

SISTEMA DE CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO-BFO EMBARCADO EM UM CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

JOÃO PAULO CARVALHO HENRIQUES*, JEREMIAS BARBOSA MACHADO†, LUÍS HENRIQUE DE CARVALHO FERREIRA†

**Instituto Nacional de Telecomunicações, INATEL, Santa Rita do Sapucaí, MG, 37540-000, Brasil*

†*Universidade Federal de Itajubá, IESTI-UNIFEI, Itajubá, MG, 37500-903, Brasil*

Emails: joao.paulo@inatel.br, jeremias@unifei.edu.br, luis@unifei.edu.br

Abstract— In this paper is addressed the problem of identification and control of linear systems where an orthonormal basis functions model is used to represent the process plant. These models are used to implement a predictive control system, which incorporate the advantages of this type of modeling, as the output feedback absence, to predictive control system features. The proposed modeling and control were successfully implemented in a typical programmable logic controller using C language. The practical results, using a level control of a water tank, have shown the feasibility of this technique and its suitability for real applications of control systems.

Keywords— Orthonormal Basis Functions, System Identification, Predictive Control, Control Methods.

Resumo— Neste trabalho é abordado o problema de identificação e controle de sistemas lineares, no qual um modelo de base de funções ortonormais é utilizado para representar a planta de processo. A utilização de modelos BFO possibilita a implementação de um sistema de controle preditivo, o qual incorpora as vantagens deste tipo de modelagem, como a ausência de realimentação de saída, às características do inerentes de um sistema de controle preditivo. A modelagem e controle proposto foram implementados com sucesso em um controlador lógico programável típico utilizando a linguagem C. Os resultados práticos, utilizando um controle de nível de um tanque de água, mostraram a viabilidade desta técnica e sua adequação para aplicações reais de sistemas de controle.

Palavras-chave— Base de Funções Ortonormais, Identificação de Sistemas, Controle Preditivo, Métodos em controle

1 Introdução

Com o aumento da complexidade das plantas industriais e a busca por melhor desempenho dos sistemas, o desenvolvimento de novos controladores se mostra cada vez mais importante. Dentre as técnicas de controle avançado adequadas à aplicações industriais destacam-se os sistemas de controle preditivo baseados em modelo (Camacho e Bordons, 1998).

O controle preditivo baseado em modelo (MPC¹) é uma estratégia baseada na otimização do sinal de controle com uma função de custo definida a partir de uma previsão sobre o comportamento do sistema, ou seja, com o uso de um modelo matemático. O conceito de controle preditivo foi introduzido nos trabalhos de Richalet et al. (1978) e de Cutler e Ramaker (1980), com este último apresentando o controlador DMC². O trabalho de Clarke et al. (1987) apresentou o controlador preditivo generalizado (GPC³), o qual difundiu na literatura a metodologia de controle MBPC⁴ (Clarke, 1994).

Neste trabalho tem-se especial interesse na aplicação do sistema de controle preditivo baseado em modelos obtidos através de representação por meio de bases de funções ortonormais (BFO) (Oliveira, 1997). A utilização de sistemas de controle preditivo baseados em modelos BFO se mostra vantajosa sobre demais abordagens, pois tais modelos não apresentam realimentação de saída. Sendo assim, os modelos BFO

não propagam erro na predição de saída, o que lhes confere maior precisão, fato de suma importância em sistemas de controle baseados em modelo.

Além disso, a representação de sistemas dinâmicos lineares e estáveis através de modelos dados por BFO's apresenta vantagens quando comparados com outros modelos normalmente utilizados para a representação dos mesmos sistemas:

- A utilização BFO's com polo(s) próximo(s) à dinâmica dominante do sistema requer uma menor quantidade de termos para representar o sistema com a mesma precisão de um modelo FIR.
- Não há a necessidade de determinar previamente a ordem do modelo nem o atraso de transporte, eliminando-se assim a etapa (geralmente árdua) de determinação dos regressores;
- É possível aumentar a capacidade de aproximação dos modelos simplesmente aumentando-se o número de funções, o que pode ser feito de forma adaptativa;
- Os modelos BFO apresentam grande tolerância às dinâmicas não modeladas e sensibilidade reduzida aos parâmetros estimados (dinâmicas não dominantes);
- Capacidade de lidar de forma robusta com atrasos de transporte.
- Desacoplamento natural das saídas em sistemas multivariáveis;
- É garantido que a representação de um sistema estável é também estável.

¹MPC - Model predictive control

²DMC - Dynamic matrix control

³GPC - Generalized predictive control

⁴MBPC: Model-Based Predictive Control, Controle adaptativo baseado em modelo

No entanto, a utilização de técnicas avançadas de controle se tornam limitadas a aplicações em sistemas sofisticados pois muitas vezes demandam um grande esforço computacional ou requerem um *hardware* dedicado a implementação de tais sistemas de controle. Neste contexto, o artigo em questão descreve o desenvolvimento e implementação de um controlador preditivo baseado em modelo com base de funções ortonormais em um controlador lógico programável (CLP) comercial através de um programa desenvolvido em linguagem C. Pretende-se mostrar a eficiência do método apresentado no controle de sistemas reais e a viabilidade computacional de sua implementação em um controlador lógico programável de uso geral.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2, a modelagem com base de funções ortonormais é revisada. Na Seção 3, apresenta-se o controlador preditivo em sua formulação baseada em modelos BFO. Na Seção 4, são apresentados os resultados obtidos pela identificação em malha aberta e controle em malha fechada com a implementação do sistema de controle em um CLP comercial. A Seção 5 apresenta as conclusões do trabalho.

2 Base de Funções Ortonormais

Um sistema dinâmico linear e estável pode ser representado pela sua resposta ao impulso $h(k)$. Supondo que o processo seja causal e que a resposta ao impulso seja absolutamente somável, é possível modelá-lo com uma série de funções ortonormais (Heuberger et al., 2005):

$$h(k) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i \phi_i(k) \quad (1)$$

onde $\phi(k)$, $i = 1, 2, 3, \dots$ é uma base de funções ortonormais e c_i os coeficientes de desenvolvimento da resposta ao impulso. A equação de convolução para um sistema dinâmico linear pode ser escrita definindo-se a resposta ao impulso $h(j)$ pelo desenvolvimento apresentado na equação (1) com uma aproximação com n_f funções ortonormais como:

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^{n_f} c_i \psi_i(k) \quad (2)$$

onde $\psi_i(k)$ é a convolução da entrada $u(k)$ com a i -ésima função ortonormal ϕ_i no instante k . Associando-se a cada função ortonormal uma representação equivalente em função de transferência em z que define um filtro linear, $\psi_i(k)$ pode ser então visto como a filtragem do sinal de entrada $u(k)$.

Na modelagem de sistemas dinâmicos duas BFO's são utilizadas com maior frequência, as BFO's de Laguerre e Kautz (Machado, 2007). A base de funções ortonormais de Laguerre é caracterizada pela utilização de funções de transferência com apenas um polo real (Wahlberg, 1991):

$$\Phi_i(z) = \frac{\sqrt{1-p^2}}{z-p} \left(\frac{1-pz}{z-p} \right)^{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (3)$$

onde $p = \{p : p \in R \text{ e } |p| < 1\}$ é o polo que parametriza as funções ortonormais e i a ordem da função dada.

As funções de Kautz (Heuberger et al., 2005) são generalizações das funções de Laguerre e são parametrizadas pelo par de polos complexos conjugados $\beta = \alpha \pm j\vartheta$ segundo as equações:

$$\begin{aligned} \Phi_{2i-1}(z) &= \frac{\sqrt{(1-c^2)(z-b)}}{z^2 + b(c-1)z - c} \left(\frac{-cz^2 + b(c-1)z + 1}{z^2 + b(c-1)z - c} \right)^{i-1} \\ \Phi_{2i}(z) &= \frac{\sqrt{(1-b^2)(1-c^2)}}{z^2 + b(c-1)z - c} \left(\frac{-cz^2 + b(c-1)z + 1}{z^2 + b(c-1)z - c} \right)^{i-1} \end{aligned} \quad (4)$$

onde:

$$b = (\beta + \beta^*) / (1 + \beta\beta^*) \text{ e } c = -\beta\beta^* \quad (5)$$

sendo $0 < b < 1$ e $-1 < c < 0$.

Quando o sistema em estudo possui múltiplos modos dominantes (amortecidos ou não) utilizam-se modelos formados por base de funções ortonormais generalizadas (GOBF - *Generalized Orthonormal Basis Functions*), em que as funções ortonormais podem apresentar n_b polos distintos (Heuberger et al., 2005; Machado, 2011).

Modelos BFO podem ser genericamente representados em modelos de espaço de estados como (Nelles, 2001; Campello et al., 2007):

$$\begin{aligned} \Psi(k+1) &= A\Psi(k) + Bu(k) \\ \hat{y}(k) &= C\Psi(k) \end{aligned} \quad (6)$$

onde $u(k)$ é o vetor de entradas, $\hat{y}(k)$ é o vetor de saídas e as matrizes A e B dependem diretamente dos parâmetros (polos) do modelo, $\Psi(k) = [\psi_1(k) \dots \psi_{n_f}(k)]^T$ é o vetor de estados ortonormais⁵ de ordem n_f e C é o vetor dos coeficientes da série. Este modelo pode ainda incluir uma parcela na parte estática da representação que modela o nível DC da saída do sistema sob estudo.

Neste trabalho são utilizados modelos GOBFs com funções internas em estrutura *Ladder*. Nesta formulação os polos são parametrizados sempre por parâmetros reais independente da natureza dos polos. Esta representação foi proposta por Gray e Markel (1975) como uma realização em espaço de estados para uma função interna com somente um polo com duas entradas e duas saídas cujo modelo em estado de espaços é dado por (Gray e Markel, 1975; Heuberger et al., 2005):

$$\begin{bmatrix} \varphi_i(k+1) \\ y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \sqrt{1-\gamma^2} & -\gamma & 0 \\ \gamma & \sqrt{1-\gamma^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_i(k) \\ u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

com $-1 < \gamma < 1$. O modelo apresentado na equação (7) pode ser representado pela Figura 1:

A ligação das n_b seções com distintos parâmetros γ_b forma uma base ortonormal generalizada com n_b polos (reais e/ou complexos), que podem ou não serem distintos, se dá através da estrutura de ligação apresentada na Figura 2.

⁵"Estados ortonormais" é uma denominação usada por conveniência, já que a ortonormalidade é uma propriedade da função e não dos estados

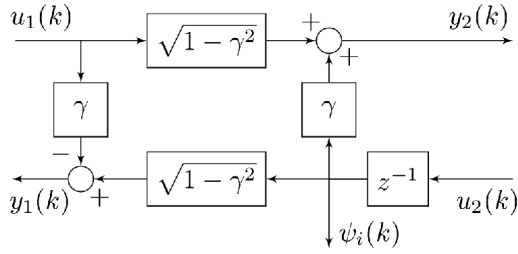


Figura 1: Representação em blocos da estrutura interna parametrizada por γ .

As matrizes A e B do modelo GOBF (equação (6)) são obtidas diretamente a partir dos parâmetros $\gamma_1, \dots, \gamma_b$ como apresentado em (Machado et al., 2010; Machado, 2011). Os parâmetros da matriz C podem ser obtidos pelo método dos mínimos quadrados levando-se em consideração as saídas $y(k)$ medidas do sistema a ser modelado e das saídas das funções ortogonais $\Psi(k)$ geradas pelas entradas $u(k)$.

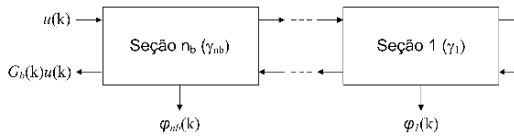


Figura 2: Representação em blocos das funções da base de uma GOBF.

É também de interesse neste trabalho, tendo-se em vista a modelagem aplicada a sistemas de controle preditivo, a representação dos processos por modelos GOBF variacionais em espaço de estados. Modelos lineares sob a representação variacional dispensam o modelamento do nível contínuo do sistema, por tratar tão-somente as variações nos estados e nas entradas (Eq. (8)).

$$\begin{aligned} \Delta\Psi(k+1) &= A\Delta\Psi(k) + B\Delta u(k) \\ \hat{y}(k) &= \hat{y}(k-l) + C\Delta\Psi(k) \end{aligned} \quad (8)$$

3 CONTROLE PREDITIVO

O conceito de controle preditivo (MPBC Model Predictive Controllers) surgiu na década de 70 nos trabalhos de (Richalet et al., 1978) e (Cutler e Ramaker, 1980). Por incorporar, na lei de controle, restrições operacionais relacionadas com a entrada e saída do sistema, e possuir fácil sintonia, os controladores preditivos estão sendo cada vez utilizados na indústria de processos, principalmente processos químicos (Campello et al., 2007).

Os controles preditivos (MPBC) podem ser caracterizados em quatro etapas principais (Machado, 2007):

- **Modelagem do Processo.** Com base nos sinais de entrada e saída do sistema, é criado um modelo para prever o comportamento do processo em um horizonte definido, chamado horizonte de predição.

- **Definição do critério de custo.** O desempenho do sistema em malha fechada durante o horizonte de predição é especificado a partir de um critério de custo, definido através da saída prevista do sistema e do esforço de controle.
- **Otimização do critério de custo.** O critério de custo é minimizado em relação ao conjunto de sinais de controle a serem aplicados no processo durante o horizonte de predição.
- **Atuação do sinal de controle.** Somente o primeiro sinal de controle é utilizado no processo. No processo instantâneo de amostragem, o processo é repetido.

Uma das principais etapas do controle preditivo é a modelagem do sistema a ser controlado e o desempenho do sistema em malha fechada está diretamente relacionado com o modelo do sistema dinâmico.

Para o sistema de controle proposto neste trabalho, o modelo de predição utilizado será um modelo GOBF com estrutura *Ladder* e será representado sob a forma variacional, como mostrado na equação (8).

No controle preditivo, o esforço de controle é obtido solucionando-se um problema de controle ótimo para um modelo do sistema e aplicando à planta somente o primeiro valor do sinal de controle otimizado. No ciclo de operação seguinte, o sinal de realimentação é levado em conta para corrigir a predição e o processo é iterado. O controle preditivo pode levar em consideração limites da planta e dos atuadores, tem poucos parâmetros de ajuste e compensa intrinsecamente atrasos de transporte (Findeisen, 2004). A Figura 3 apresenta o conceito geral de um controlador preditivo.

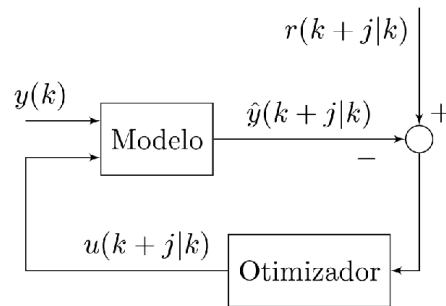


Figura 3: Diagrama em blocos de controlador preditivo.

Na Figura 3 o sinal de referência r e sua previsão futura, se disponível, é comparado com uma previsão sobre o comportamento do sistema baseada em um modelo matemático. O modelo é estimulado por uma sequência de valores do esforço de controle u , a qual é obtida pela otimização de uma função de custo (9) que leva em consideração o erro da resposta do sistema e a mínima energia gasta pelo sistema:

$$J_q(\Delta u) = \sum_{j=N_1}^{N_y} (r(k+j) - \hat{y}(k+j|k))^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda \Delta u(k+j-1|k)^2 \quad (9)$$

onde N_1 e N_y são, respectivamente, os horizontes inicial e final de predição; N_u o horizonte de controle; e λ a ponderação sobre o sinal de controle. Existem técnicas para garantir a estabilidade (Findeisen, 2004) e robustez (Marruedo et al., 2002) de controladores MPC não lineares, mas essas técnicas envolvem otimização sujeita a restrições, a qual demanda alto esforço computacional (Patra et al., 2007). Nesta aplicação, optou-se por utilizar uma lei de controle sem restrições, a qual admite uma solução computacionalmente eficiente (Bazaraa e Shetty, 1979) dada pela equação (10).

$$\Delta u = -\frac{1}{2}Q^{-1}\mathbf{f} \quad (10)$$

As definições da matriz Q e do vetor $\mathbf{f}$ da equação (10) estão presentes em Oliveira (1997). Q depende unicamente das respostas do impulso dos filtros ortogonais e $\mathbf{f}$ depende unicamente da saída prevista em malha aberta.

4 Aplicação e Resultados

Esta seção tem como objetivo apresentar resultados que comprovam a validade dos métodos de modelagem e controle propostos neste trabalho. Para esta finalidade, utilizou-se um planta didática para controle de nível com dois tanques acoplados, como apresentado na Figura 4. Esta planta foi utilizada por estar disponível no Laboratório da Instituição e por atender os objetivos do trabalho.

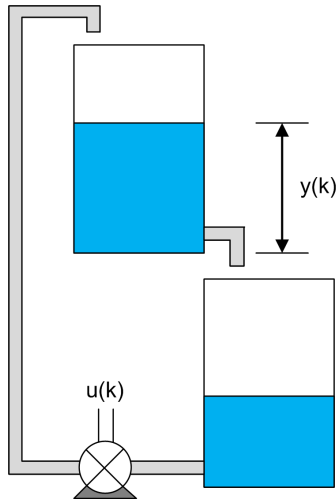


Figura 4: Processo de Controle de Nível.

A ação do sistema de controle atua sobre a alimentação elétrica da bomba alterando a vazão do líquido bombeado para o tanque superior, e consequentemente, controlando a altura do nível neste tanque

(variável controlada). Para a implementação do sistema de controle utilizou-se um CLP comercial com as seguintes características (Processador: ELAN SC520 100MHz, Memória Principal: 64MB DRAM, Memória de Programa: 48KB SRAM, Módulos de Entrada e Saída Analógica: 12 Bits), modelo 4PP045.0571-62 fabricado pela B&R Automation.

A fim de realizar a identificação do sistema aplicou-se um sinal na entrada do processo e posteriormente foram armazenados os dados de entrada e saída, com tempo de amostragem de $T_s = 0,5$ [seg]. Para o sistema sob análise obteve-se, de acordo com o processo de modelagem apresentado em (Machado, 2010), que o modelo com melhor resposta apresentava um polo real e dois blocos G_b . Este sistema apresenta característica dinâmica típica de sistemas com polos reais pois a sua resposta em malha aberta não apresenta oscilação. O modelo GOBF obtido pode ser representado matricialmente, conforme a equação (6), por:

$$A = \begin{bmatrix} 0,9977 & 0 \\ 0,0046 & 0,9977 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0,0677 & -0,0675 \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} 0,0407 & 1,3412 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}$$

sendo os polos do sistema identificado $p = 0,9977$. Os parâmetros do vetor C estimados através do Método dos Mínimos Quadrados. O modelo foi validado, mostrando a adequada identificação do sistema sob análise.

Para a implementação do sistema de controle, estabeleceu-se um horizonte de predição $N_y = 10$ e um horizonte de controle $N_u = 4$ e com fator de ponderação sobre o sinal de controle igual a $\lambda = 0,1$. Com estes parâmetros, atendeu-se as especificações de projeto que eram *overshoot* máximo de 5%, tempo de acomodação máximo de 30 segundos e erro em regime permanente menor que 2%.

As matrizes G e Q^{-1} do controlador foram calculadas *a priori* de maneira *off-line* de acordo com os parâmetros da planta e tiveram seus valores embarcados na rotina de controle implementada no CLP. Esta abordagem permite um ganho significativo no processamento, uma vez que evita a inversão de matrizes na rotina de controle embarcada no CLP. O modelo de CLP utilizado permite a implementação de rotinas em uma linguagem semelhante a ANSI C. Com objetivo de verificar o funcionamento do controlador proposto neste trabalho, foram estabelecidos dois degraus consecutivos de referência em 5 e 7 [cm] de nível do tanque superior da planta. A resposta do sistema em malha fechada pode ser observada na Figura 5.

Como pode-se observar, o sistema de controle preditivo atuou corretamente na planta, e o nível do tanque atingiu a referência desejada com um baixo valor de *overshoot*, em torno de 1%. Para fins de validação do controle desenvolvido, realizou-se uma comparação entre resposta da planta utilizando o Controlador Preditivo BFO e um controlador clássico PID, como

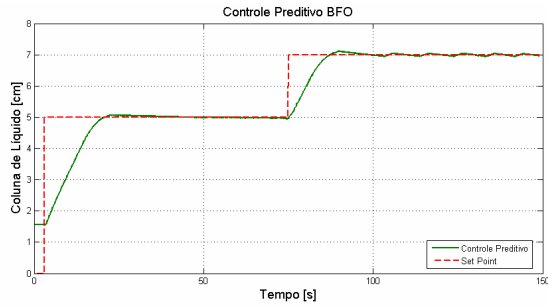


Figura 5: Resposta do Sistema de Nível - Controlador Preditivo.

apresentado na equação (11) (Phillips e Nagle, 1995).

$$D(z) = K_p + K_i \frac{T_s}{2} \frac{z-1}{z+1} + K_d \frac{z-1}{T_s z} \quad (11)$$

Os parâmetros do controlador PID foram calculados utilizando o método de resposta em frequência, considerando como parâmetro de projeto o tempo de subida com valor semelhante ao apresentado pelo sistema controlado pelo sistema de controle preditivo. De maneira análoga ao procedimento adotado para o sistema de controle preditivo, estabeleceram-se dois degraus consecutivos como referência para a saída controlada em 5 e 7 [cm] respectivamente. A resposta da planta pode ser observada na Figura 6.

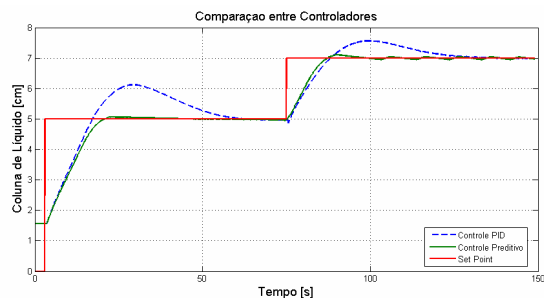


Figura 6: Comparação entre as respostas do Controlador PID e o Controlador Preditivo.

Conforme pode-se observar na Figura 6, em ambos sistemas de controle a planta atingiu o valor de nível especificado como referência. No entanto, é possível observar que para o controlador preditivo proposto o sistema apresenta uma resposta com *overshoot* e tempo de acomodação inferiores a resposta do sistema controlado pelo PID. Este comportamento mostra o desempenho superior do controlador preditivo desenvolvido.

Apesar de apresentar um desempenho superior ao sistema de controle PID para a referida planta, o Controlador Preditivo BFO não apresentou um custo computacional significativamente superior àquele apresentado pelo controlador PID. Os valores de utilização da CPU do CLP, obtidos através de sistema de monitoramento, são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Custo Computacional dos Controladores.

Controlador	Tempo de Ciclo	Utilização CPU
PID	10 ms	1,58%
Preditivo	10 ms	1,58%

Os resultados apresentados na tabela 1 e na Figura 6 mostram que com a utilização do sistema de controle proposto, comparando-se a um controlador PID, obteve-se significativo ganho no comportamento dinâmico do sistema sob controle sem aumento de utilização de recursos computacionais do CLP.

5 Conclusões

Neste trabalho abordou-se o problema de identificação e controle de sistemas lineares, no qual um modelo de funções ortonormais foi utilizado para representar o processo. Utilizando-se das bases de funções ortonormais generalizadas, implementou-se, em linguagem C, um controlador preditivo baseado nestes modelos, o qual foi embarcado em um controlador lógico programável comercial. De maneira a comprovar o desempenho da proposição, o controlador desenvolvido foi comparado com o controlador PID do próprio controlador lógico programável comercial, sendo ambos aplicados no controle de nível de água em um tanque. Os resultados práticos, obtidos no sistema de controle de nível, mostraram a viabilidade da técnica bem como a sua superioridade em relação ao controlador PID ao apresentar tempos de acomodação e valores de *overshoot* inferiores. O controlador preditivo também foi capaz de rejeitar a variação de parâmetros da planta causada pelo escoamento turbulento do sistema, permitindo concluir que a técnica empregada é adequada para as aplicações reais em sistemas de controle industriais. Além disso, mesmo sendo uma técnica de controle mais sofisticada, a taxa de uso dos recursos computacionais do CLP pelo sistema de controle preditivo apresentou valores compatíveis com aqueles apresentados pelo controlador PID.

Agradecimentos

Os autores agradecem à B&R Automation, UNIFEI, INATEL e à FAPEMIG (Projeto Universal APQ-01951-12) pelo apoio para o desenvolvimento e apresentação deste trabalho.

Referências

- Bazaraa, M. S. e Shetty, C. M. (1979). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*, Wiley, New York.
- Camacho, E. F. e Bordons, C. (1998). *Model Predictive Control*, 1st edn, Springer Verlag.

- Campello, R. J. G. B., Oliveira, G. H. C. e Amaral, W. C. (2007). Identificação e Controle de Processos via Desenvolvimentos em Séries Ortonormais: Partes A (Identificação) e B (Controle), *Controle & Automação* **18**(3): 298–332.
- Clarke, D. (1994). *Advances in Model-Based Predictive Control*, Oxford University Press, USA.
- Clarke, D., Mohtadi, C. et al. (1987). Generalized Predictive Control, *Automatica*, Vol. 23, pp. 137–160. part i. the basic algorithm and part ii. extensions and interpretations.
- Cutler, C. e Ramaker, B. (1980). Dynamic Matrix Control - A computer control algorithm, *Joint Automatic Control Conference*.
- Findeisen, R. (2004). *Nonlinear Model Predictive Control*, PhD thesis, Fakultät Maschinenbau - Universität Stuttgart.
- Gray, A. J. e Markel, J. (1975). A normalized digital filter structure, *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on* **23**(3): 268–277.
- Heuberger, P. S. C., Van den Hof, P. M. J. e Wahlberg, B. (2005). *Modelling and Identification with Rational Orthogonal Basis Functions*, Springer.
- Machado, J. B. (2007). *Modelagem e controle preditivo usando multimodelos*, Master's thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- Machado, J. B. (2011). *Modelagem de Sistemas Não-lineares por Base de Funções Ortonormais Generalizadas com Funções Internas*, PhD thesis, DCA/FEEC/UNICAMP.
- Machado, J. B., Campello, R. J. G. B. e Amaral, W. C. (2010). Modelos lineares GOBF com funções internas, *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, Vol. 1.
- Marruedo, D., Bravo, J., Alamo, T. e Camacho, E. (2002). Robust MPC of constrained discrete-time nonlinear systems based on uncertain evolution sets: application to a CSTR model, *Proc. of the 2002 Int. Conf. on Control Applications*, Vol. 2, pp. 657–662 vol.2.
- Nelles, O. (2001). *Nonlinear System Identification*, 1st edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Oliveira, G. H. d. C. (1997). *Controle Preditivo para Processos com Incertezas Estruturadas baseado em Séries de Funções Ortonormais*, PhD thesis, UNICAMP - FEEC.
- Patra, D., Jena, D. e Mohanty, S. K. (2007). *Model Predictive Control*, Master's thesis, National Institute of Technology Rourkela, Rourkela, India.
- Phillips, L. C. e Nagle, T. H. (1995). *Digital control system analysis and design*, 3rd edn, Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- Richalet, J., Rault, A., Testud, J. e Papon, J. (1978). Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes, *Automatica* **14**(5): 413–428.
- Wahlberg, B. (1991). System identification using Laguerre models, *IEEE Transactions on Automatic Control* **36**(5): 551–562.