



## X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica

“Influência da pesquisa em Engenharia Química no desenvolvimento tecnológico e industrial brasileiro”

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Universidade Severino Sombra  
Vassouras – RJ – Brasil

### DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONTROLE AVANÇADO

SENCIO<sup>1</sup>, R. R.; COSTA<sup>2</sup>, T. V.; SILVA<sup>3</sup>, F. V.

<sup>1</sup>Aluno da FEQ/UNICAMP    <sup>2</sup>Doutorando da FEQ/UNICAMP    <sup>3</sup>Professor da FEQ/UNICAMP  
Faculdade de Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas  
Endereço – DESQ/FEQ/UNICAMP, Rua Albert Einstein, 500, Bloco A,  
Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas, CEP. 13.083-852, SP,  
e-mail: flavio@feq.unicamp.br

**RESUMO** – Estruturas avançadas de controle, tais como algoritmos de controle ótimo quadrático e controle preditivo baseado em modelo, requerem maior esforço computacional em comparação, por exemplo, com controladores PID. Ademais, a maioria dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) não são projetados para execução de cálculos complexos, o que impossibilita a implementação de controladores avançados. Em vista disso, este trabalho teve como objetivo a criação de uma ferramenta para efetuar os cálculos das ações de controle, além de servir como sistema supervisor, facilitando a interação operador-processo. O *software* foi implementado em linguagem de programação C# utilizando uma estrutura de máquina de estados e integrado ao *software* livre Scilab, o qual efetua cálculos de controle em tempo real e comunica-se com os dados de processo via protocolo *Modbus*. Os testes da ferramenta foram realizados em malha fechada numa planta de dois tanques interativos, caracterizando um sistema MIMO (*Multiple-Input, Multiple-Output*) sob a ação de um controle preditivo (MPC, na sigla em inglês) que utiliza a abordagem de espaço de estados em tempo discreto. Os resultados obtidos mostraram que a ferramenta atendeu ao esforço de cálculo requerido sem exceder o tempo de amostragem dos dados da planta, o que possibilitou a avaliação e sintonia dos controladores.

**Palavras-chave:** controle preditivo, Scilab, processo multivariável

### INTRODUÇÃO

Há tempos sabe-se da importância da operação estável de processos químicos, sendo que tal estabilidade pode ser atingida com aplicações de sistemas de controle. Entretanto, atualmente outros critérios práticos devem ser atendidos, tais como: economia (diminuição de custos de operação); segurança (operação

dentro de faixas seguras); meio-ambiente (restrições ambientais); equipamentos (deve-se respeitar seus limites físicos); qualidade do produto final (satisfazer as condições de especificação) etc (García *et al.*, 1989).

Sob este panorama, a aplicação de controladores modernos, dentre eles o MPC (acrônimo inglês para *Model Predictive Control*) tornou-se cada vez mais usual na

indústria química desde sua criação na década de 1970. Tal sucesso do MPC deve-se a aspectos como: a abordagem multivariável em sua formulação; a habilidade de incorporar restrições de forma a manter o processo dentro dos limites de operação e também a capacidade de realizar otimização *on-line* (Wang, 2004).

No entanto, por envolver a resolução de problemas de otimização, a maioria dos CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) não suportam tal esforço de cálculo. Assim, os computadores pessoais (PCs) tornam-se uma alternativa viável, uma vez que possuem boa performance, baixo custo e possibilitam o uso de várias linguagens de programação como C, Java etc. (Seborg *et al.*, 2004).

Isso permite o desenvolvimento de sistemas SCADA (do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*), os quais podem ser integrados a ferramentas matemáticas que comportem algoritmos de controle avançado, como o Scilab, *software* livre científico para computação numérica (Peng e Ma, 2006). A eficácia da utilização do Scilab foi demonstrada, na aplicação de controladores *Fuzzy* em tempo real num processo de precipitação de bromelina (Costa *et al.*, 2009).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema SCADA em linguagem C#.NET acoplado ao Scilab e também analisar experimentalmente um controlador preditivo baseado em modelo de espaço de estados em tempo discreto.

## METODOLOGIA

### Sistema de Tanques Interativos

Para o teste da ferramenta desenvolvida, utilizou-se um sistema de dois tanques interativos fabricados em acrílico com válvulas manuais e duas bombas responsáveis por levar a água do reservatório a cada um dos tanques. O diagrama P&ID do processo encontra-se na Figura 1. Cada tanque possui um sensor de nível piezo-resistivo. Tanto as bombas como os sensores estão conectados a um CLP, sendo que este comunica-se com um computador via protocolo *Modbus*.

A partir de testes preliminares, foram escolhidas as posições das válvulas de forma a encontrar um ponto de operação em torno do qual serão feitas perturbações de *setpoint*.

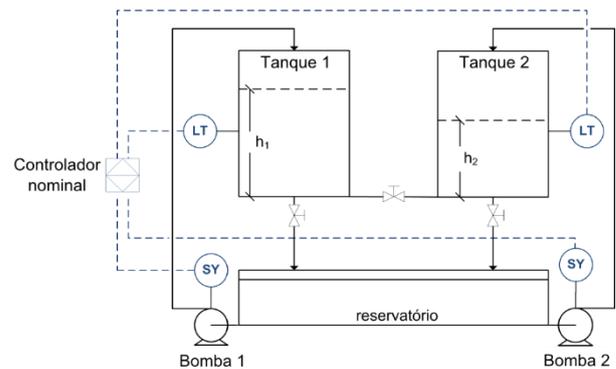


Figura 1 – Diagrama P&ID do processo.

### Desenvolvimento do *software*

A ferramenta foi desenvolvida em C#.NET, uma linguagem de programação orientada a objetos. Foi realizada a integração do *software* Scilab através do uso da *dll* (do inglês, *Dynamic-link library*) *call\_scilab*, disponível no diretório do programa. Com isso, pôde-se enviar comandos para o Scilab de forma simples e sem a necessidade da abertura de sua interface. Os comandos enviados envolvem tanto o cálculo das ações de controle como também a comunicação com o processo via protocolo *Modbus*, o que inclui a leitura das variáveis de processo e a escrita de variáveis manipuladas. Isso é possível através do uso de funções do módulo externo *modbus*, disponível para download na ferramenta ATOMS do Scilab.

Para realizar ações sucessivas, as principais funções do programa em C# são executadas sequencialmente em máquina de estados. Cada seqüência de ações (leitura, atualização da interface, cálculos de controle e escrita) dura um segundo, caracterizando o tempo de amostragem da planta. A Figura 2 ilustra a trajetória de informações.

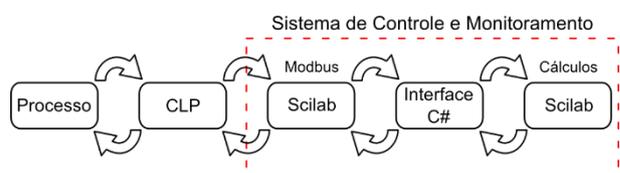


Figura 2 – Fluxo de informações.

### Modelagem

Primeiramente, perturbações no sistema foram realizadas para encontrar o modelo linear do processo em espaço de estados. A tabela abaixo contém as perturbações feitas nas

velocidades das bombas partindo sempre do ponto de operação.

**Tabela 1 – Perturbações realizadas.**

Situação	U <sub>1</sub> (%)	U <sub>2</sub> (%)
Ponto de operação	40	40
Experimento 1	50	40
Experimento 2	40	50

Avaliando o nível do tanque 1 após uma perturbação de amplitude  $M$  na bomba 1, verifica-se que a resposta assemelha-se a um sistema de primeira ordem, ou seja, pode ser descrita, em variável desvio, pela Equação 1. Já a resposta do nível do tanque 2 assemelha-se a um sistema de segunda ordem e pode ser descrita, em variável desvio, pela Equação 2 (Seborg *et al.*, 2004). O mesmo procedimento é feito para avaliação de resposta a uma perturbação na bomba 2, sendo, neste caso, a resposta do tanque 2 de primeira ordem e a do tanque 1 de segunda ordem.

$$y(t) = M K_{P1} [1 - e^{-t/\tau}] \quad (1)$$

$$y(t) = M K_{P2} \left[ 1 - \frac{\tau_1 e^{-t/\tau_1} - \tau_2 e^{-t/\tau_2}}{\tau_1 - \tau_2} \right] \quad (2)$$

Utilizando a função *datafit* do Scilab, ajustaram-se os parâmetros  $K_{P1}$ ,  $\tau$ ,  $K_{P2}$ ,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  e montou-se a matriz de transferência, a qual é convertida para espaço de estados no tempo contínuo utilizando a função *tf2ss*. Por fim, utilizou-se a função *dscr* para realizar a discretização ( $\Delta t = 1$  s) do modelo contínuo.

De posse do modelo do processo, o mesmo é inserido no *software* a fim de ser utilizado pelas funções que contêm o algoritmo do MPC, do qual segue uma breve descrição.

### Aplicação do MPC com restrições

Em abordagem discreta, o modelo aumentado em espaço de estados na forma da velocidade para um sistema MIMO (*Multiple-Input, Multiple-Output*) com  $m$  entradas,  $q$  saídas e  $n$  estados é dado por (Wang, 2004):

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k) \quad (3)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (4)$$

Assumindo que o instante atual de amostragem da planta é  $k_i$  e  $k_i > 0$  e que  $H_P$  e  $H_C$  são os horizontes de predição e controle, respectivamente, os valores futuros do vetor de estados podem ser obtidos a partir da medida atual através de sucessivas realimentações no modelo (Wang, 2009).

Definem-se, então, as matrizes  $Y$  e  $\Delta U$  de saídas e entradas, respectivamente:

$$\Delta U = [\Delta u(k_i)^T \ \Delta u(k_i+1)^T \ \dots \ \Delta u(k_i+H_C-1)^T]^T$$

$$Y = [y(k_i+1|k_i)^T \ y(k_i+2|k_i)^T \ \dots \ y(k_i+H_P|k_i)^T]^T$$

A Equação 5 relaciona  $Y$ ,  $x(k_i)$  e  $\Delta U$  e sua demonstração é feita por Wang (2004).

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (5)$$

onde

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{H_P} \end{bmatrix} \quad e \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{H_P-1}B & CA^{H_P-2}B & \dots & CA^{H_P-H_C}B \end{bmatrix}$$

Definindo  $R_S$  como a matriz de *setpoint*, tem-se que a função objetivo é dada por:

$$J := \|R_S - Y\|_{\bar{Q}}^2 + \|\Delta U\|_{\bar{R}}^2 \quad (6)$$

onde  $\bar{Q}$  e  $\bar{R}$  são matrizes de peso que correspondem a parâmetros de sintonia juntamente com  $H_P$  e  $H_C$ .

Substituindo a Equação 5 em 6, obtém-se:

$$J = \overbrace{(R_S - Fx(k_i))^T \bar{Q} (R_S - Fx(k_i))}^{\text{constante}} + \Delta U^T \overbrace{2\Phi^T \bar{Q} (Fx(k_i) - R_S)}^g + \frac{1}{2} \Delta U^T \overbrace{2(\Phi^T \bar{Q} \Phi + \bar{R})}^H \Delta U \quad (7)$$

onde  $g$  e  $H$  são o gradiente e a Hessiana, respectivamente.

A restrição com respeito à variação das ações de controle é escrita na forma matricial como a Equação 8:

$$\Delta U^{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U^{\max}$$

$$\begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} \Delta U \leq \begin{bmatrix} -\Delta U^{\min} \\ \Delta U^{\max} \end{bmatrix} \quad (8)$$

O vetor de variáveis manipuladas é:

$$\begin{bmatrix} u(k_i) \\ u(k_i+1) \\ \vdots \\ u(k_i+H_c-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} u(k_i-1)$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} I & 0 & \cdots & 0 \\ I & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & I & \cdots & I \end{bmatrix}}_{C_2} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u(k_i) \\ \Delta u(k_i+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k_i+H_c-1) \end{bmatrix}}_{\Delta U}$$

Então, estabelecendo limites às variáveis manipuladas, obtêm-se as Equações 9 e 10:

$$-(C_1 u(k_i-1) + C_2 \Delta U) \leq -U^{\min} \quad (9)$$

$$(C_1 u(k_i-1) + C_2 \Delta U) \leq U^{\max} \quad (10)$$

Definindo:

$$M_1 = \begin{bmatrix} -C_2 \\ C_2 \end{bmatrix}, \quad N_1 = \begin{bmatrix} -U^{\min} + C_1 u(k_i-1) \\ U^{\max} - C_1 u(k_i-1) \end{bmatrix},$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix}, \quad N_2 = \begin{bmatrix} -\Delta U^{\min} \\ \Delta U^{\max} \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} \text{ e } \gamma = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix}$$

Finalmente, o problema de programação quadrática com variável decisão  $\Delta U$  é:

$$\min_{\Delta U} J := \frac{1}{2} \Delta U^T H \Delta U + \Delta U^T g$$

s.a.  $M \Delta U \leq \gamma$

O problema de otimização é resolvido *on-line* internamente ao programa utilizando a função *qpsolve* do Scilab. Esta função faz uso do algoritmo de Goldfarb & Idnani (Baudin *et al.*, 2010).

Por fim, de posse do vetor  $\Delta U$  e aplicando o princípio do horizonte móvel, as ações incrementais de controle são dadas pelos  $m$  primeiros elementos:

$$\Delta u(k_i) = \begin{bmatrix} \overbrace{I_m \quad o_m \quad \cdots \quad o_m}^{H_c} \end{bmatrix} \Delta U$$

onde  $I_m$  e  $o_m$  são a matriz identidade e a matriz nula de dimensão  $m \times m$ .

Após a atualização das variáveis manipuladas, medem-se novamente os estados, o cálculo ao longo do horizonte de predição é refeito e o problema de otimização é resolvido novamente com novo gradiente (Wang, 2009).

## RESULTADOS

### Sistema de Controle e Monitoramento

A tela do sistema SCADA desenvolvido encontra-se na Figura 3. A ferramenta desenvolvida possui várias funcionalidades além de seu propósito principal. Dentre elas estão: a possibilidade de realizar testes em malha aberta apenas desmarcando o check-box “Closed Loop”; o armazenamento dos dados coletados do processo para posterior análise; a facilidade de calibração dos sensores de nível; a utilização de outros controladores além do MPC, tais como P, PI, PID e Controle Ótimo; mudança *on-line* dos parâmetros de sintonia ( $K_C$ ,  $\tau_I$  e  $\tau_D$  no caso do PID; as matrizes  $Q$  e  $R$  no caso do controle ótimo e  $H_P$ ,  $H_C$  e também  $Q$  e  $R$  no caso do MPC) com o botão “Control Configuration”; a opção de se trabalhar com simulação ao invés de coletar os dados da planta, o que torna o programa muito útil para estudo do processo.

### Matriz de Transferência

As duas primeiras curvas da Figura 4 correspondem à resposta dos níveis dos tanques 1 e 2 à perturbação realizada no Experimento 1 (Tabela 1) e as duas últimas, à perturbação realizada no Experimento 2. Cada curva de resposta é acompanhada da curva do modelo ajustado, sendo que ambos encontram-se em variável desvio.

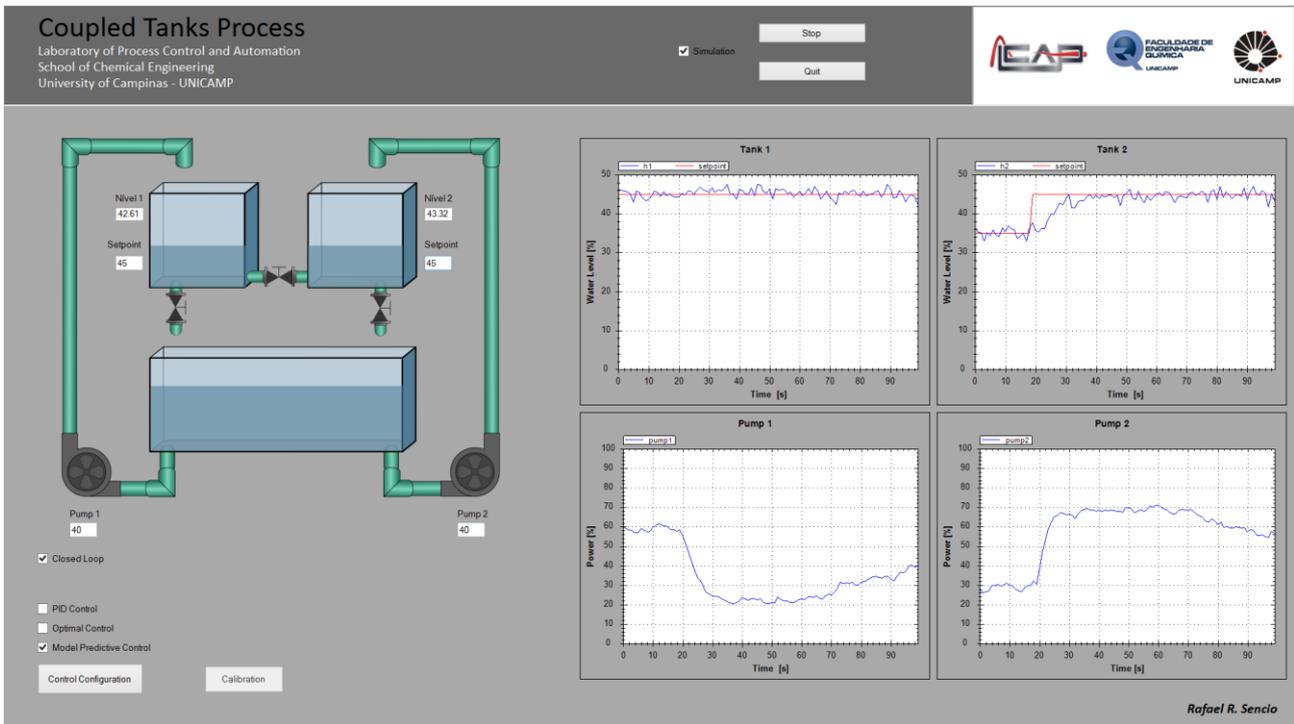


Figura 3 – Tela do sistema de controle e monitoramento.

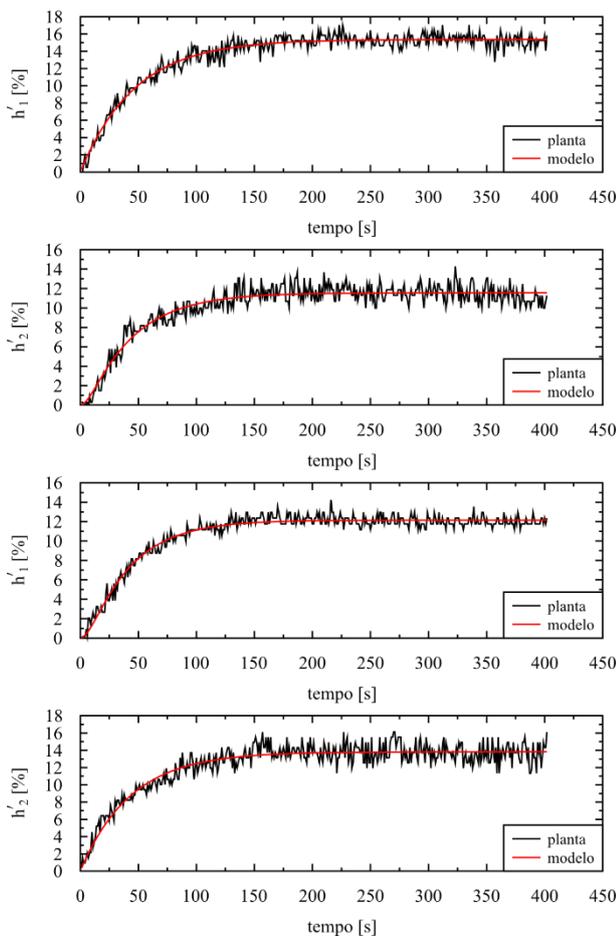


Figura 4 – Perturbações em malha aberta.

Assim, obtém-se a seguinte matriz de transferência no domínio de Laplace:

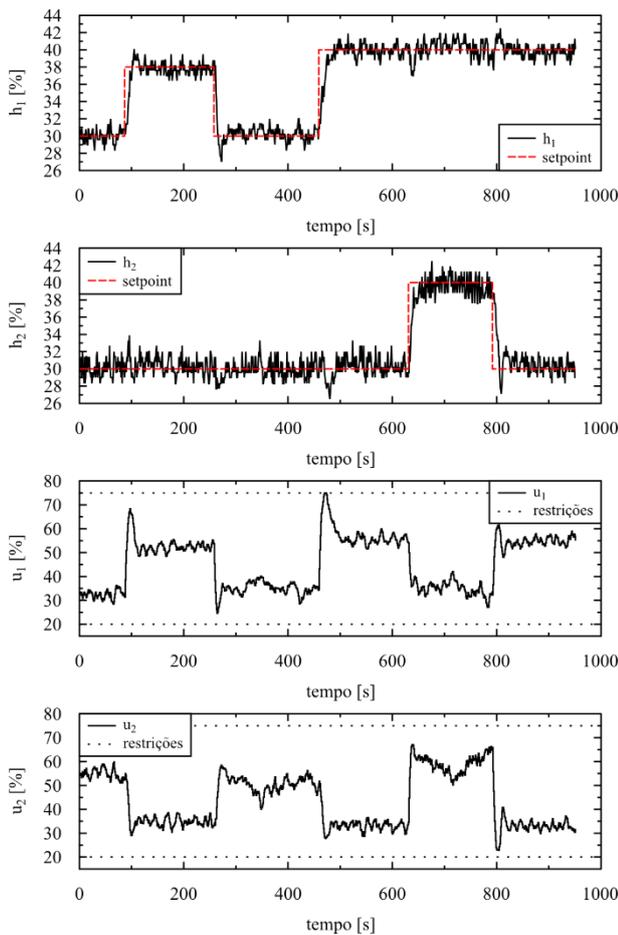
$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{1,54}{46,99s + 1} & \frac{1,22}{44,80s^2 + 38,08s + 1} \\ \frac{1,16}{274,42s^2 + 47,10s + 1} & \frac{1,38}{43,26s + 1} \end{bmatrix}$$

### Resultados experimentais em malha-fechada

A aplicação do controlador preditivo baseado em modelo foi realizada para fins de teste da ferramenta desenvolvida. Utilizaram-se valores de  $\bar{Q} = I$ ,  $\bar{R} = I$ ,  $H_C = 5$  e  $H_P = 30$ . Funcionando em tempo real, foi possível fazer alterações do valor de *setpoint* para avaliar a resposta do controlador. Na Figura 5 a seguir encontram-se resultados do teste.

Percebe-se que a mudança no valor do *setpoint* de  $h_1$  de 30% para 38% pouco influenciou no nível do tanque 2, uma vez que o controlador, sendo multivariável, evita esse desvio alterando também a velocidade da bomba 2. Novamente, não se percebe alteração em  $h_2$  quando se retorna o *setpoint* de  $h_1$  para 30%. Já na mudança de 30% para 40% no *setpoint* de  $h_1$  percebe-se um leve decréscimo no nível do tanque 2, o qual é compensado rapidamente pela manipulação dos atuadores. Nesta perturbação ocorre o alcance do valor limite de 75% na bomba 1, porém, o processo continua sendo controlado de forma ótima. O mesmo ocorre quando se altera o *setpoint* de  $h_2$

para 40%. O nível  $h_1$  é levemente perturbado, porém retorna à referência. Isso também ocorre na nova mudança de *setpoint* para  $h_2$ .



**Figura 5 – Resultados em malha fechada.**

## CONCLUSÃO

A aplicação de controle preditivo em um sistema de tanques acoplados foi realizada com o intuito de investigar a viabilidade da união entre a linguagem C# e a ferramenta matemática Scilab no desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle. O *software* desenvolvido mostrou-se eficaz no cálculo das ações de controle resolvendo o problema de otimização com restrições em tempo real. Trabalhos futuros podem ser realizados expandindo o software para outros processos, utilizando outros controladores ou ainda outro protocolo de comunicação como, por exemplo, OPC (*OLE for Process Control*).

## REFERÊNCIAS

- BAUDIN, M., COUVERT, V., STEER, S. (2010), “Optimization in Scilab”, The Scilab Consortium – Digiteo / INRIA.
- COSTA, T. V., FILETI, A. M. F., SILVA, F. V.(2009), “Scilab/Scicos: An Alternative Tool for Real-Time Monitoring and Advanced Control of Fieldbus Industrial Systems”, 10th International Symposium on Process Systems Engineering – PSE2009, p. 1617-1622.
- GARCÍA, C. E., PRETT, D. M., MORARI, M. (1989), “Model Predictive Control: Theory and Practice – a Survey”, *Automatica* Vol. 25, No. 3, p. 335-348.
- PENG, M., MA, L. (2006), “The realization of SCADA based on Scilab”, Institute of Industrial Control of Zhejiang University.
- SEBORG, D., EDGAR, T., MELLICHAMP, D. (2004), *Process Dynamics and Control*, 2<sup>a</sup> ed., Wiley.
- WANG, L. (2004), “A Tutorial on Model Predictive Control: Using a Linear Velocity-Form Model.” *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing* Vol. 12, Issue 5-6, p. 573-614.
- WANG, L. (2009), *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*, Springer, cap. 1-2.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à organização do X COBEQ-IC por permitir a apresentação e a publicação deste trabalho. Somos gratos também a Marcos Estevom pela montagem do aparato experimental e apoio técnico, e ao grupo PET (Programa de Educação Tutorial, financiado pelo MEC) da Faculdade de Engenharia Química.