



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

Controle de velocidade de perfuração de poços de petróleo com rejeição de carga via estimação e pré-alimentação da perturbação

Julio Elias Normey Rico¹, Alex Scheuer², Ilmor Juenge Filho³

^{1,2,3} Departamento de Automação e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina,
Cx. Postal 476, CEP 88040-900, Florianópolis – SC, Brasil.
¹julio@das.ufsc.br, ²scheuer@das.ufsc.br, ³ilmor@das.ufsc.br

Resumo – Este trabalho apresenta um algoritmo de controle para a redução das perturbações de carga na velocidade de perfuração de poços de petróleo. O sistema proposto possui um controlador de realimentação de dois graus de liberdade (um controle Proporcional Integral – PI, mais um filtro na referência) e um controlador de pré-alimentação com estimador da perturbação. O procedimento de ajuste dos parâmetros do controlador, bem como os ganhos do PI, o filtro de referência, e os filtros passa-baixa do estimador são simples e estão baseados numa modelagem empírica do motor. Resultados experimentais obtidos num protótipo de laboratório mostram que o algoritmo proposto pode reduzir significativamente o efeito das perturbações na velocidade de perfuração se comparado aos controladores tradicionais.

Palavras-Chave: perfuração de poços, controle de velocidade, estimador de perturbação

Abstract – This paper presents a control strategy to reduce the effects of the disturbances in the speed control of a petroleum drilling system. Three main parts compose the algorithm: a two degree-of-freedom feed-back PI controller (Proportional Integral), a feed-forward block and a disturbance estimator. The tuning procedure is simple and can be performed using a step-test model of the DC motor-based drilling system. A laboratory prototype is used to obtain some experimental results with the proposed controller. Some comparative results with a traditional speed controller are presented showing that the proposed strategy can considerably improve the disturbance rejection performance of the closed loop system.

Keywords: petroleum drilling system, speed controller, load estimators

1. Introdução

A perfuração de poços de petróleo é realizada através de uma sonda. Nesta operação, as rochas são perfuradas pela ação conjunta da rotação e do peso aplicado sobre a broca localizada na extremidade da coluna de perfuração. Os fragmentos de rocha produzidos neste processo são retirados continuamente do fundo do poço através da lama de perfuração. A perfuração do poço ocorre em diversas fases, caracterizadas pelos diferentes diâmetros da broca que requerem diferentes parâmetros de perfuração (rotação e peso) (Thomas et al (2001)).

Convencionalmente, os sistemas de rotação das sondas podem ser acionados de duas formas distintas: com uma mesa rotativa ou com um motor de topo (Schimdt et al (1989)). A mesa rotativa é o acionamento mais utilizado. Ela consiste da mesa propriamente dita, que é rotacionada por um motor, à qual está acoplada a *kelly*, responsável por transmitir a rotação à coluna de perfuração. O motor de topo (*top drive*) é o acionamento mais empregado em poços com elevada inclinação horizontal, sendo este conectado diretamente à parte superior da coluna de perfuração. Em ambos os sistemas, mostrados na figura 1, o acionamento é feito por motores de corrente contínua. De utilização menos freqüente, particularmente em poços direcionais, aparecem os motores hidráulicos de fundo de poço (Thomas (2001)).

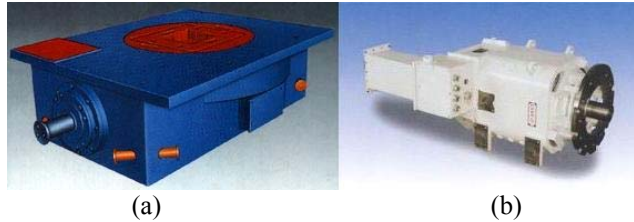


Figura 1. (a) mesa-rotativa (b) motor de topo

Dentre os parâmetros a serem ajustados na perfuração, a velocidade de rotação da coluna é um dos parâmetros que mais influencia a qualidade da perfuração e, conseqüentemente, a qualidade do poço. Assim, a partir do momento em que se definem os valores ótimos da velocidade de perfuração para uma dada etapa, é importante que durante esta ela seja mantida constante. Isto apresenta diversas vantagens, podendo-se destacar: (i) a manutenção da taxa de penetração, (ii) a redução das vibrações e choques e (iii) a minimização dos efeitos das mudanças litológicas sobre o sistema de sub-superfície, principalmente sobre a broca, a BHA (*bottom hole assembly*) e a própria coluna de perfuração.

O sistema mais comumente usado para se manter a velocidade de rotação constante, consiste na utilização de um controle realimentado (Sananikone, 1992). Quando adequadamente projetado este tipo de controle é o que apresenta também os melhores resultados. Assim, o presente trabalho propõe uma estratégia de controle da velocidade de perfuração baseada em um controlador de realimentação de dois graus de liberdade mais um controlador de pré-alimentação da estimação da perturbação. Com esta estrutura de controle consegue-se que o sistema em malha fechada siga a referência de velocidade com a dinâmica requerida e ao mesmo tempo rejeite de uma forma mais eficiente as perturbações de carga, muito comuns e prejudiciais em perfuração de poços de petróleo.

O artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 apresenta-se a problemática da perfuração de poços de petróleo. A seção 3 mostra o algoritmo de controle e a sistemática de seu projeto. Já, na seção 4, são apresentados os resultados experimentais em protótipo de laboratório e é feita a avaliação do controle proposto. O artigo finaliza apresentando as conclusões e perspectivas.

2. A Problemática da Perfuração

A perfuração de poços de petróleo é uma tarefa complexa, onde um dos fatores determinantes para manutenção das taxas de perfuração é o efetivo controle da velocidade de rotação. Variações excessivas da velocidade decorrem em diversos problemas, notadamente em vibrações. Da mesma forma, devido às perturbações de carga, vibrações originam variações de velocidade. Segundo Jardine (1994), os problemas relacionados às vibrações prejudiciais aumentam o custo de perfuração podendo representar até 10% do custo total do poço. Em casos críticos, as vibrações podem causar a parada total da sonda, o que é fortemente indesejável, visto que grande parte do equipamento utilizada é alugado, podendo custar até US\$ 300.000,00/dia.

Neste contexto, justifica-se a crescente preocupação pelo estudo da influência das vibrações sobre o processo de perfuração. Muitos estudos têm sido realizados no sentido de identificar e minimizar seus efeitos. Jardine (1994) divide as vibrações em três modos: axial, transversal e torcional. As vibrações axiais, dependendo da sua intensidade, podem causar flambagem da coluna, pancadas fortes na broca e penetração áspera, danificando a broca e o BHA e aumentando o tempo total de perfuração. As vibrações transversais (laterais) podem ocorrer sem sinais na superfície e resultam em choques da BHA contra as paredes do poço, sendo extremamente destrutivas. As vibrações torcionais acarretam rotação irregular no fundo do poço, causando fadiga nas conexões entre os comandos, perfuração lenta, avarias na broca e, em casos extremos o chamado *stick-slip*, fenômeno onde a broca chega a parar por alguns instantes (*stick*), retornando com velocidade até 10 vezes maiores que o determinado (*slip*). Vibrações torcionais correspondem à principal causa de vibrações axiais e transversais, podendo ser identificadas por flutuações na corrente necessária para manter a rotação constante na superfície.

Sendo assim, conclui-se que as maiores responsáveis por vibrações prejudiciais em perfuração são as vibrações torcionais. Recentemente, vários métodos de controle destas vibrações foram propostos (Sananikone et al. (1992)):

- modificação dos parâmetros de perfuração (velocidade de rotação e peso sobre a broca),
- modificação das propriedades lubrificantes da lama, fazendo-se decrescer a fricção estática,
- retirada de toda a coluna, substituindo-a por uma menos propensa a vibrações, e mais recentemente,
- uso de controle realimentado do torque, a alternativa mais intensamente estudada e tida como mais efetiva, conforme Halsey et al. (1988) apresentaram.

Em todas estas situações, independentemente da solução adotada para minimizar o efeito das vibrações, sempre será requerido que, durante a perfuração, a velocidade de rotação seja constante e assim, mesmo sob vibrações excessivas, manter-se-á as taxas mínimas de perfuração. Todavia, a velocidade de rotação é função de inúmeros parâmetros que determinam qual o valor ótimo para cada etapa da perfuração, entre eles pode-se citar a litologia, as limitações do motor, da coluna, ou da broca.

As perturbações presentes no processo originam-se basicamente de variações litológicas e estão intrinsecamente relacionadas às vibrações, sendo que a redução de sua influência decorre diretamente em melhora na qualidade da perfuração e minimização de danos ao equipamento. Uma maneira de reduzir sua influência é através de um controle pré-alimentado da perturbação. Como na prática esta não pode ser medida, o seu valor é estimado a partir do sinal de controle (tensão a ser aplicada sobre a armadura do motor), da saída (velocidade) e do modelo do motor.

3. Algoritmo de controle

Uma vez que a perfuração de poços de petróleo é diretamente afetada pela velocidade de rotação, tem-se que alternativas que visem seu melhor controle sempre contribuirão para o acréscimo na qualidade do poço e preservação dos equipamentos. Várias propostas de controle avançado têm sido apresentadas, contudo, esbarram na complexidade e dificuldade de obtenção de dados sobre o processo, sendo dificilmente implementáveis na prática. O controle a ser apresentado objetiva ser uma alternativa simples, de baixo custo e implementável, uma vez que não utiliza sinais adicionais, além dos já disponíveis. Pode ainda ser utilizado como parte integrante de malhas mais complexas, como a que propõe o controle realimentado do torque, por exemplo, obtendo-se ganhos significativos na redução de vibrações.

3.1 Estimação da Perturbação

Como visto anteriormente, as perturbações de carga influem negativamente no processo de perfuração de poços de petróleo. Como não são diretamente mensuráveis, dificultam a tarefa de implementação de algoritmos de controle que utilizem seu sinal. O algoritmo proposto tem por finalidade estimar tais perturbações, utilizando sinais disponíveis nas malhas de controle usuais (tensão de armadura e velocidade de rotação). De posse de um valor estimado da perturbação real, implementa-se um controlador de pré-alimentação (*feed-forward*). O objetivo deste controlador é anular o efeito da perturbação imediatamente após ser percebida na saída, de modo a melhorar a resposta transitória de rejeição de perturbações.

3.2 Implementação do algoritmo estimador de perturbações:

Para utilizar esta técnica é necessário obter o modelo do motor CC, com velocidade de rotação controlada por tensão de armadura. Este modelo pode ser obtido através de um ensaio prático (Astrom and Hagglund, 1995), observando-se a resposta ao degrau do sistema nas vizinhanças do ponto de operação ou por modelagem matemática. Optou-se por realizar ensaio prático aplicando-se variações na tensão de alimentação (armadura) do motor CC e torques de carga conhecidos.

O comportamento do motor CC, ou seja, a relação entre velocidade de rotação e a tensão de alimentação (W/V), pode ser bem aproximado por um sistema linear de segunda ordem. Já a dinâmica da relação entre velocidade e o torque de carga (W/q) apresenta um comportamento de primeira ordem. Assim, o modelo linear aproximado do motor no domínio de Laplace é mostrado na equação 1.

$$W(s) = G1(s).G2(s).V(s) + G2(s).q(s) \quad (1)$$

$$\text{onde: } G1(s) = \frac{K1}{1+s\tau1} \quad \text{e} \quad G2(s) = \frac{K2}{1+s\tau2} \quad (2)$$

Na equação 1, $W(s)$ é a saída (velocidade de rotação), $q(s)$ representa o torque de carga e $V(s)$ a tensão de alimentação. $G_1(s)$ e $G_2(s)$ podem ser interpretados aproximadamente como os modelos dos componentes eletromagnéticos e mecânicos do motor, respectivamente. Assim, τ_1 é a constante de tempo eletromagnética, $K1$ é o ganho estático eletromagnético e τ_2 é a constante de tempo mecânica, $K2$ é o ganho estático mecânico. Os valores de $K1$, $K2$, τ_1 e τ_2 foram obtidos experimentalmente.

A malha de controle resultante para o processo, utilizando somente um controlador de realimentação (Feedback), é mostrada na figura 2. A perturbação de carga (q), na perfuração de poços de petróleo, é ocasionada principalmente por vibrações, conforme mencionado no item 2. Assim, busca-se minimizar o efeito de tais vibrações através de um algoritmo de controle baseado na estimação das perturbações.

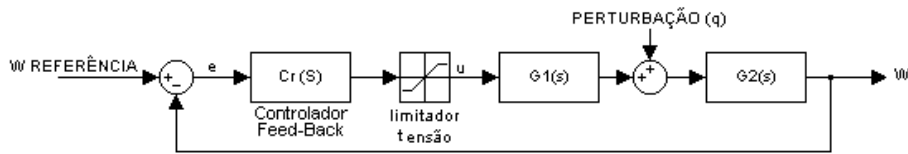


Figura 2. Malha de controle com controlador *Feed-Back*

Do sistema representado na figura 2 e da equação 1, substituindo $V(s)$ por $u(s)$, obtém-se: $W(s) = G_1(s).G_2(s).u(s) + q(s).G_2(s)$, onde $u(s)$ corresponde ao sinal de controle aplicado ao motor. Assim, a partir da medição de $u(s)$ e $W(s)$, pode-se determinar uma estimativa da perturbação $q'(s)$:

$$q'(s) = \frac{W(s) - u(s).G_1(s).G_2(s)}{G_2(s)} \quad (4)$$

Nota-se que, no caso ideal, se o modelo for perfeito, tem-se $q(s) = q'(s)$. Observa-se também que a função de transferência resultante para o estimador, equação 4, é imprópria. Para torna-la própria deve-se introduzir um filtro passa-baixa com ganho unitário na forma $1/(\tau.s + 1)$, sendo $1/\tau$ a frequência de corte, de modo a não influenciar demasiadamente em sua dinâmica. Uma vez estimada a perturbação, basta definir o controlador de pré-alimentação, designado por C_p .

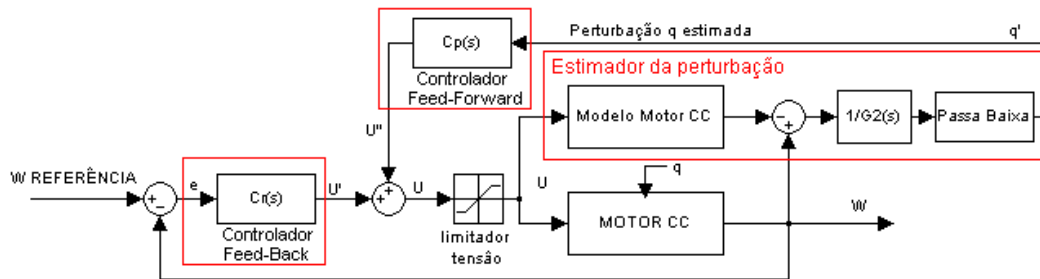


Figura 3. Malha de controle com controladores *Feed-Back* e *Feed-Forward* e estimador da perturbação

Da figura 3, obtém-se:

$$W(s) = [(q'(s).C_p(s) + u'(s)).G_1(s) + q(s)].G_2(s) \quad (5)$$

Considerando $q'(s) = q(s)$, para que a perturbação de carga $q(s)$ não afete a saída $W(s)$, faz-se:

$$C_p(s).q'(s).G_1(s).G_2(s) = -q(s).G_2(s) \quad (6)$$

$$\text{Onde, } C_p = \frac{-1}{G_1} \quad (7)$$

Novamente a função de transferência resultante, equação 7, é imprópria, recorrendo-se novamente a um filtro passa baixa para torna-la própria.

Assim, as perturbações de carga presentes no processo de perfuração podem ser estimadas utilizando-se o sinal de controle e leituras da velocidade de rotação, obtida, por exemplo, através de um tacogerador ou encoder acoplado ao eixo do motor.

4. Implementação do controle em um protótipo de laboratório

Para a validação da técnica proposta implementou-se, após simulação com modelos matemáticos, o estimador de perturbações sobre um protótipo de laboratório. Este protótipo consiste de um motor CC de baixa potência acoplado a um tacogerador, através do qual inserem-se perturbações de carga. Este sistema é ligado a uma placa de aquisição de dados e conversão AD/DA que, por sua vez, é conectada à porta paralela de um computador pessoal. O sistema utilizado para programação das estratégias de controle e visualização dos dados adquiridos é o MATLAB/SIMULINK, versão 5.3. A Placa de aquisição e conversão AD/DA, o programa em SIMULINK e o protótipo do motor CC foram desenvolvidos no DAS/UFSC.

4.1 Resultados da implementação

Inicialmente, através de ensaios de reposta ao degrau utilizando o método de Ziegler-Nichols, obteve-se o modelo matemático do motor. A figura 4 mostra a curva real e a modelada, apresentando também o modelo obtido.

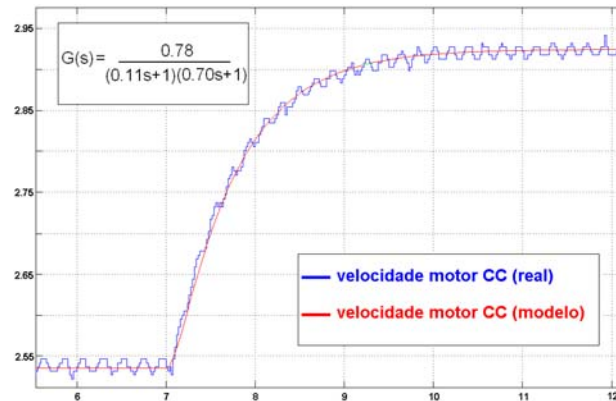


Figura 4. Resposta do motor CC e da função de transferência modelada

De posse do modelo do motor, utilizou-se o método do lugar das raízes (Ogata, 1982) para implementar um controlador PI (Proporcional Integral) para o processo. Adicionalmente, visando melhora da resposta transitória e eliminação de pico (ultrapassagem), calculou-se um filtro de referência com pólo igual ao zero do controlador PI, ambos podem ser visualizados na figura 5. O esquema de controle completo projetado também pode ser visto na figura 5, já acrescido do estimador e controlador de pré-alimentação da perturbação.

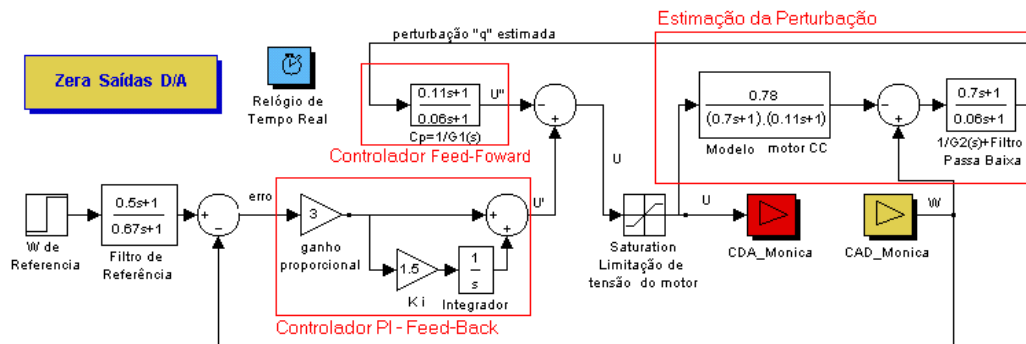


Figura 5. Malha de controle com controladores *Feed-Back* e *Feed-Forward* e estimador da perturbação.

Para avaliar o desempenho da estrutura de controle projetada foram feitos ensaios para seguimento de referência e rejeição de perturbações. A figura 6 mostra a resposta do sistema para duas mudanças do tipo degrau na referência de velocidade. Observa-se que a resposta representa a tensão de saída do tacogerador sendo esta proporcional a velocidade de rotação do motor. Na figura 6(a), tem-se a velocidade (saída) e o sinal de controle para o sistema sem estimador, enquanto na figura 6(b), são mostrados os resultados obtidos após sua inclusão. Observa-se que para o seguimento de sinais de referência, não há diferença na resposta, porém, nota-se que a inclusão do estimador torna o sinal de controle significativamente mais oscilatório.

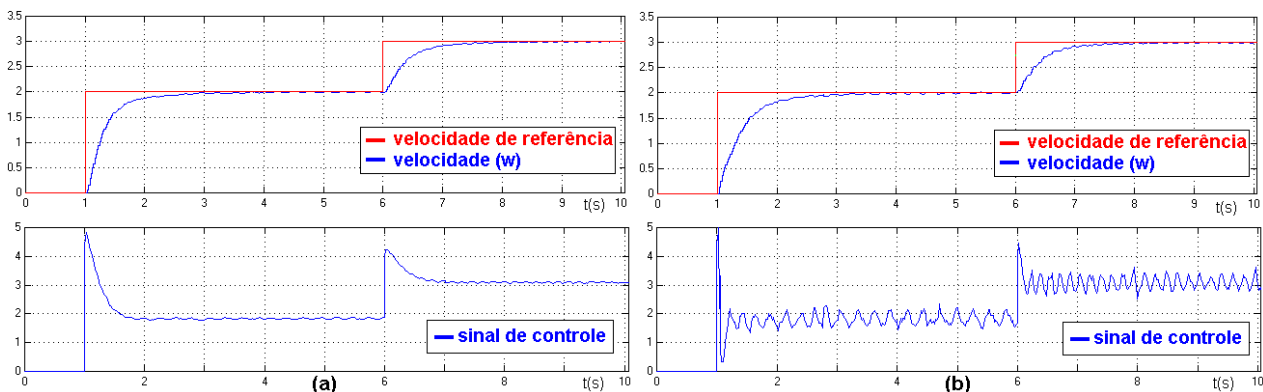


Figura 6. (a) resposta (velocidade) e sinal de controle sem estimador. (b) com estimador.

A figura 7 mostra a rejeição de perturbações de carga antes, figura 7(a), e depois, figura 7(b), da inclusão do estimador para o mesmo ajuste do controle PI. Para avaliar a rejeição de perturbações foram aplicadas varias perturbações de carga que simulavam, para a referência de velocidade analisada, o equivalente a uma redução de 20% do valor de velocidade de operação em malha aberta. Percebe-se uma sensível melhora da resposta transiente na rejeição de perturbação de carga utilizando-se o controle de pré-alimentação com o estimador da perturbação.

Comparando-se os sinais de saída, nota-se que com a estratégia proposta consegue-se reduzir a menos da metade o efeito das perturbações na velocidade. Por outro lado, observam-se oscilações na ação de controle do

algoritmo proposto que podem ser reduzidas com a utilização de filtros passa-baixa na medição da velocidade. É importante ressaltar que se não fosse necessário usar os filtros passa-baixa para tornar as funções do controlador próprias, o sistema acabaria por eliminar muito mais eficientemente as perturbações, porém, adquirindo ações de controle muito maiores. Assim, a alocação dos pólos dos filtros passa-baixa deve ser feita para atingir um compromisso entre rejeição e limitação da ação de controle.

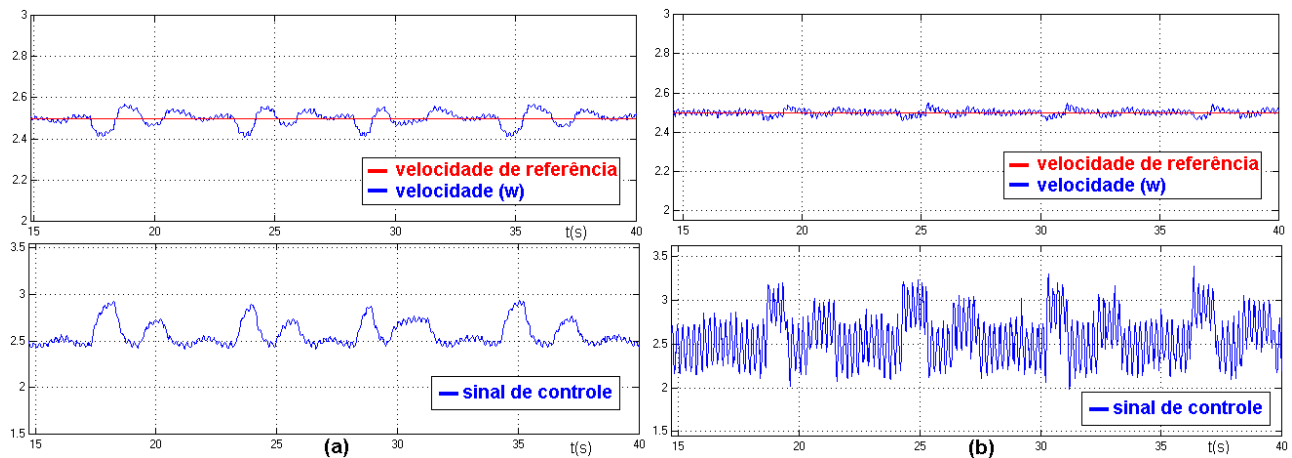


Figura 7. (a) resposta (velocidade) e sinal de controle sem estimador. (b) com estimador.

5. Conclusões

O algoritmo de controle proposto, que se compõe de um controlador de realimentação de dois graus de liberdade (PI + filtro na referência) e um controlador de pré-alimentação com estimador da perturbação, apresentou resultados significativamente melhores na rejeição de perturbações de carga se comparado a um controle de realimentação tradicional. Os ajustes dos parâmetros do controlador, tais como os ganhos do PI, o filtro de referência, e os filtros passa-baixa, são relativamente simples e utilizam apenas os dados de identificação do modelo do motor. A vantagem deste algoritmo é que utilizando os sinais já disponíveis no motor de perfuração, requer-se, adicionalmente, somente um sistema digital para implementar a lei de controle.

Como já comentado, o controle com realimentação da velocidade, aplicado à perfuração, por si só não é capaz de eliminar totalmente as vibrações e seus efeitos danosos. A lei de controle proposta neste trabalho reduz significativamente o efeito das perturbações de carga, porém resalta-se que, em situações em que parte das perturbações não é percebida como variação de velocidade na superfície, tornando-se necessário uma estratégia adicional de controle, como por exemplo, o controle realimentado do torque. O uso de controle realimentado de torque simultaneamente com a estratégia proposta torna-se uma opção especialmente interessante na perfuração de poços de petróleo. Futuras pesquisas serão direcionadas ao estudo da inclusão deste algoritmo num esquema de controle de velocidade e torque.

6. Agradecimentos

Agradecemos a Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo fomento fornecido ao PRH-34 e ao CNPq-CTPetro no projeto 460214-02-1. Também ao Depto. de Automação e Sistemas, a Universidade Federal de Santa Catarina, ao Eng. Agostinho Plucenio e a Ubirajara Franco Moreno.

7. Referências

- ASTROM, K. and HAGGLUND, T., *PID controllers: analysis design and tuning*, ISA, 1995.
- CHRISTOFOROU, A. P. and YIGIT, A. S., Active Control of Stick-Slip Vibrations: The Role of Fully Coupled Dynamics, *SPE, Middle East Oil Show*, Bahrain, 2001.
- HALSEY, G.W., KYLLINGSTAD, A. and KYLLING, A., Torque Feedback Used to Cure Slip-Stick Motion, *63rd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineer*, Houston, USA, 1988.
- JARDINE, S., MALOBE, D., SHEPPARD, M. Putting a Damper on Drilling's Bad Vibrations. *Schlumberger Oilfield Review*, 1994.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro : Prentice-Hall, 1982.
- SANANIKONE, P., KARNOSHIMA, O., WHITE, D. B. A Field Method for Controlling Drillstring Torsional Vibrations. *SPE/IADC Drilling Conference*, New Orleans, Louisiana, USA, 1992.
- SCHMIDT, G. J. and FLICKINGER, G., The Application of the Drilling Motor, *SPE/IADC Drilling Conference*, 1989.
- THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Interciência: Petrobrás, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- Manuais de utilização do MATLAB/SIMULINK.