o contato com fluido, obtemos a Fig. 1 (a).

O sistema com dois graus de liberdade pode ser descrito pelas seguintes equações diferenciais ordinárias:

$$J_m \ddot{\theta}_m + c(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_b) + k(\theta_m - \theta_b) = T_m \quad (1)$$

$$J_b \ddot{\theta}_b - c(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_b) - k(\theta_m - \theta_b) = -T_b \quad (2)$$

Podemos também reescrever as equações diferenciais ordinárias matricialmente:

$$\begin{bmatrix} J_m & 0 \\ 0 & J_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_m \\ \ddot{\theta}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_m \\ -T_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

A partir do equacionamento em (3) determina-se a dinâmica do sistema.

Algumas considerações foram feitas para validar o modelo, como: o poço e a coluna são verticais e retos; não há movimentos laterais; o atrito nas conexões da coluna e entre a coluna e a parede do poço foram desprezados.

ii) Modelo de Interação entre Broca e Formação Rochosa:

Foram estudados três modelos que representam o atrito broca-rocha, porém o que indica maior aproximação com a realidade está descrito abaixo.

Navarro-Lopez e Suarez (2004) apresentam um modelo para o atrito de Coulomb, no qual a variação do torque de atrito na broca ( $T_b$ ) quando a velocidade angular da broca é zero ( $\dot{\theta}_b = 0$ ), é aproximado por um modelo em que se introduz uma faixa de velocidade aproximadamente nula. Assim,

$$T_b(x) = \begin{cases} T_{eb}(x) & \text{se } |\dot{\theta}_b| < D_v, \quad |T_{eb}| \leq T_{sb} & \text{(Stick)} \\ T_{sb} \text{sgn}(T_{eb}(x)) & \text{se } |\dot{\theta}_b| < D_v, \quad |T_{eb}| > T_{sb} & \text{(Transição Stick - Slip)} \\ R_b W_{ob} \mu_b(\dot{\theta}_b) \text{sgn}(\dot{\theta}_b) & \text{se } |\dot{\theta}_b| \geq D_v & \text{(Slip)} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mu_b(\dot{\theta}_b) &= [\mu_{cb} + (\mu_{sb} - \mu_{cb})e^{-\gamma_b|\dot{\theta}_b|}] \\ T_{eb}(x) &= c(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_b) + k(\theta_m - \theta_b) \end{aligned} \quad (5)$$

onde  $x = (\theta_m, \dot{\theta}_m, \theta_b, \dot{\theta}_b)^T$ ,  $\mu_b(\dot{\theta}_b)$  é o coeficiente de atrito dependente da velocidade na broca,  $\mu_{sb}, \mu_{cb}$  são os coeficientes de atrito estático e dinâmico,  $\gamma_b$  é uma constante positiva,  $T_{sb}$  é o torque de atrito estático associado a  $J_b$  e  $T_{sb} = R_b W_{ob} \mu_{sb}$ ,  $R_b$  é o raio da broca e  $D_v$  é uma constante positiva que representa uma pequena vizinhança de  $\dot{\theta}_b = 0$ .

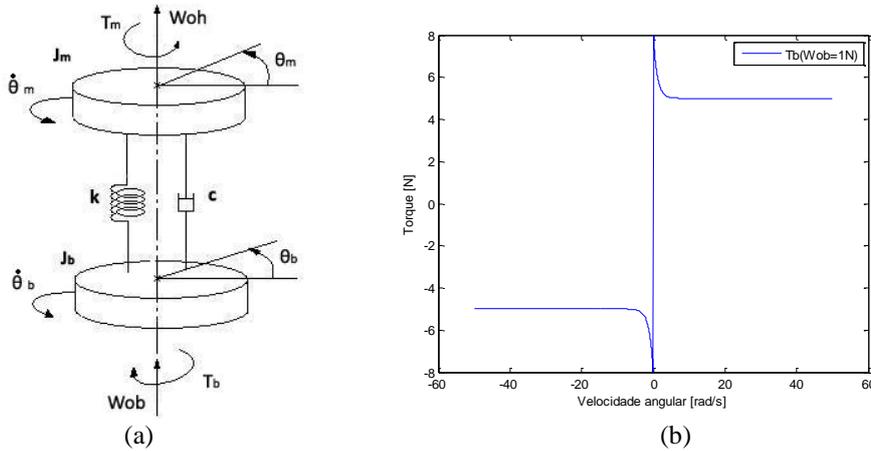


Figura 1: (a) Modelo mecânico com forças, torques, deslocamentos e velocidades representadas; (b) Torque de atrito em função da velocidade angular no modelo proposto por Navarro-Lopez e Suarez (2004).

iii) Leis de controle

Manipular os parâmetros de perfuração, como aumentar a velocidade de rotação da mesa ou variar o peso na broca, são maneiras de amenizar a ocorrência de stick-slip segundo observações em campo.

Outras metodologias de controle aplicadas atuam como um sistema ativo de amortecimento que se mostra bastante eficaz para diminuir a velocidade mínima necessária para que não ocorra stick-slip. Aplicar um controlador PI sobre a velocidade atua para manter a velocidade da mesa constante e acima de um valor mínimo cessar a ocorrência de stick-slip. O soft torque utiliza uma malha fechada do torque aplicado com a finalidade de fazer o sistema trabalhar de forma suave. As ondas torcionais são absorvidas e então quebra-se o ciclo de auto-excitação das vibrações.

-Controle PI:

Um controlador automático compara o valor real de saída do processo com o valor desejado, determina o desvio, e produz um sinal de controle que reduz o desvio a um valor nulo ou muito pequeno.

$$\dot{\theta}_m = \omega_m \quad (6)$$

$$T_m(t) = K_p \dot{\xi}(t) + K_i \xi(t) \quad (7)$$

Onde

$$\xi(t) = \dot{\theta}_m^{ref} - \dot{\theta}_m \quad (8)$$

Sendo  $\dot{\theta}_m^{ref}$  a velocidade angular de referência da mesa e  $K_p > 0$ ,  $K_i > 0$  e  $t > 0$ .

De acordo com experiências em campo o aumento de  $\dot{\theta}_m^{ref}$  e a diminuição do  $W_{ob}$  podem fazer o stick-slip desaparecer.

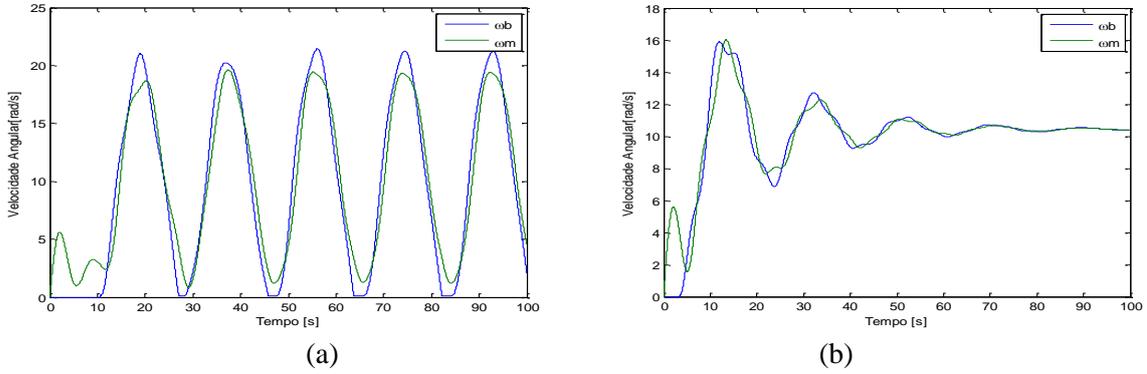


Figura 2: Velocidade angular da broca ( $\omega_b$ ) e da mesa ( $\omega_m$ ) sem controle PI e com ocorrência de stick-slip (a) e com controle PI sem stick-slip (b).

-Controle PI e Peso na Broca Variável:

Adotando-se um controle PI para controlar a velocidade da mesa, utiliza-se um feedback da velocidade da broca para manipular o peso na broca, o que pode ser uma solução para as oscilações de stick-slip segundo Navarro-Lopez e Suarez (2004). Têm-se bons resultados inclusive para velocidades de rotação de referência da mesa baixas.

Propôs-se a variação do  $W_{ob}$  em função da velocidade da broca:

$$W_{ob}(\dot{\theta}_b) = K_w(\dot{\theta}_b - \dot{\theta}_m^{ref}) + W_{ob_0} \quad (9)$$

Com  $W_{ob_0} > 0$  e  $W_{ob} \geq W_{ob_0}$ . A expressão varia o peso na broca de forma que conforme a velocidade da broca diminui, o peso na broca também diminui.

Aplicou-se a lei de variação do  $W_{ob}$  a partir de 50 segundos de simulação sobre o modelo representado na Fig. 2 (a), obtendo o resultado na Fig. 3 (a):

-Controle PI e Soft Torque:

Adotando um controle PI para controlar a velocidade da mesa, uma estratégia para modificar os efeitos causados por este controle se tornam essenciais quando temos vibrações torcionais. Com a intenção de absorver ondas torcionais de determinada frequência na mesa, o mecanismo de soft torque ajusta ativamente a velocidade de referência da mesa em resposta das flutuações nos sinais de torque. Nesse mecanismo a parte de baixa frequência ( $T_c(t)$ ) dos sinais de torque na mesa ( $-G\Gamma\theta'(0, t)$ ) associado a uma frequência de corte ( $f_c$ ) é excluída do processo de feedback para assim manter um movimento mais suave na mesa. A frequência de corte  $f_c$  é dada pela frequência da vibração de stick-slip, evitando assim uma auto-excitação do fenômeno.

A parte de alta frequência ( $T_f(t)$ ) é então usada como um feedback negativo com um coeficiente  $h$  para corrigir a velocidade de referência da mesa no controlador padrão PI. Um modelo simples do mecanismo de soft torque segundo Tucker e Wang (2003):

$$T_f(t) = -G\Gamma\theta'(0, t) - T_c(t) \quad (10)$$

$$\dot{T}_c(t) = \omega_c T_f(t) \quad (11)$$

onde  $\omega_c = 2\pi f_c$  e  $\Gamma = \frac{\pi(r_e^4 - r_i^4)}{2}$ . O processo de feedback é então modelado mantendo a forma de (7) adotando a modificação em (8):

$$\ddot{\xi}(t) = \dot{\theta}_m^{ref} - hT_f(t) - \dot{\theta}_m(t) \quad (12)$$

Aplicando o mecanismo soft torque a partir de 50 segundos de simulação obtemos o resultado representado na Fig. 3 (b).

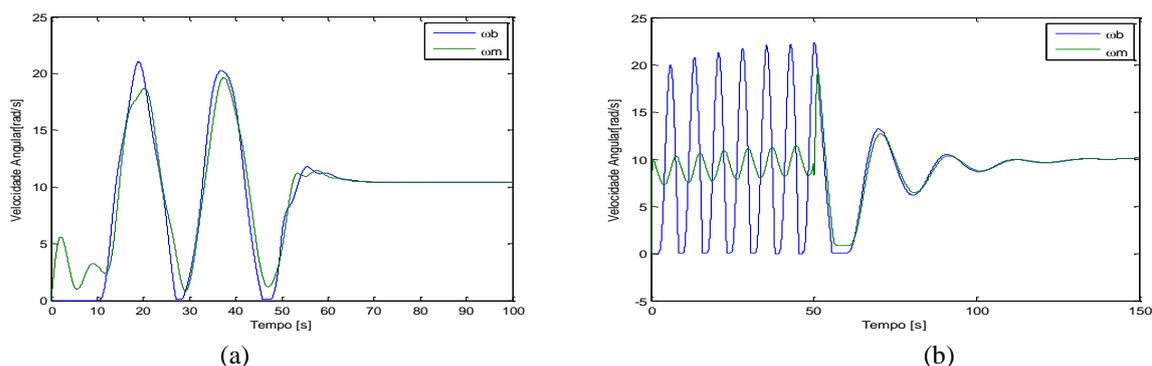


Figura 3: (a) Velocidade angular da mesa e da broca com controlador PI (0 a 50 segundos) e PI com variação do peso na broca (51 a 100 segundos); (b) Velocidade angular da mesa e da broca com soft torque aplicado aos 50 segundos de simulação.

## Resultados

O modelo dinâmico utilizado para simulação é o modelo com dois graus de liberdade devido a sua fácil implementação em MATLAB e a uma boa representação das vibrações torcionais de uma coluna de perfuração. Embora seja simplificado e desconsidere as vibrações laterais e axiais, as oscilações stick-slip podem ser observadas e estudadas com uma boa aproximação do caso real sendo assim aceitável a utilização deste modelo como base para o projeto.

O modelo de atrito mais adequado para o estudo foi o modelo de Navarro-Lopez e Suarez (2004), este modelo representa o atrito de Coulomb de maneira mais crítica, porém mais próximo do real. O fenômeno de stick-slip é evidente neste modelo, podemos enxergar a completa parada da broca e a variação do torque na broca. No entanto a implementação em MATLAB é mais complicada necessitando um método numérico de passo variável.

Com a intenção de manter a velocidade da mesa constante e cessar o stick-slip, otimizando o processo de perfuração, foram aplicadas leis de controle sobre a velocidade. Variaram-se parâmetros da lei de controle padrão PI ( $K_p$  e  $K_i$ ), de PI e peso na broca variável ( $K_w$ ) e de PI e soft torque ( $fc$  e  $h$ ). Os parâmetros foram ajustados junto ao peso aplicado sobre a broca para que houvesse a melhor taxa de perfuração possível e sem a presença de oscilações torcionais ou de forma que essas oscilações cessassem rapidamente.

Os resultados obtidos encontram-se na Tab. 1.

Tabela 1 – Resultados obtidos pela implementação do modelo dinâmico, modelo de atrito e leis de controle no programa MATLAB.

$K_p$	100	60	60	60
$K_i$	200	2700	700	450
<b>PI</b>				
$ROP_m [m h^{-1}]$	9	-	22,68	18,72
$W_{ob} [kN]$	80	-	150	130
$\Delta\omega_m [rad s^{-1}]$	1,2584	-	1,1987	1,0874
<b>PI e WOB variável</b>				
$ROP_m [m h^{-1}]$	43,92	20,52	23,76	38,16
$W_{ob_0} [kN]$	270	150	170	250
$\Delta\omega_m [rad s^{-1}]$	1,2771	0,9962	1,3107	1,9229
$K_w [kN s rad^{-1}]$	10	10	10	10
<b>Soft Torque</b>				
$ROP_m [m h^{-1}]$	9	16,56	24,48	22,68
$W_{ob} [kN]$	80	130	160	150
$\Delta\omega_m [rad s^{-1}]$	1,9222	2,6898	1,7847	1,8254
$fc [Hz]$	0,05	0,05	0,2	0,2
$h [m N^{-1} s^{-1}]$	0,005	0,005	0,005	0,005

Nos resultados mostrados na Tab. 1, foi utilizado o peso máximo na broca para que não ocorresse stick-slip e nem oscilações torcionais de grande amplitude, obtendo assim a maior taxa de perfuração possível para a lei de controle e parâmetros utilizados.

Na Tabela 1, são representadas a taxa de perfuração média ( $ROP_m$ ), peso na broca ( $W_{ob}$ ), diferença entre velocidade de referência e a velocidade da mesa média ( $\Delta\omega_m$ ), parâmetro  $K_w$  na lei PI com  $W_{ob}$  variável, parâmetros  $f_c$  e  $h$  na lei de controle PI com Soft Torque. Os valores são obtidos para cada par de  $K_i$  e  $K_p$ .

Para todos os casos temos:  $J_m = 500 \text{ kg m}^2$ ,  $J_b = 394 \text{ kg m}^2$ ,  $c = 1.00 \text{ N m s rad}^{-1}$ ,  $k = 315.316 \text{ N m}$ ,  $R_b\mu_s = 0.058 \text{ m}$ ,  $R_b\mu_c = 0.0278 \text{ m}$ ,  $D_v = 10^{-6}$ ,  $\gamma_b = 0.05$ ,  $\dot{\theta}_m^{ref} = 100 \text{ rpm}$ .

## Conclusão

De maneira geral o problema se dividiu em encontrar um modelo dinâmico que representasse satisfatoriamente os problemas em que seria focado os estudos deste projeto, o modelo de interação entre a broca e a rocha que aproximaria um caso real de atrito de Coulomb assim como o problema de stick-slip observado em poços de petróleo e o estudo de leis de controle para cessar as oscilações torcionais e otimizar o processo de perfuração.

Como apresentado, adotou-se o modelo dinâmico com dois graus de liberdade como base e utilizamos o modelo de Navarro-Lopez e Suarez (2004) para representar o torque de atrito.

Quanto às leis de controle aplicadas sobre o sistema, chega-se às seguintes conclusões:

Observando pela Tab. 1 temos que a lei de controle que melhor atuaria no sistema aumentando a taxa de perfuração sem a ocorrência de stick-slip e a diferença entre velocidade de referência e a velocidade da mesa média ( $\Delta\omega_m$ ) menor possível seria a lei de controle PI com peso na broca variável em função da velocidade de rotação da broca. Porém as variáveis do conjunto da broca, como a velocidade angular da broca, são de difícil medição e possuem um custo mais elevado. Também existem métodos para prever a parada da coluna de perfuração que ajudariam na solução do problema com estes parâmetros.

O problema se torna então encontrar meios de medir as variáveis tanto na superfície quanto no conjunto da broca. Métodos que utilizam medição na broca se tornam mais vantajosos visto que devido à distância da mesa com a broca ser grande, temos amortecimento das vibrações que ocorrem no poço impedindo os sensores na superfície receberem o sinal.

As dificuldades encontradas pelo método de variação do peso na broca em função da velocidade de rotação da broca leva a discussão dos outros métodos apresentados:

A escolha inteligente dos parâmetros PI pode causar uma perfuração com velocidades boas e alto peso na broca. Um estudo aprofundado destes parâmetros é válido, pois além de poder ser usada sozinha, influencia em outros métodos que utilizam PI como base.

O método de controle de feedback soft torque utilizado atua de forma melhorada sobre o controle PI. Dada a frequência de corte e o parâmetro  $h$  temos este agindo na absorção na frequência torcional dominante usando as características do coeficiente de reflexão das ondas torcionais na presença de soft torque. O estudo dos parâmetros para controle PI influenciará muito no desempenho do controle soft-torque se tornando mais viável que o controle PI sozinho, no entanto foi observado que conforme haja o aumento de  $K_p$ , com uma frequência de corte ajustada, a perfuração pode ocorrer melhor mesmo depois de um ponto ótimo devido às respostas rápidas na mudança da velocidade da mesa.

## Referências Bibliográficas

Christoforou, A.P. and Yigit, A.S., 2003. Fully coupled vibrations of actively controlled drillstrings, *Journal of Sound and Vibration*, 267:1029-1045.

Cull, S.J. and Tucker, R.W. 1999. [On the modelling of Coulomb friction](#), *J. Phys. A: Math. Gen.* 32: 2103-2113.

Navarro-Lopez, E.M. and Suarez, R., 2004. Practical approach to modelling and controlling stick-slip oscillations in oilwell drillstrings, In: [Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications](#): 1454-1460.

Trindade, M. A. and Sampaio, R., 2005. Active control of coupled axial and torsional drill-string vibrations. In: *Proceedings of the 18th International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto.

Trindade, M.A., Wolter, C. and Sampaio, R., 2005. Karhunen-Loève decomposition of coupled axial/bending vibrations of beams subject to impacts, *Journal Sound and Vibration*, 279(3-5): 1015-1036.

Tucker, R.W. and Wang, C., 2003. Torsional vibration control and cosserat dynamics of a drill-rig assembly, *Meccanica*, 38: 143-159.