

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

MPC baseado em Múltiplos Modelos Lineares para Controle de Poços em Operações de Perfuração com Pressão Controlada

AUTORES:

Taís de Carvalho Calado
Hermínio Soares de Carvalho Neto
Oscar A. Z. Sotomayor

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Sergipe

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

MPC Baseado em Múltiplos Modelos Lineares para Controle de Poços em Operações de Perfuração com Pressão Controlada

Abstract

While oil demand has increased, the remaining reserves of oil are increasingly difficult to be accessed and drilled. Then to get them drilled, a pressure gradient in the well must be maintained between the restrictions of the formation pressure. The pressure in the well can be controlled by restricting the flow of drilling fluid through a valve at the entrance of the well, or by manipulating the flow from the annulus, by manipulating a choke valve. In this work is it presented a novel model predictive control (MPC) strategy based on multiple local models for bottomhole pressure (BHP) control of an oil well drilling system, by manipulating the choke valve, as an alternative way to improve the operational effectiveness of the managed pressure drilling (MPD) technology. Simulation results show the good performance of the MPC based on multi-model, mainly when the drilling system is forced to operate at different BHP setpoints, when compared with the performance of conventional MPC controllers.

Introdução

Com as reservas atuais de petróleo se esgotando, é necessária a perfuração de poços mais profundos e complexos. Dados industriais indicam que 70% das atuais reservas *offshore* são economicamente imperfuráveis usando técnicas convencionais de perfuração, técnicas estas conhecidas como perfuração sobre balanceada (OBD). Assim, novas técnicas de perfuração foram desenvolvidas, as quais tomam como base a pressão do poço, podendo ser colocada uma pressão menor ou uma pressão igual ao gradiente de pressão do poço. A técnica para o primeiro caso é conhecida como perfuração sub-balanceada (UBD) e, para o segundo caso, perfuração com pressão controlada (MPD), (Shayegi, 2007).

MPD é uma nova tecnologia que usa ferramentas semelhantes às aquelas da UBD. A diferença entre os métodos é que UBD é usada para prevenir danos ao reservatório, enquanto que o propósito do MPD é solucionar os problemas da perfuração. UBD permite o influxo de fluidos da formação, pois perfura com a pressão do fluido no poço menor que a pressão de porosidade. MPD controla a pressão para ela permanecer entre a pressão dos poros e a pressão de fraturamento do reservatório. Isto é feito de modo a controlar o influxo de fluidos que possa ocorrer durante a perfuração, mas não estimula o influxo. Em conclusão, MPD melhora a habilidade de perfuração de um poço, aumenta a possibilidade de se perfurar poços que anteriormente eram ditos como imperfuráveis, reduz os problemas de perfuração ligados a pressão que geram tempo improdutivo, reduz o dano à formação, este que gera produção reduzida, e aumenta a segurança da equipe de perfuração e do meio ambiente, diminuindo a possibilidade dos influxos *kick* e *blow-out*. Finalmente, MPD pode aumentar o lucro de qualquer poço sendo perfurado por reduzir o tempo não produtivo da plataforma (Martin, 2006).

O objetivo do presente trabalho é melhorar a eficiência das operações de perfuração de poços de petróleo através do controle da pressão anular de fundo (BHP) pela manipulação da válvula *choke* de recirculação de lodo de perfuração, como técnica MPD, com o uso de um controlador preditivo (MPC) baseado em múltiplos modelos lineares. Este novo controlador MPC é desenvolvido em dois estágios. No estágio off-line, modelos lineares identificados em determinados pontos de operação são usados para construir um banco de controladores MPC sem restrições. No estágio on-line, resolve-se um problema de otimização com restrições combinando os controladores obtidos no estágio off-line. O

desempenho do MPC multi-modelos obtido é comparado com o desempenho de um MPC convencional, quando aplicados a um sistema simulado de perfuração de poço de petróleo, principalmente quando o sistema é forçado a trabalhar em diferentes pontos operação.

Sistema Simulado de Perfuração de Poço

O modelo matemático usado para simular o sistema de perfuração foi proposto por Kaasa (2007). O modelo considera um fluido de perfuração monofásico e que o poço é dividido em dois compartimentos separados, coluna de perfuração e anular, ambos conectados através de uma broca, como mostrado na Figura 1. Existe uma bomba de lodo que bombeia o lodo de perfuração para dentro da coluna de perfuração. Sob condições normais, o lodo flui através da coluna de perfuração, da broca de perfuração e do anular, saindo pela válvula *choke*. Depois da *choke* o lodo é reciclado e retorna ao reservatório de lodo. O objetivo da circulação do lodo é limpar os resíduos da perfuração e ajudar a manter o perfil de pressão correto no fundo do poço.

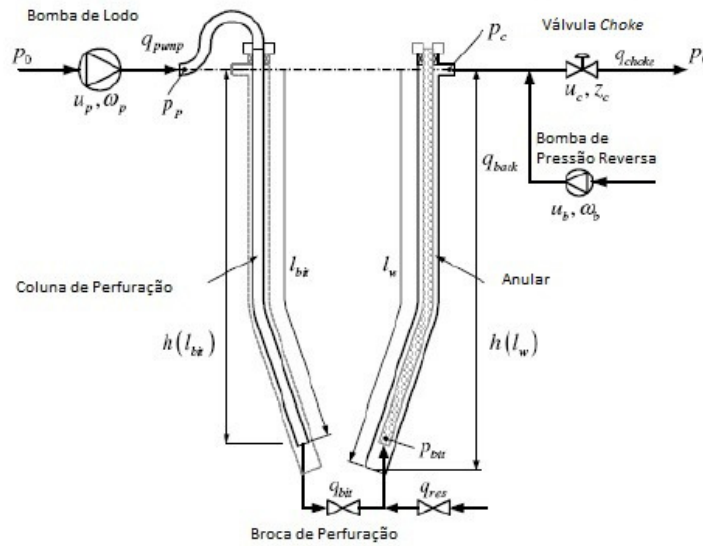


Figura 1: Sistema de perfuração

Usando relações de balanço de massa e momentum, as dinâmicas das pressões e fluxo no sistema são governadas pelas seguintes equações (Stamnes, 2007):

$$\frac{dp_p}{dt} = \frac{\beta_d}{V_d} q_{pump} - \frac{\beta_d}{V_d} q_{bit} \quad (1)$$

$$\frac{dq_{bit}}{dt} = \frac{1}{M} (p_p - p_c) - \frac{F_d}{M} |q_{bit}| q_{bit} - \frac{F_a}{M} |q_{bit} + q_{res}| (q_{bit} + q_{res}) + \frac{(\rho_d - \rho_a)g}{M} h_{bit} \quad (2)$$

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{\beta_a}{V_a} (q_{bit} + q_{res} + q_{back} - q_{choke} - \dot{V}_a) \quad (3)$$

onde p_p é a pressão da bomba de lodo e p_c é a pressão da válvula *choke*. V_d é o volume da coluna, V_a é o volume anular e $\dot{V}_a$ é a taxa de mudança de volume anular. β_d e β_a são o módulo de compressibilidade do fluido na coluna e no anular, respectivamente. q_{pump} é fluxo da bomba de lodo, q_{bit} é o fluxo através da broca, q_{back} é o fluxo da bomba de pressão reversa e q_{res} é o influxo do

reservatório. F_d é o fator de fricção da coluna e F_a é o fator de fricção do anular. ρ_d é a densidade na coluna e ρ_a é a densidade no anular. $M = M_d + M_a$, onde M_d e M_a são a densidade por metro na coluna e no anular, respectivamente. g é a aceleração da gravidade e h_{bit} é a profundidade vertical da broca.

As variáveis controlada e manipulada de interesse no sistema são a pressão anular de fundo (p_{bit}) e o fluxo da válvula *choke* (q_{choke}), definidas por:

$$p_{bit} = p_c + M_a \dot{q}_{bit} + F_a |q_{bit} + q_{res}| (q_{bit} + q_{res}) + g \rho_a h_{bit} \quad (4)$$

$$q_{choke} = K_c Z_c \sqrt{\frac{2}{\rho_a} (p_c - p_o)} \quad (5)$$

onde $Z_c \in [0,1]$ é a abertura normalizada da válvula *choke*, p_o é a pressão a jusante da válvula e K_c é a constante da válvula. Para simulação do sistema de perfuração, as equações (1)-(5) foram implementadas na plataforma computacional Simulink/Matlab®. Maiores detalhes sobre o desenvolvimento do modelo e os parâmetros de simulação, aqui omitidos, podem ser encontrados em Carvalho Neto (2010).

Para verificar o comportamento do sistema, foi realizada uma análise dinâmica do mesmo através de uma sequência de variações na entrada Z_c , em malha aberta, na forma de degrau positivo e negativo. A resposta do sistema à sequência de variações na entrada é mostrada na Figura 2. Como pode ser visualizado, existe uma relação inversa entre as variáveis de entrada e saída do sistema. Se a válvula *choke* é fechada, a pressão anular de fundo aumenta, e se a válvula *choke* é aberta, a pressão anular de fundo diminui. Embora as variações na entrada sejam simétricas, a resposta do sistema é assimétrica, relatando a não-linearidade do sistema respeito à entrada.

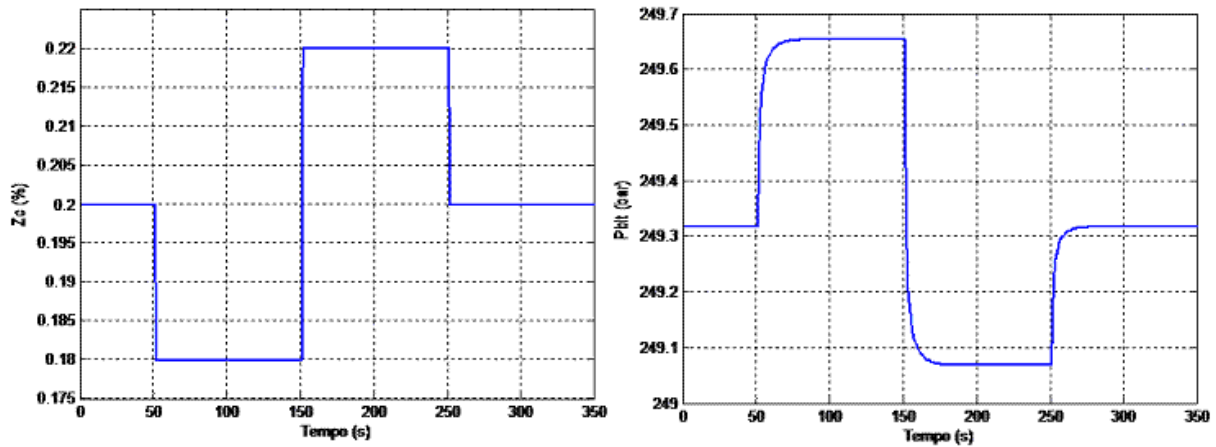


Figura 2: Resposta da pressão anular de fundo a variações na abertura da válvula *choke*

MPC Multimodelos

MPC se refere a uma classe de algoritmos de controle automático que controla a resposta futura da planta através do uso de um modelo explícito do processo. Em cada instante de amostragem, o MPC soluciona on-line um problema linear quadrático (LQ), usando o estado atual da planta como estado inicial. O resultado da otimização gera uma sequência de controle ótimo em malha aberta que é

aplicada de acordo com a filosofia de controle de horizonte móvel (RHC), onde só a primeira ação de controle desta sequência é usada, fornecendo um controlador com as características de realimentação desejadas. A Figura 3 mostra a estrutura genérica de uma estrutura MPC.

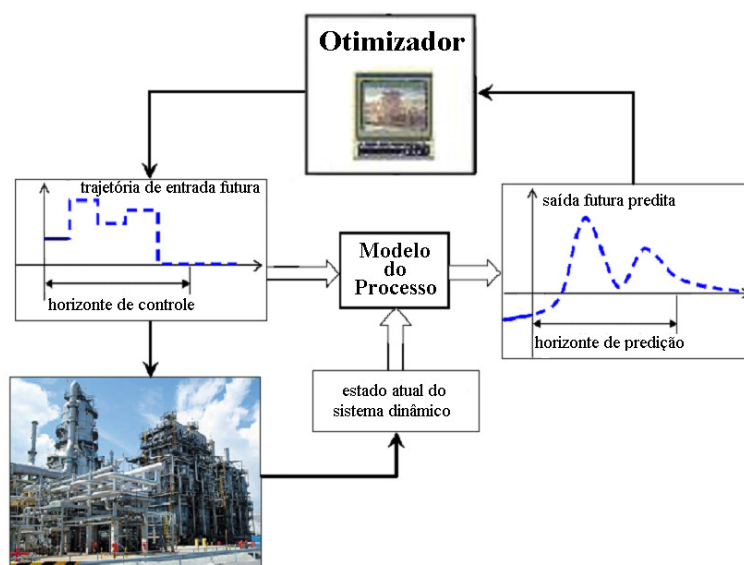


Figura 3: Estrutura geral de um sistema de controle MPC

Apesar do aparecimento de algoritmos MPC não-lineares (NMPC), a geração corrente de algoritmos MPC comercialmente disponíveis são baseados em modelos lineares (LMPC, ou simplesmente MPC). A principal vantagem do MPC se comparado ao NMPC é que o problema de otimização associado é mais simples de resolver. Porém, quando os processos têm um grau mediano ou severo de não-linearidade ou quando a faixa de operação é variável ou quando os processos experimentam transições contínuas em sua operação, necessariamente deverá ser tomado em conta o modelo não-linear no projeto de controle, de forma que permita manter a estabilidade e desempenho desejado para o sistema em malha fechada (Camacho e Bordons, 2004).

Do ponto de vista conceitual o NMPC não apresenta dificuldades significativas. No entanto, do ponto de vista prático, existem várias dificuldades na implementação do algoritmo, sobretudo no relacionado à solução de um problema de otimização não-convexo e à análise de estabilidade e robustez da solução. Por estes motivos, NMPC é ainda uma área aberta para futuros desenvolvimentos. Como uma alternativa para contornar os problemas do NMPC, vários modelos lineares são usados para representar o processo não-linear, permitindo a aplicação de controladores MPC convencionais e, portanto, aproveitando as vantagens que esse tipo de controle apresenta. Esta idéia pode ser enfocada no contexto de MPC robusto, MPC adaptativo ou MC escalonado. O custo computacional e o desempenho destes métodos estão diretamente relacionados ao número de modelos usados e aos procedimentos de ponderação deles, que em geral não são simples de generalizar (Plucenio et al., 2007).

No presente trabalho, um novo MPC baseado em múltiplos modelos é proposto, onde cada modelo linear é usado para projetar um MPC local sem restrições, os quais são combinados para gerar um MPC global com restrições. O desenvolvimento MPC multimodelos segue as mesmas idéias do procedimento de dois passos sugeridas por Sotomayor e Odloak (2006):

1) passo off-line: Identificar vários modelos lineares correspondentes a determinados pontos de operação do processo. Usar estes modelos para calcular um banco de controladores MPC sem restrições, i.e.:

$$\Delta u(k) = K_{MPC} \cdot E^o(k) \quad (6)$$

onde $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ é o incremento nas entradas, k é o instante atual de amostragem, K_{MPC} é o ganho de realimentação do controlador e $E^o(k)$ é vetor de erro entre o valor desejado e os valores previstos se não houver nenhuma ação de controle futura. Dado n modelos lineares, designar $K_{MPC,j}$ o controlador correspondente ao modelo j ($j = 1, 2, \dots, n$)

2) passo on-line: Combinar os controladores locais em um controlador global, por uma combinação convexa de fatores de ponderação $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$. Para isto, em cada período de amostragem calcular o erro E^o e encontrar a solução do seguinte problema de otimização:

$$\min_{\beta_1, \dots, \beta_n, \delta_u} \sum_{i=1}^p e(k+i)^T Q e(k+i) + \sum_{j=1}^m \Delta u(k+j-1)^T R \Delta u(k+j-1) \quad (7)$$

sujeito a:

$$\Delta u(k) = [\beta_1 K_{MPC,1} + \beta_2 K_{MPC,2} + \dots + \beta_n K_{MPC,n}] \cdot E^o(k) + \delta_u \quad (8)$$

$$\sum_{j=0}^n \beta_j = 1 \quad (9)$$

$$0 \leq \beta_j \leq 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$-\infty \leq \delta_u \leq \infty \quad (11)$$

$$-\Delta u_{\max} \leq \Delta u(k+j-1) \leq \Delta u_{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$u_{\min} \leq u(k+j-1) \leq u_{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

sendo Q e R matrizes diagonais de ponderação, p é o horizonte de predição, m é o horizonte de controle e δ_u o vetor de variáveis de folga. As variáveis de folga foram introduzidas na ação de controle para contornar o problema de um custo ilimitado, devido à inclusão de todos os modelos do processo, ou inviabilidade do problema de controle, garantindo desta forma que o controlador encaminhe a planta a seu respectivo *setpoint*.

Note-se que o problema de otimização (7)-(13) pode ser facilmente solucionado em cada instante de amostragem, usando algoritmos QP convencionais. Do resultado da otimização, só a primeira ação de controle do vetor Δu é aplicada na planta. A aplicação sucessiva desta lei de controle produz um sistema em malha fechada assintoticamente estável.

Metodologia

O primeiro passo na implementação do MPC multimodelos para o sistema de perfuração é identificar o banco de modelos lineares. Neste caso, 10 modelos lineares, na forma de funções de transferência, foram obtidos para 10 diferentes pontos de operação.

O sistema de perfuração sob MPC multimodelos é avaliado para uma sequência de variações no *setpoint* da pressão anular de fundo, e seu desempenho é comparado com o desempenho obtido

estado o sistema sob MPC convencional, baseado em um só modelo linear. Para possibilitar a comparação, os parâmetros de sintonia tanto do MPC convencional como do MPC multimodelos são os mesmos. Por falta de espaço, os modelos lineares e os parâmetros de sintonia dos controladores não serão apresentados.

No entanto, a partir dos modelos lineares identificados pode-se concluir que o processo é uma mistura complexa de sistemas rápido e lentos, com variações de ganhos grandes e pequenos. Estes modelos cobrem toda a faixa de operação do sistema e a combinação deles pode representar o modelo não-linear do processo.

Resultados e Discussão

A Figura 4 mostra o desempenho do sistema perante mudanças no setpoint da pressão anular de fundo, quando controlado com o MPC multimodelos e com o MPC convencional baseado no modelo 5. Embora o MPC convencional seja menos oscilatório a mudanças positivas do ponto de operação, o MPC multimodelos é mais rápido quando submetidos a mudanças negativas do setpoint. A Figura 5 ilustra a contribuição de cada controlador sem restrições e, em consequência, de cada modelo linear na atuação do MPC multimodelos. Esta figura mostra que os primeiros 7 modelos são continuamente ativados para compor o MPC global.

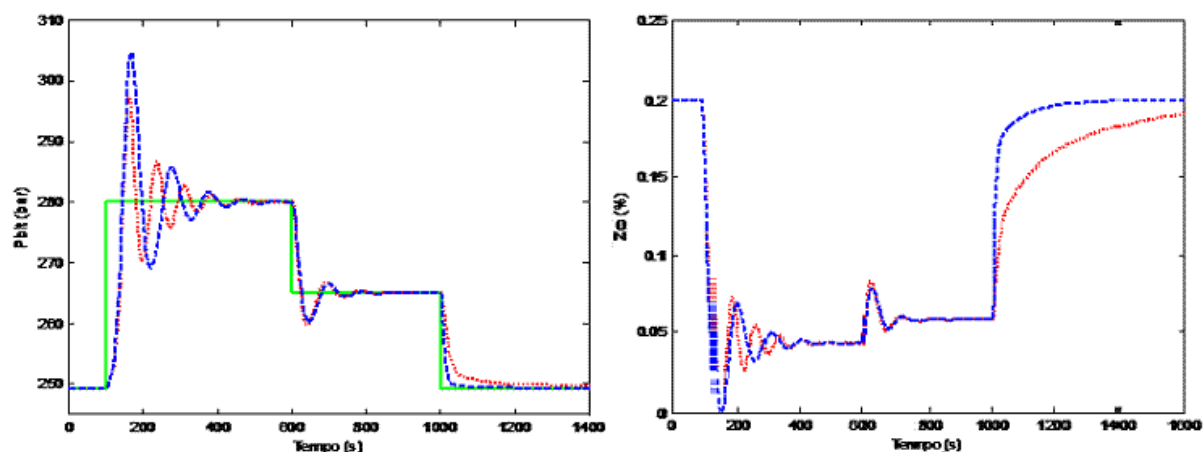


Figura 4: Comparação da resposta do sistema a variações no *setpoint* com controlador MPC multimodelos e MPC convencional baseado no modelo 5

A Figura 6 mostra o desempenho do sistema de perfuração submetido a mudanças no ponto de operação da pressão anular de fundo, quando controlado com o MPC multimodelos e com o MPC convencional baseado no modelo 2. A resposta do MPC convencional é muito suscetível a mudanças positivas do setpoint, ela é mais oscilatória que se comparada à resposta do MPC multimodelos à primeira mudança negativa do setpoint, e similar a do MPC multimodelos na última mudança negativa do setpoint. Embora o desempenho do MPC convencional nesta última resposta seja muito boa, a ação de controle do MPC multimodelos é mais conservativa.

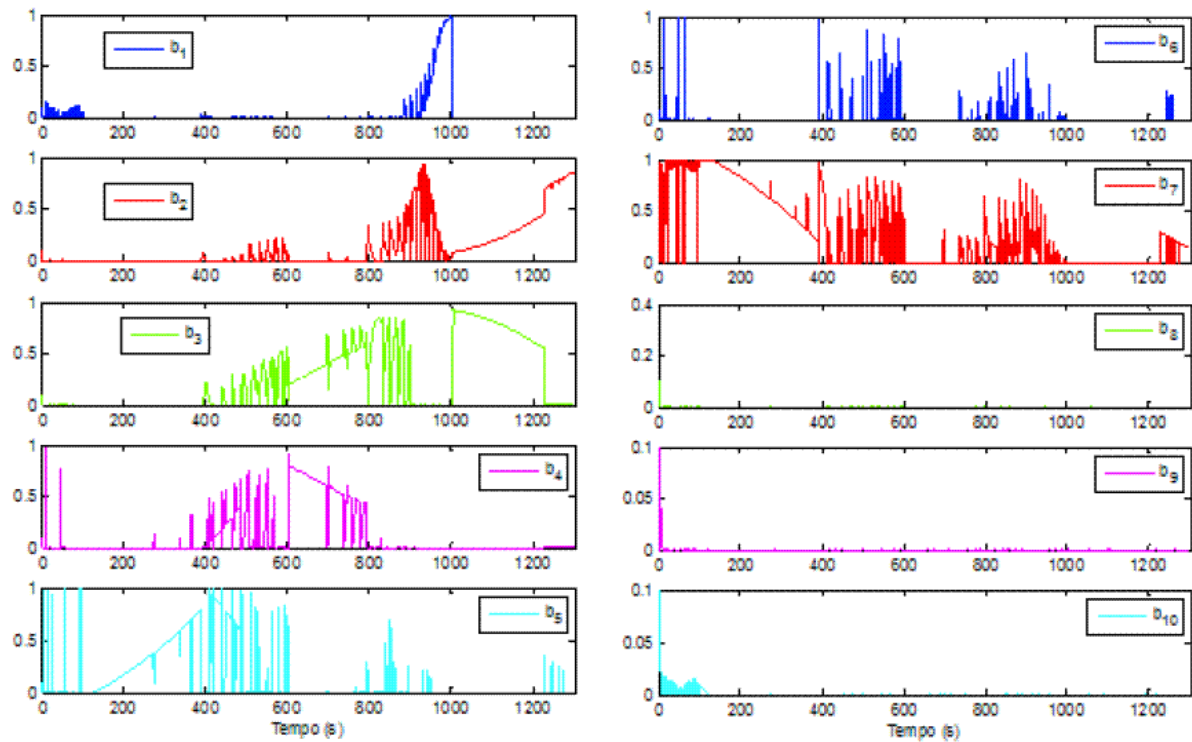


Figura 5: Contribuição de cada controlador MPC sem restrições na composição do MPC multimodelos

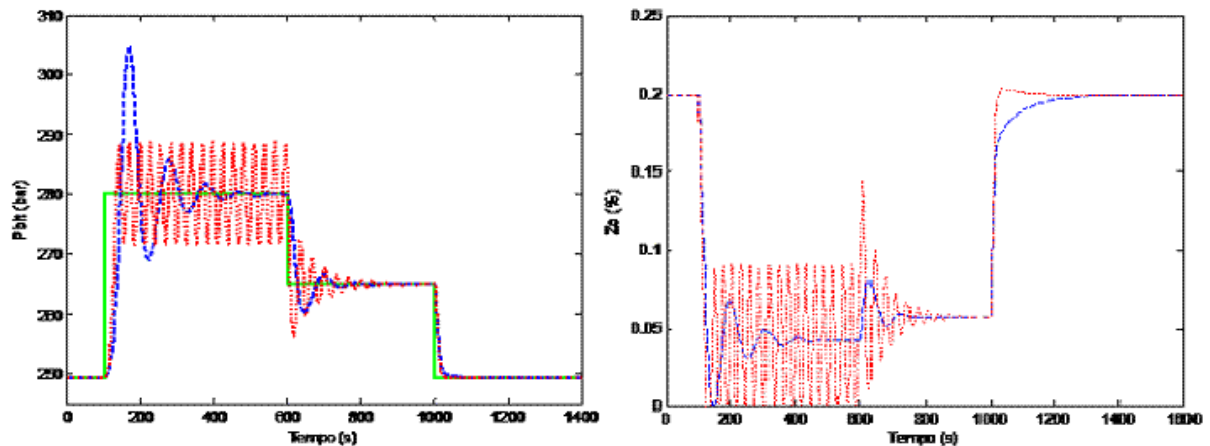


Figura 6: Comparação da resposta do sistema a variações no *setpoint* com controlador MPC multimodelos e MPC convencional baseado no modelo 2

Conclusões

Durante a perfuração de um poço, a pressão anular de fundo de poço deve ser precisamente controlada. A válvula *choke* é utilizada para o controle da pressão anular. Este trabalho apresentou uma estratégia de controle MPC baseado em múltiplos modelos lineares para estabilizar a pressão anular, como forma de melhorar a eficiência da técnica MPD.

A diferença de outros controladores MPC multi-modelos disponíveis na literatura, o controlador apresentado neste trabalho usa os modelos locais para construir um banco de

controladores MPC sem restrições, os quais são combinados de forma convexa para gerar um controlador MPC com restrições, cuja aplicação produz um sistema em malha fechada assintoticamente estável.

Os resultados das simulações mostram a efetividade e maior desempenho do MPC multimodelos proposto no controle do sistema de perfuração de poço, quando comparado ao desempenho de um MPC convencional baseado num único modelo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do PRH-ANP 45.

Referências Bibliográficas

Carvalho Neto, H. S (2010). *Controle Preditivo Multi-modelos da Pressão Anular de Fundo na Perfuração de Poços de Petróleo*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Sergipe.

Camacho, E. F.; Bordons, C (2004). *Model Predictive Control*. Springer-Verlag, Londres.

Kaasa, G.-O (2007). *A Simple Dynamic Model of Drilling for Control*, Technical Report, StatoilHydro Resarch Centre Porsgrunn.

Martin, M.D (2006). *Managed Pressure Drilling Techniques and Tools*. Texas, A&M University.

Plucenio, A. *et al.* (2007). *Controle Preditivo Não Linear na Indústria do Petróleo e Gás*. 4º PDPETRO, Campinas-SP, Brazil.

Sotomayor, O.A.Z.; D.; D. Odloak (2006). Performance assessment of model predictive control systems. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes* (ADCHEM 2006), Gramado-RS, Brazil.

Shayegi, S (2007). *Underbalanced Drilling and Managed Pressure Drilling –Two Methods for Optimising Drilling* . Exploration & Production, Oil & Gas Review.

Stamnes, N. Ø (2007). *Adaptive Observer for Bottomhole Pressure During Drilling*. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology.