

CONTROLE PREDITIVO COM RESTRIÇÕES PARA CONTROLE DE NÍVEL DO TANQUE DE UMA PLANTA-PILOTO INDUSTRIAL

ANDERSON TIAGO DE MORAES*, FERNANDA QUELHO ROSSI*, ROBERTO KAWAKAMI HARROP GALVÃO*, KARL HEINZ KIENITZ*

*Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, CEP 12228-900
Divisão de Engenharia Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica
São José dos Campos, SP, Brasil

Emails: andtiago@ita.br, fer.grossi@gmail.com, kawakami@ita.br, kienitz@ita.br

Abstract— This paper is concerned with the application of DMC (*Dynamic Matrix Control*) predictive controllers to an industrial pilot-plant. Using OPC (*Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control*) protocol, the process tank level of the pilot-plant is controlled to follow a reference signal. The advantages regarding the restriction of control excursion are analyzed, and also, the response of the system subject to perturbations.

Keywords— Constrained Predictive Control, Dynamic Matrix Control, Quadratic Programming.

Resumo— Este artigo mostra a aplicação de controladores preditivos do tipo DMC (*Dynamic Matrix Control*) em uma planta-piloto industrial. Por meio do protocolo de comunicação OPC (*Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control*), o controle de nível do tanque de processo de uma planta-piloto industrial é controlado para acompanhar um sinal de referência. São analisadas as vantagens referentes à utilização de restrições na excursão de controle, bem como as respostas do sistema sujeito a perturbações.

Keywords— Controle Preditivo com Restrições, Dynamic Matrix Control, Programação Quadrática.

1 Introdução

A busca por controladores mais eficientes, visando menores custos, melhor competitividade e melhor segurança, vem despertando grande interesse no ramo industrial por Controle Preditivo baseado em Modelo (“*Model-based Predictive Control*” - MPC). A característica marcante do MPC é o tratamento sistemático de restrições, que permite a possibilidade de determinar o controle ótimo dentro de um conjunto de restrições físicas impostas pelo processo, que podem ser em atuadores (e.g. excursão e taxa de variação), em variáveis controladas, ou definidas por requisitos de segurança e/ou qualidade.

No final dos anos 70, a apresentação do *Model Predictive Heuristic Control* (MPHC), por Richalet et al. (1978), e a do *Dynamic Matrix Control* (DMC), por Cutler and Ramaker (1980) da Shell Oil Co, entre outros artigos, foram marcos iniciais no uso de MPC na indústria. Posteriormente, a capacidade do MPC de alcançar sistemas de controle altamente eficientes, determinando uma condição favorável de operação mesmo em situações adversas, vem mostrando um rápido progresso em pesquisas acadêmicas e aplicações industriais (Qin and Badgwell, 2003). No ramo industrial, a técnica do tipo DMC está se mostrando amplamente aceita devido à simplicidade dos algoritmos e do uso do modelo da resposta a degrau que, embora possuam muito mais parâmetros do que as formulações em espaço de estados, requerem menos informações a priori para a caracterização da dinâmica do sistema. Nesta técnica, o modelo de processo dinâmico é explicita-

mente usado para prever o efeito das futuras ações de controle na saída, determinadas pela minimização do erro predito sujeito a restrições operacionais. A minimização de erros futuros da saída faz com que os resultados obtidos sejam satisfatórios para muitos processos. Recentemente, novas aplicações utilizando DMC têm sido apresentadas (Tipi, 2008), (Chen, Dong and Jia, 2009), (Kim et al., 2010), (Xiong et al., 2012).

As necessidades de melhorias e de criação de um padrão nas tecnologias de comunicação para troca de dados entre dispositivos de diferentes fabricantes deram origem ao protocolo de comunicação OPC (*Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control*) (OPC Foundation, 1998). Devido à larga utilização deste protocolo na área de automação industrial e a facilidade de programar/implementar controladores em MATLAB, o uso do protocolo OPC para aplicações em experimentos no meio acadêmico (Duarte, Figueiredo and Corrêa, 2006), (Graves, 2010), vem se tornando interessante para o conhecimento da tecnologia moderna.

A contribuição principal deste artigo é a avaliação de resultados práticos obtidos em um processo industrial típico, empregando-se estratégias de controladores preditivo do tipo DMC em conjunto com um o protocolo OPC. Apresenta-se um sistema de controle para acompanhamento de um sinal de referência relativo ao nível do tanque da planta-piloto. Com este intuito, são feitos procedimentos de aquisição da resposta a degrau da planta e de controle, com a possibilidade deste estar sujeito a restrições. A interface entre a unidade

na qual é executado a rotina de controle e a planta é realizada por meio do protocolo OPC, que permite a troca de informação em tempo real.

O artigo está organizado da seguinte forma. Inicialmente, na Seção II, apresenta-se a descrição do processo estudado. Na Seção III, são introduzidos os fundamentos da técnica de controle preditivo DMC e o tratamento de restrições. O projeto dos controladores preditivo DMC desenvolvidos são apresentados na Seção IV. A seguir, são exibidos os resultados apresentados pela planta-piloto controlada, na Seção V. Finalizando, a conclusão e as perspectivas de futuros trabalhos são apresentadas na Seção VI.

2 Descrição do Processo

Devido ao MPC ser usado largamente em processos industriais, o uso de uma planta-piloto industrial é extremamente relevante, pois permite contato com características de tais processos. Desta forma, utilizou-se nesse trabalho a planta industrial Yokogawa, composta de dispositivos de acionamento, de instrumentação e de redes de comunicação compatíveis com os que são utilizados atualmente na área de automação com redes industriais, como inversor de frequência, controlador lógico programável (CLP), motobomba, transmissores de sinais, entre outros, tornando-se um ambiente representativo da realidade industrial. Esta planta permite ensaios de processos industriais que envolvam controle de temperatura, de vazão e controle de nível, sendo abordado neste trabalho o controle de nível. As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, a seção utilizada da planta e o diagrama esquemático da mesma.

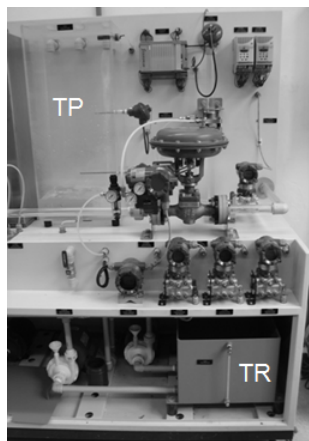


Figura 1: Planta industrial Yokogawa.

A instrumentação é composta de sensores discretos de nível no tanque reserva (TR) e um transmissor de nível baseado em medidas diferenciais de pressão no tanque de processo (TP). A vazão Q_1 refere-se ao enchimento de TR, o qual é comandado por um sistema de comando elétrico independente do CLP, composto de uma válvula solenoide

(liga/desliga) na tubulação de entrada do tanque, que obstrui ou permite a passagem do fluido, e de sensores de nível mínimo e máximo da altura do tanque, respectivamente 60% e 95%, determinando que o nível do fluido no tanque fique dentro de uma faixa projetada, condição necessária devido às condições operacionais da bomba e do processo. O enchimento de TP é realizado com a vazão Q_2 , sendo esta a transferência de água do TR para o TP. A vazão Q_2 é gerada pela bomba de enchimento (BE) acionada por um motor trifásico assíncrono que é comandado por um inversor de frequência. Este, por sua vez, recebe o sinal de controle do CLP em conjunto com o PC (computador pessoal), que é responsável pelo processamento da rotina de controle implementada. Além disso, o tanque de processo possui uma tubulação de saída com vazão indicada por Q_3 .

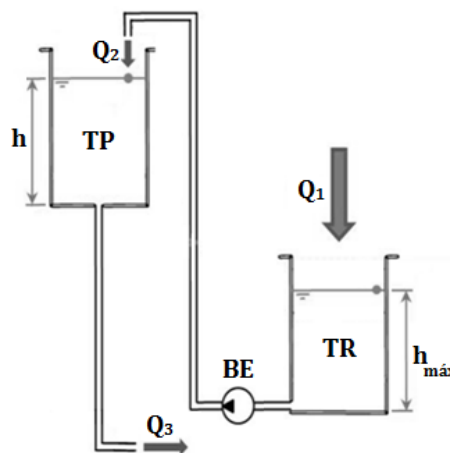


Figura 2: Seção simplificada da planta a ser controlada.

2.1 Protocolo OPC

Em meados da década de 1990, as necessidades de melhorias e de criação de um padrão nas tecnologias de comunicação para troca de dados entre dispositivos de diferentes fabricantes, em especial na área de automação industrial, deram origem ao protocolo OPC. Conforme exposto em (OPC Foundation, 1998), o primeiro padrão, chamado Especificação OPC (atualmente, Especificação de Acesso a Dados), resultou da colaboração de vários dos principais fornecedores de automação de todo o mundo que trabalham em cooperação com a Microsoft. Originalmente baseado nas tecnologias OLE COM (*Component Object Model*) da Microsoft e DCOM (*Distributed Component Object Model*), a especificação definiu um conjunto padrão de objetos, interfaces e métodos para uso em aplicações de controle de processo e de automação de manufatura para facilitar a interoperabilidade. A especificação OPC DA (*Data Access*) detalha regras para a troca de dados em tempo real entre clientes e servidores

OPC. Desta forma, os servidores OPC se comunicam com os dispositivos, fazendo a aquisição de dados, e disponibilizam essas informações para os clientes OPC que neles se conectarem.

A larga utilização do protocolo OPC na área de automação industrial e a possibilidade de programar/implementar controladores em MATLAB fazem com que o uso da arquitetura mostrada na Figura 3 torne-se muito interessante nas atividades acadêmicas, em especial para propagar tal tecnologia.

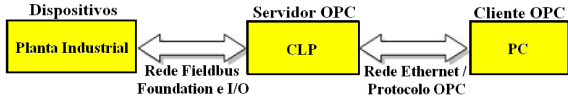


Figura 3: Arquitetura do sistema usando OPC.

3 Técnica de Controle Preditivo DMC

Desenvolvida na indústria de refino de petróleo ao final da década de 1970 por Cutler e Ramaker (1980) da Shell Oil Co., a técnica de controle conhecida como *Dynamic Matrix Control* (DMC) tem sido amplamente aceita no ramo industrial, principalmente nas indústrias petroquímicas (Qin and Badgwell, 2003). Esta técnica tem como principais características o uso de função de custo quadrática, modelo de resposta a degrau e correção de perturbações de saída constantes.

A informação requerida sobre a planta é a resposta a degrau amostrada $g(n)$, $n = 1, \dots, N_S$. Assume-se que $g(0) = 0$ e $g(n) = g(N_S)$, $\forall n \geq N_S$, sendo N_S suficientemente grande para que $g(N_S + i) \cong g(N_S)$, $i > 0$.

A função de custo utilizada, em notação vetorial, é dada por:

$$J(\hat{\mathbf{y}}, \Delta \hat{\mathbf{u}}) = (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{r})^T (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{r}) + \rho \Delta \hat{\mathbf{u}}^T \Delta \hat{\mathbf{u}}, \quad (1)$$

onde

$$\hat{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \hat{y}(k+1|k) \\ \hat{y}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+N|k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} r(k+1) \\ r(k+2) \\ \vdots \\ r(k+N) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\Delta \hat{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k|k) \\ \Delta \hat{u}(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k+M-1|k) \end{bmatrix}$$

sendo $\hat{\mathbf{y}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ a saída predita, $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ o sinal de referência futura da planta, ρ o fator de ponderação de controle e $\Delta \hat{\mathbf{u}} \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ o vetor através do qual se podem determinar as entradas futuras definidas pela lei de controle. As predições podem ser computadas ao longo do horizonte de predição ($k = 1, \dots, N$), considerando M ações de controle (horizonte de controle) com $\Delta \hat{u}(k+i|k) = 0$, $M \leq i < N$. Tem-se que $\hat{\mathbf{y}}$ e $\Delta \hat{\mathbf{u}}$ não são

independentes. A relação entre eles é dada pelo Modelo de Predição, o qual na formulação DMC é obtido com base na resposta a degrau da planta, sendo dado por:

$$\hat{\mathbf{y}} = G \Delta \hat{\mathbf{u}} + \mathbf{f} \quad (3)$$

sendo G a “Matriz Dinâmica”, matriz com formato Toeplitz baseada nos elementos da resposta a degrau da planta $g(n)$, dada por

$$G = \begin{bmatrix} g(1) & 0 & \dots & 0 \\ g(2) & g(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g(M) & g(M-1) & \dots & g(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(N) & g(N-1) & \dots & g(N-M+1) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

e $\mathbf{f} = [f(k+1) f(k+2) \dots f(k+N)]^T$ a “resposta livre” da planta, isto é, a parte da resposta que não depende das futuras ações de controle, que é dada por

$$f(k+i|k) = y(k) + \sum_{n=1}^{N_S} (g(n+i) - g(n)) \Delta u(k-n), \quad (5)$$

com $i=1,2,\dots,N$. Vale salientar que o símbolo $\hat{}$ está sendo usado para destacar as variáveis envolvidas no problema de otimização. De acordo com essa convenção, $f(k+i|k)$ não recebe o destaque $\hat{}$ por ser uma constante no problema de otimização.

O problema de otimização a ser resolvido no instante k consiste na minimização da função de custo sujeito à Equação de Predição. Se não há restrições, a solução ótima da minimização do custo $J(\hat{\mathbf{y}}, \Delta \hat{\mathbf{u}})$ resulta em:

$$\Delta \hat{\mathbf{u}}^* = (G^T G + \rho I)^{-1} G^T (\mathbf{r} - \mathbf{f}) \quad (6)$$

Como usual em controle preditivo, apenas o primeiro elemento do vetor $\Delta \hat{\mathbf{u}}^*$, isto é, o incremento de controle atual $\Delta \hat{u}^*(k|k)$, é usado para compor o sinal de controle. A partir deste incremento, obtém-se a entrada de controle usada na planta:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta \hat{u}^*(k|k) \quad (7)$$

A tarefa de otimização é repetida passo a passo, a cada período de amostragem.

3.1 Tratamento de Restrições - Caso SISO

Os três tipos básicos de restrições são: restrições sobre a variação do controle $\Delta \hat{\mathbf{u}}$, restrições sobre a excursão do controle $\hat{\mathbf{u}}$ e restrições sobre a excursão da saída $\hat{\mathbf{y}}$. Todas essas restrições podem ser expressas em termos de $\Delta \hat{\mathbf{u}}$, (Camacho and

Bordons, 2004), e em seguida, formula-se o conjunto de restrições na forma:

$$S\Delta\hat{\mathbf{u}} \leq \mathbf{b} \quad (8)$$

Ou seja, deve-se minimizar uma função de custo quadrática sujeita a um conjunto de restrições do tipo desigualdades lineares. Trata-se de um Problema de Programação Quadrática (PPQ).

Neste trabalho adotou-se uma restrição na excursão do controle $\hat{\mathbf{u}}$, a qual é dada por

$$u_{min} \leq \hat{u}(k+i-1|k) \leq u_{max}, \quad i = 1, \dots, M \quad (9)$$

Vale notar que quando o modelo adotado for linearizado em torno de um valor de equilíbrio \bar{u} para o controle, os limites u_{min} e u_{max} correspondem às diferenças com respeito a \bar{u} .

Como (8) depende de $\Delta\hat{\mathbf{u}}$ é necessário reformular as restrições de $\hat{\mathbf{u}}$ em termos de $\Delta\hat{\mathbf{u}}$. Tal reformulação pode ser feita através da relação entre \hat{u} e $\Delta\hat{u}$, dada pela expressão (7). Assim, deixando $\hat{\mathbf{u}}$ em função de $\Delta\hat{\mathbf{u}}$ obtêm-se

$$\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{1}_M u(k-1) + \mathbf{T}_M \Delta\hat{\mathbf{u}} \quad (10)$$

que é equivalente a

$$\begin{bmatrix} \hat{u}(k|k) \\ \hat{u}(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{u}(k+M-1|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(k-1) \\ u(k-1) \\ \vdots \\ u(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\hat{u}(k|k) \\ \Delta\hat{u}(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta\hat{u}(k+M-1|k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Substituindo (10) em (9), e fazendo uma reconfiguração, resulta-se na seguinte restrição:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}_M \\ -\mathbf{T}_M \end{bmatrix} \Delta\hat{\mathbf{u}} \leq \begin{bmatrix} \mathbf{1}_M [u_{max} - u(k-1)] \\ \mathbf{1}_M [u(k-1) - u_{min}] \end{bmatrix} \quad (12)$$

correspondente à forma requerida em (8). O termo $\mathbf{1}_M$ corresponde a um vetor coluna unitário com M linhas.

Usando o modelo de previsão (3) e a função de custo (1) em conjunto com a restrição (12), obtêm-se um Problema de Programação Quadrática (PPQ), que pode ser formulado como (Camacho and Bordons, 2004):

$$\begin{aligned} \min_{\Delta\hat{\mathbf{u}} \in \mathbb{R}^M} J(\Delta\hat{\mathbf{u}}) &= \frac{1}{2} \Delta\hat{\mathbf{u}}^T \mathcal{H} \Delta\hat{\mathbf{u}} + \mathbf{c}^T \Delta\hat{\mathbf{u}} + \mathbf{cte} \\ \text{sujeito a (12).} \end{aligned} \quad (13)$$

Sendo $\mathcal{H} = 2(G^T G + \rho I)$ e $\mathbf{c} = 2G^T(\mathbf{f} - \mathbf{r})$.

4 Projeto dos controladores

O sistema de controle projetado para a Planta Yokogawa teve como objetivo fazer com que a variável controlada acompanhasse um sinal de referência constante igual a 25% da altura do TP, isto é, $h_{ref} = 25\%$, sendo 100% da altura do TP igual a 80cm. Tratando-se de um sistema estável em malha aberta, condição necessária para aplicação do DMC, e de um sistema não linear, inicialmente foi feita a escolha de um ponto de equilíbrio referente ao nível do tanque de processo $\bar{h} = 12.25\%$, obtido através de uma entrada \bar{u} igual a 60% da rotação nominal do conjunto motobomba no processo, sendo 100% da rotação nominal igual a 2020rpm.

A caracterização da dinâmica da planta foi feita utilizando-se a resposta a degrau, mostrada na Figura 4. A partir do ponto de equilíbrio $\bar{u} = 60\%$, aplicou-se como excitação uma entrada $\bar{u} = 65\%$, ou seja, um degrau de 5%. Com a resposta a degrau obtida, em conjunto com a sintonia de parâmetros do DMC mostrada em (Dougherty and Cooper, 2003), foi possível fazer a escolha dos seguintes parâmetros: tempo de amostragem $T = 5s$; horizonte de previsão $N = 41$; horizonte de controle $M = 9$; e peso do controle $\rho = 0.12$.

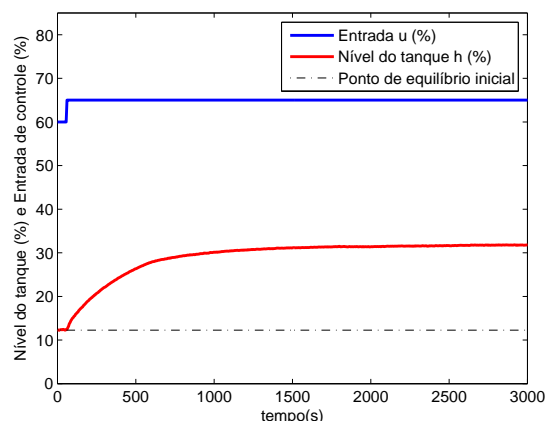


Figura 4: Resposta a degrau da planta em malha aberta.

Após a identificação da planta, iniciou-se o projeto de controle da planta. Com o sistema em torno do ponto de equilíbrio, estabelecido previamente, projetaram-se dois tipos de controladores DMC para o controle de nível do tanque de processo da planta, visando o acompanhamento do sinal de referência $h_{ref} = 25\%$. Devido à excursão do controle u ter limitações inferior e superior, foram considerados os valores mínimo e máximo como sendo $u_{min} = 40\%$ e $u_{max} = 80\%$, respectivamente. O valor de u_{min} foi atribuído com base nos dados de operação da bomba em conjunto com o processo, garantindo a rotação mínima da bomba BE para vencer a coluna d'água presente na tubulação de recalque. Já o valor de u_{max} foi atribuído como uma possível restrição requerida para operação, fato tipicamente solicitado

em processos industriais .

Em princípio, foi tratada a restrição na excursão do controle u no projeto do controlador DMC, conforme mostrado na Seção 3.1. A resolução em cada intervalo de amostragem do Problema de Programação Quadrática, sujeito ao conjunto de restrições (8), foi feita através do uso da função “quadprog” no software MATLAB.

Com o intuito de analisar o benefício do uso de um controlador DMC com restrição no controle, realizou-se um ensaio do sistema usando um DMC sem restrições considerando uma saturação no sinal de controle. Admitiram-se os mesmos limitantes adotados no caso anterior. Este novo controlador foi projetado conforme mostrado na Seção 3. Para compor os elementos da matriz G , na equação (4), utilizaram-se os elementos amostrados da resposta a degrau da planta, sendo G devidamente truncada nos valores dos parâmetros N e M .

Por último, a fim de verificar o comportamento do sistema em condições adversas não consideradas no projeto, submeteu-se a planta controlada por um DMC com restrição a uma perturbação momentânea, através do fechamento da válvula de saída do TP por 10 segundos.

Utilizando-se a configuração da especificação OPC DA (Data Access) do Toolbox Matlab, estabelecida em (Graves, 2010), e com a disponibilidade do software OPC no CLP e no PC, foi possível fazer a comunicação em tempo real entre o PC (cliente OPC) e o CLP (servidor OPC).

5 Resultados

Na Figura 5 são apresentados o sinal de controle u_{restr} e a resposta do nível do tanque de processo h_{restr} , obtidos com o uso do controlador DMC projetado considerando restrições. Nota-se que o sinal de controle ficou limitado pelas restrições imposta ($u_{min} = 40\%$ e $u_{max} = 80\%$). Analisando a resposta da variável controlada h_{restr} , verifica-se que em regime permanente, a referência desejada foi alcançada, apresentando somente uma pequena oscilação em torno da referência. Esta oscilação pode ser explicada devido ao enchimento do tanque de processo (TP) causar uma certa turbulência no seu nível de água, o que ocorre devido à queda d’água ser relativamente alta. No entanto, pela resposta apresentada pode-se considerar nulo o erro em regime permanente, sendo esta uma característica inerente ao DMC.

O benefício do uso de um controlador DMC com restrição no controle, ao invés de apenas o uso de uma saturação no sinal de controle, pode ser visto na Figura 6. Verifica-se que a resposta apresentada pelo DMC com restrição se apresentou mais favorável do que a obtida usando o DMC sem restrições com saturação no sinal de controle. Usando o DMC com restrições, apresentaram-se

um menor sobresinal na variável controlada h_{restr} e um menor esforço no sinal de controle. Como o sinal de controle no DMC com restrição é imediatamente decrementado após a referência desejada do nível do tanque ser atingida, evitou-se, assim, o efeito indesejado de *wind-up*. O efeito de *wind-up* é o responsável pelo sobresinal significativo da resposta obtida com o DMC sem restrição, sendo que o seu sinal de controle não é imediatamente diminuído quando se atinge o sinal de referência adotado para a variável controlada.

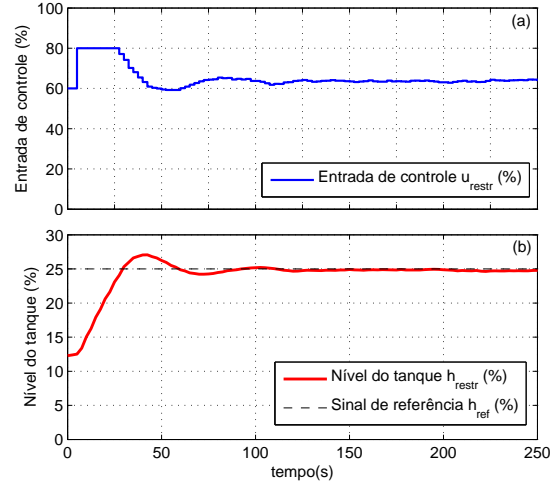


Figura 5: Resposta do sistema controlado com restrições na excursão do controle. (a) Entrada de controle u_{restr} . (b) Nível do tanque h_{restr} .

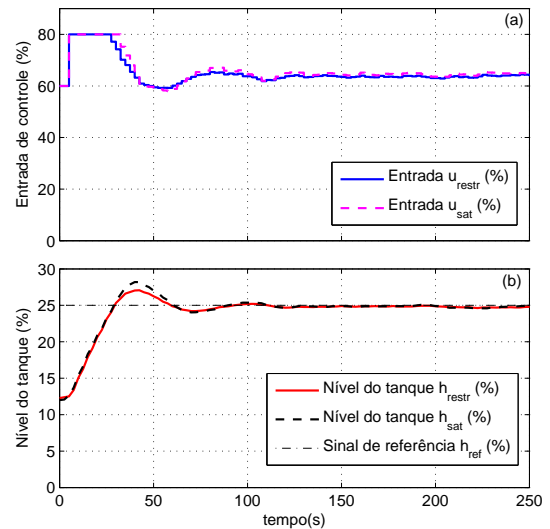


Figura 6: Respostas do sistema controlado usando DMC com restrição de controle (restr) x usando DMC sem restrições com saturação na entrada de controle (sat). (a) Entradas de controle. (b) Níveis do tanque.

Na Figura 7 é ilustrada a resposta do sistema submetido a uma perturbação momentânea, entre os instantes $t = 205s$ e $t = 215s$. Nota-se que as restrições foram obedecidas em relação ao esforço máximo e ao esforço mínimo de controle e que, após a passagem da perturbação, a resposta do

sistema retorna ao sinal de referência h_{ref} . Com isso, pode-se verificar que o sistema controlado, mesmo na presença de perturbação, obedeceu às restrições e apresentou um erro em regime nulo.

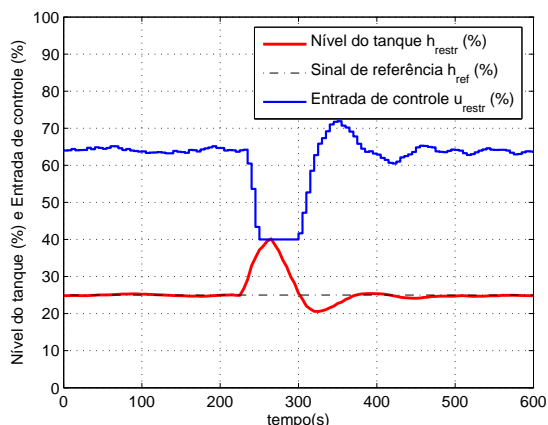


Figura 7: Resposta do sistema controlado usando o DMC com restrições na excursão do controle, sujeito a perturbação.

6 Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho aplicou-se a técnica de Controle Preditivo DMC a uma planta-piloto industrial. Verificou-se a importância de se tratar restrições no projeto do controlador DMC, ao invés de apenas impor uma saturação em um sinal que se deseja restringir com um limitante superior e/ou inferior. O sistema controlado pelo DMC com restrição na excursão de controle apresentou melhores resultados, tanto no sinal de controle quanto na variável de saída da planta, do que os obtidos usando o DMC sem restrição com saturação no sinal de controle. Além disso, foi possível notar que, usando o DMC com restrição, o sinal de controle respeitou os limites estabelecidos no projeto, mesmo no caso do sistema estar sujeito a perturbação na saída. Para futuros estudos, propõe-se a implementação de um controlador DMC MIMO para esta planta, adicionando ao sistema os processos de aquecimento e de transferência de fluido entre os dois tanques.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Projeto CAPES/Pró Engenharias (261/2009), do Projeto FAPESP (2011/17610-0) e do CNPq.

Referências

- Camacho, E.F. and Bordons, C. (2004). Model Predictive Control, Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer-Verlag, London, 2nd edition.
- Chen, Z.; Dong, Enzeng and Jia, C. (2009). Networked control systems based on Dynamic

Matrix Control. In 2nd Conference on Human System Interactions, HSI, Catania, Italy.

Cutler, C.R. and Ramaker, B.C. (1980). Dynamic Matrix Control - A Computer Control Algorithm. In Automatic Control, Conference, San Francisco.

Dougherty, D. and Cooper, D.J. (2003). Tuning guidelines of a dynamic matrix controller for integrating (non-self-regulating) processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 42, n. 8, p. 1739-1752.

Duarte, C.R.M.; Figueiredo, L.C. and Corrêa, M.V. (2006). Utilização do Matlab no ensino da tecnologia OPC aplicada a controle de processos. In Congresso Brasileiro de Automática 2006, CBA.

Graves, J.C. (2010). Detecção de falhas em sistemas de rede industrial com atuadores cooperativos em malha fechada. 149f. Tese de Mestrado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

Kim, W.; Moon, U.; Lee, K.Y.; Jung, W. and Kim, S. (2010). Once-through boiler steam temperature control using Dynamic Matrix Control technique. In Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, MN.

Maciejowski, J.M. (2002). Predictive Control with Constraints, Prentice Hall, Harlow, UK.

OPC Foundation (1998). OPC Overview, disponível em www.opcfoundation.org/ (25 abr. 2013).

Qin, S.J. and Badgwell, T.A. (2003). A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*, v.11, p. 733-764.

Richalet, J.; Rault, A.; Testud, J.L. and Papon, J. (1978). Model Predictive Heuristic Control: Application to Industrial Processes. *Automatica*, 14(2):413-428.

Shridhar, R. and Cooper, D.J. (1997). A tuning strategy for unconstrained SISO model predictive control. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 36, n. 3, p. 729-746.

Tipi, A. (2008). Adaptation of Dynamic Matrix Control and its Implementation on Welding Robot. In International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, MESA 2008, Beijing.

Xiong, T.; Cai, W.; Xiong, Y. and Zhang, R. (2012). Dynamic Matrix Control of the Lateral Position of a Moving Web. In International Conference on Mechatronics and Automation 2012, China.