

# ABORDAGEM OTIMIZADA DE CONTROLE NEBULOSO PARA SISTEMAS NÃO-LINEARES DO TIPO HAMMERSTEIN

LEANDRO DOS SANTOS COELHO, RICARDO MASAO SUGUIMOTO

*Laboratório de Automação e Sistemas, Grupo Produtiva  
Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PUCPR / PPGEPS  
Imaculada Conceição, 1155, CEP 80215-901 Curitiba, PR  
E-mails: leandro.coelho@pucpr.br, ricardo.ms@gmail.com*

ANTONIO AUGUSTO RODRIGUES COELHO

*Departamento de Automação e Sistemas  
Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC / CTC / DAS  
Caixa Postal 476, CEP 88040-900, Florianópolis, SC  
E-mail: aarc@das.ufsc.br*

**Abstract**— This paper presents the design and optimization of a fuzzy controller based on differential evolution (DE). In this context, the analysis of performance of a controller using PI (Proportional-Integral) fuzzy part combined with a derivative conventional control action is investigated. Simulation results indicate the potentialities of fuzzy control and DE optimization methodologies for two case studies.

**Keywords**— Fuzzy control, PID control, differential evolution, optimization.

**Resumo**— Este trabalho apresenta o projeto e otimização de um controlador nebuloso baseado em evolução diferencial (ED). Neste contexto, a análise de desempenho do controlador usando parte nebulosa do tipo PI (Proporcional-Integral) combinado com uma ação de controle derivativa convencional é investigada. Os resultados de simulação indicam as potencialidades das metodologias de controle nebuloso e otimização baseada em ED para dois estudos de caso.

**Palavras-chave**— Controle nebuloso, controle PID, evolução diferencial, otimização.

## 1 Introdução

Muitas vezes, as técnicas clássicas de controle clássico, tal como os controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo), apresentam dificuldades em lidar com processos não-lineares. Neste contexto, é que as técnicas de controle nebuloso se mostram interessantes, pois geralmente não precisam do modelo matemático do processo para controlá-lo e podem também fazer uso do conhecimento de operador, este implementado em uma base de regras heurísticas.

Deve-se enfatizar que os controladores nebulosos têm chamado atenção pelos resultados bem sucedidos de suas aplicações tanto na academia quanto na indústria em controladores industriais (Edgar e Postlethwaite, 2000; Mraz, 2001; Sun *et al.*, 2003; Kolokotsa, 2003; Park e Park, 2004; Jee e Koren, 2004; Gao e Feng, 2005).

Para implementar um controlador nebuloso, o projetista necessita não somente de heurística, mas também de alguns procedimentos teóricos na síntese e análise do projeto. Geralmente, a concepção de um controle nebuloso é um projeto de controle não-linear. Assim, é uma tarefa difícil examinar-se a influência de cada parâmetro no desempenho e robustez do seu projeto. O procedimento de projeto adotado para o controlador nebuloso baseado em regras (controlador nebuloso do tipo Mamdani) é

sintetizado pelos seguintes passos: (i) definir as funções de pertinência das entradas e das saídas; (ii) selecionar a(s) entrada(s) de controle; (iii) especificar as regras associadas às funções de pertinência; (iv) selecionar o método de inferência associado as regras de produção; (v) selecionar o método de nebulização e desnebulização; e (vi) avaliação do controlador.

A contribuição deste trabalho é apresentar o projeto e a otimização de um controlador nebuloso do tipo PI (Proporcional-Integral) mais parte D (Derivativo) convencional. O controlador nebuloso é validado no controle de dois exemplos de modelos não-lineares do tipo Hammerstein.

O procedimento de otimização utilizado no controlador é baseado em um paradigma da computação evolutiva denominado evolução diferencial (ED). A ED é um paradigma útil para aplicações em problemas de otimização não-linear contínua. Basicamente, a ED realiza mutações nos vetores pela adição ponderada de diferenças aleatórias entre eles. Storn (1997) relatou resultados promissores que mostram que a ED supera outros algoritmos evolutivos (*simulated annealing* adaptativo, Nelder e Mead com *annealing*, algoritmo genético, estratégia evolutiva e equações diferenciáveis estocásticas) para abordagens de minimização em relação ao número de avaliações necessárias localizando o mínimo global de diversas funções teste consolidadas na literatura.

O restante do artigo é organizado da seguinte forma. A descrição do projeto de controle nebuloso

com otimização baseada em ED é detalhada na seção 2. Uma breve descrição dos dois estudos de caso e a análise dos resultados obtidos nas simulações são mencionados, respectivamente, nas seções 3 e 4. Finalizando, a conclusão e comentários sobre futura pesquisa são apresentados na seção 5.

## 2 Controle Nebuloso

A teoria de controle clássica permite projetar controladores usando informação imprecisa sobre o processo a ser tratado. Esta teoria, no entanto, apresenta limitações no tratamento de processos complexos, devido as não-linearidades e comportamentos variantes no tempo. Contudo, os operadores humanos controlam, freqüentemente, com sucesso, diversos processos complexos. Os operadores humanos são capazes de controlar baseados em informações imprecisas e/ou incertas a respeito do funcionamento de processos. A estratégia de controle adotada pelos operadores humanos é de natureza imprecisa e, geralmente, pode de ser expressa em termos lingüísticos.

Os sistemas nebulosos possuem um formalismo para a representação do conhecimento e inferência de novos conhecimentos que é similar à maneira utilizada pelos seres humanos para expressarem o conhecimento e raciocínio, ao contrário dos sistemas baseados em lógica clássica.

A estrutura básica de um modelo nebuloso pode ser vista com constituindo-se de: (i) *base de regras*, que contém um conjunto de regras nebulosas; (ii) *base de dados*, que define as funções de pertinência das regras nebulosas; e (iii) *mecanismo de inferência*, que executa os procedimentos de inferência sobre as regras e condição para obtenção de uma saída, conforme o fluxo de dados representado na Figura 1.

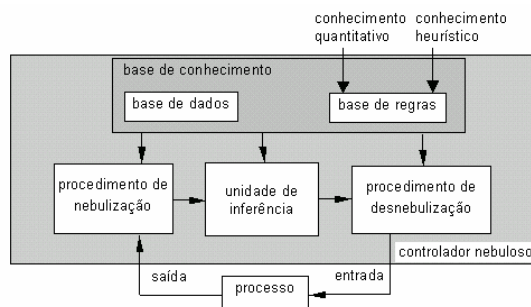


Figura 1. Estrutura de um controlador nebuloso.

A base de conhecimento abrange a base de regras e a base de dados do controlador nebuloso. A base de regras é projetada pela seleção das variáveis de entrada, saída e regras de controle. A base de dados está vinculada à definição do universo de discurso de cada variável de estado, dependendo da escolha das funções de pertinência e dos parâmetros e das funções, que as regem. A fase de nebulização converte os valores numéricos (números reais) em

conjuntos nebulosos, ou seja, transforma os dados *crisp* em um conjunto nebuloso correspondente. Existem diversas formas para o projeto de funções de pertinência para as variáveis lingüísticas de erro, variação do erro, controle e variação do controle. Entre as mais utilizadas têm-se as funções trapezoidais, triangulares, Gaussianas ou em forma de sino.

A fase de análise e execução de regras é responsável pela avaliação das regras de produção. Quando uma regra é ativada efetua-se um procedimento de cálculo baseado nos valores dos antecedentes e, então é obtida a saída da regra. A fase de desnebulização visa a transformação das variáveis lingüísticas da saída do controlador nebuloso em saídas *crisp*. A desnebulização descreve o mapeamento de um espaço de ações de controle nebuloso em ações de controle não-nebuloso. O procedimento de desnebulização pode ser realizado de várias formas. Entre os métodos de desnebulização utilizados estão o centro de área, a média do máximo, o centro do máximo, o mínimo do máximo e a média ponderada. Entretanto, o centro de área ou centróide é o mais empregado em sistemas de controle nebulosos.

Em síntese, o desenvolvimento de um controlador nebuloso convencional baseado em regras é orientado por controlador. O comportamento de um operador ou especialista humano (controlador) é modelado por regras lingüísticas de controle. Um modelo analítico do processo não é necessário, mas uma “hipótese” aproximada do comportamento do processo. Este procedimento apresenta vantagens para processos industriais complexos de serem descritos por equações analíticas. A desvantagem é que não é possível provar a estabilidade em malha fechada do sistema de controle sem um modelo analítico do processo. Adicionalmente a isto, a busca heurística por regras de controle nebuloso pode consumir muito tempo e não existe garantia que um controlador nebuloso eficiente seja encontrado. Além disso, existem algumas dificuldades da abordagem convencional de projeto de um controlador nebuloso. A primeira, o projeto de um controlador nebuloso requer um conhecimento confiável obtido *a priori* pelo especialista humano e, portanto, o desempenho do controlador nebuloso é dependente da qualidade do especialista.

Conforme Jang e Sun (1995), a essência dos modelos nebulosos é similar ao princípio de “dividir e conquistar”. Os antecedentes das regras nebulosas dividem o espaço de entrada em um número de regiões nebulosas locais, enquanto os conseqüentes descrevem o comportamento dentro de uma região através dos seus constituintes. Os componentes dos conseqüentes resultam em tipos diferentes de modelos matemáticos nebulosos, mas seus antecedentes são essencialmente os mesmos. Apesar das várias formas de classificar os controladores nebulosos, neste artigo adota-se uma classificação de controladores nebulosos baseados em modelos

nebulosos. Neste contexto, os componentes dos modelos nebulosos são classificados em modelos interpolativos, modelos relacionais e modelos lingüísticos.

Os modelos lingüísticos, foco deste trabalho, são baseados em regras *se-então*, apresentando predicados vagos e utilizando raciocínio nebuloso. Nestes modelos, as quantidades nebulosas são associadas aos termos lingüísticos, e o modelo nebuloso é essencialmente uma expressão qualitativa do sistema. Os modelos, deste tipo, formam a base de modelagem qualitativa, que descreve o comportamento do sistema através da utilização da linguagem natural. O representante mais significativo desta classe é o modelo do tipo Mamdani.

O modelo de Mamdani (Mamdani e Assilian, 1975) caracteriza-se por utilizar os conjuntos nebulosos como consequentes das regras de produção, ou seja,

$$R_i: \text{ se } x_1 \text{ é } A_{i,1} \text{ e } \dots \text{ e } x_m \text{ é } A_{i,m} \text{ então } y \text{ é } C_i \quad (1)$$

onde  $x_i$  são as variáveis de entrada,  $y$  é a variável de saída,  $A_i$  e  $C_i$  são conjuntos nebulosos.

### 2.1. Controle PID nebuloso mais D convencional

O projeto de controlador PI nebuloso adicionado a uma ação D convencional, proposto por Qin (1994), apresentado na Figura 2 foi adotado neste trabalho.

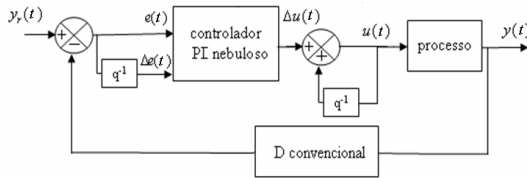


Figura 2. Controle PI nebuloso mais ação D convencional.

As equações que regem este controlador são:

$$u(t) = K_c [u_{PI}(t) + u_D(t)], \quad (2)$$

$$u_{PI}(t) = K_e [e(t)] + K_{\Delta e} [\Delta e(t)] \quad (3)$$

onde  $u(t)$  é a ação de controle incremental,  $u_{PI}(t)$  e  $u_D(t)$  são as ações de controle PI e D;  $K_e$ ,  $K_{\Delta e}$  e  $K_c$  são os fatores de escala do erro  $e(t)$ , da variação do erro  $\Delta e(t)$  e do sinal de controle, respectivamente.

A ação de controle derivativa leva em consideração um ganho em relação à derivada da saída do processo em relação a referência, ou seja,

$$u_D(t) = K_D y(t) - y_r(t), \quad (4)$$

onde  $K_D$  é ganho derivativo da saída do processo e  $y_r(t)$  é a saída de referência (desejada). O princípio deste projeto é o algoritmo do tipo PI nebuloso, que tem a vantagem da implementação de controle derivativo na saída, evitando picos derivativos frente a mudanças de referência.

O controlador PI nebuloso mais D convencional apresenta uma vantagem em relação ao projeto do PID convencional, pois um controlador PID convencional tem um comportamento aceitável quando atua em torno de um determinado ponto de operação, mas, freqüentemente, apresenta um desempenho pobre em regime transiente quando mudanças entre pontos diferentes de operação ocorrem devido a mudanças na dinâmica do processo (comportamento regulatório deficiente) e o controlador não é sintonizado adequadamente.

Para obter-se um desempenho adequado no projeto PI nebuloso combinado à ação D convencional, principalmente quanto aos aspectos relacionados à diminuição da sobre-elevação e do tempo de subida, deve-se considerar que: (i) para diminuir a sobre-elevação deve-se aumentar o fator de escala da ação de controle integral (do controle PI) quando a saída está próxima da referência desejada; (ii) para diminuir o tempo de subida, a ação integral deve ser diminuída (menor fator de escala) durante o regime transiente; (iii) para diminuir o tempo de subida, o ganho do controle PI deve ser aumentado durante o transiente e diminuído quando a saída está próxima da referência.

### 2.1 Otimização do controlador usando ED

A ED combina uma procura adaptativa aleatória com gerador aleatório com distribuição uniforme. Entre as vantagens da ED deve-se destacar: a simplicidade de estrutura, a facilidade no uso e a rapidez da convergência do procedimento de otimização.

Na ED clássica, cada variável (indivíduo) é representada por um valor real (ponto flutuante). A variante implementada neste trabalho foi a abordagem ED/*rand/1/bin*. Os detalhes da otimização usando ED podem ser encontrados em Coelho e Mannala (2005).

A otimização dos ganhos do controlador nebuloso visa a minimização da função objetivo,  $f$ , dada por:

$$f = \sum_{t,k=1}^N k \cdot |e(t)| \quad (5)$$

onde  $N$  é o número total de amostras avaliado,  $e(t)$  é o erro dado pela diferença entre a saída,  $y(t)$ , do sistema e a referência desejada (*set point*),  $y_r(t)$ . Um detalhe importante, é que a variável  $k$  é igual a variável  $t$ , mas é reiniciada a cada mudança de referência (neste trabalho foram 3 mudanças de referência para cada um dos exemplos testados).

A ED foi utilizada para otimização dos fatores de escala do erro ( $K_e$ ), da variação do erro ( $K_{\Delta e}$ ), do sinal de controle ( $K_c$ ) e do ganho derivativo ( $K_D$ ) da parte convencional do controlador. A otimização foi realizada para melhorar o comportamento servo do sistema de controle em malha fechada em sistemas do tipo Hammerstein, estes descritos na próxima seção.

### 3 Descrição dos Sistemas do Tipo Hammerstein

O modelo do tipo Hammerstein consiste de um elemento não-linear seguido por um sistema dinâmico linear como ilustrado na Figura 3.

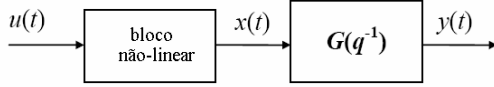


Figura 3. Modelo do tipo Hammerstein.

Na Figura 3, o sinal de entrada e o sinal de saída são representados por  $u(t)$  e  $y(t)$ , respectivamente, e  $G(q^{-1})$  representa a componente do modelo Hammerstein regido por um modelo linear. O bloco não-linear pode ser representado por um polinômio, pela equação da não-linearidade ou através de modelos semi-paramétricos. Neste trabalho adota-se a representação através de uma aproximação dada por uma expansão polinomial  $x(t)$ , tal que

$$x(t) = g_1 u(t) + g_1 u^2(t) + g_1 u^3(t) + \dots + g_m u^m(t) \quad (6)$$

onde  $t$  é o instante de tempo,  $x(t)$  é a pseudo-saída, não-mensurável, do bloco não-linear e  $u(t)$  é a variável de entrada,  $g_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) representam os coeficientes do polinômio e  $m$  é o grau de não-linearidade do modelo.

O modelo de Hammerstein pode ser apresentado, ainda como um caso particular do modelo de Volterra (Aguirre, 2000), tal que

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1}) \sum_{i=1}^m g_i u^i(t-d) + e(t) \quad (7)$$

ou

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})x(t) + e(t) \quad (8)$$

que apresenta a relação linear entre a saída  $y(t)$  e a pseudo-saída  $x(t)$  (Santos, 2003). A seguir são descritos os dois exemplos de modelos do tipo Hammerstein a ser aplicados o controlador nebuloso.

#### 3.1. Exemplo 1: Coluna de destilação

O modelo da coluna de destilação é dado por:

$$y(t) = 0,796y(t-1) + 0,204x(t-1) \quad (9)$$

$$x(t) = 1,04u(t-1) - 14,11u^2(t-1) - 16,72u^3(t-1) + 562,75u^4(t-1) \quad (10)$$

Este modelo relaciona a composição do topo de uma coluna de destilação  $y$  (%) com a taxa de fluxo de refluxo  $u$  (mol/min). Ambas variáveis de entrada e saída no modelo são definidas como desvios dos

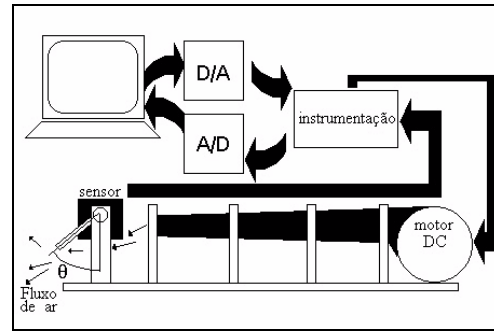
valores nominais. Uma descrição detalhada do modelo pode ser encontrada em Eskinat *et al.* (1991).

#### 3.2. Exemplo 2: Processo fan-and-plate

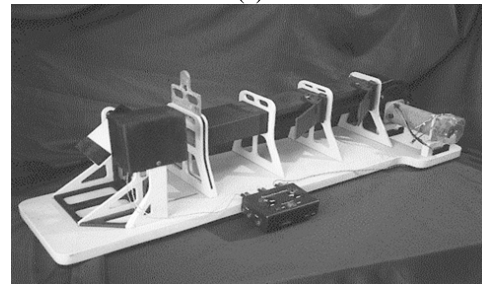
O problema de controle é, basicamente, regular a posição angular de uma placa através da tensão no motor de corrente contínua. A distância entre o ventilador e a placa pode ser alterada modificando, assim, o atraso de transporte do sistema. O protótipo do processo *fan-and-plate* está presente no Laboratório de Controle de Processos (LCP) do Departamento de Automação e Sistemas (DAS) da UFSC, conforme mostrado na Figura 4, possui comportamento não-linear. Neste contexto foi obtido um modelo do tipo Hammerstein para o processo *fan-and-plate*, sendo este descrito em Marchi (1999). O modelo é regido pelas seguintes equações a diferenças:

$$y(t) = 1,0047y(t-1) - 0,3676y(t-2) - 0,0135y(t-3) + x(t-1) \quad (11)$$

$$x(t) = -0,0003u(t-1) + 0,0049u(t-1) + 0,0059u^2(t-1) + 0,0967u^2(t-2) \quad (12)$$



(a)



(b)

Figura 4. (a) Diagrama do processo *fan-and-plate*; (b) fotografia do processo.

### 4 Resultados de Otimização e Controle em Malha Fechada

A implementação do controlador nebuloso foi realizada em ambiente computacional Matlab, da MathWorks. Para calcular os ganhos e os fatores de escala das funções de pertinências dos controladores nebulosos, se utilizou a ED.

As funções de pertinência de erro, variação do erro e sinal de controle dos dois controladores nebulosos são do tipo triangular são projetadas neste trabalho conforme apresentado na figura 5. Na tabela 1 é apresentada a base de regras do controlador nebuloso projetada para o controlador nebuloso para os dois exemplos de sistemas do tipo Hammerstein.

As convenções adotadas na figura 5 e tabela 1 são as seguintes: PP é o Positivo Pequeno, PG é o Positivo Grande, Z é o Zero, NP é o Negativo Pequeno, NG é o Negativo Grande, NS é o Negativo do Sinal de erro, Nd é o Negativo da Derivada do erro, PS consiste do Positivo do Sinal de erro, Pd são o Positivo da Derivada do erro, ZS o Zero do Sinal de erro e Zd é o Zero da Derivada do erro.

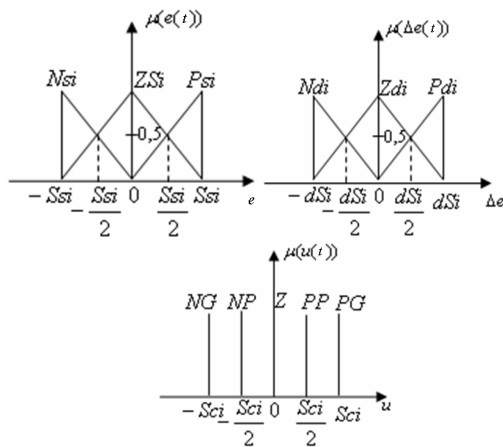


Figura 5. Funções de pertinência do erro, da variação do erro e do sinal de controle.

Tabela 1. Base de regras do controle PI nebuloso.

	$\Delta e$		
$e$	Pd	Zd	Nd
PS	PP	PP	PG
ZS	Z	Z	Z
NS	NG	NP	NP

Nas simulações computacionais de otimização do controlador nebulosos foram utilizados os seguintes parâmetros de projeto:

- tamanho da população da ED: 30 indivíduos (soluções potenciais do projeto do controlador);
- número máximo de gerações (critério de parada) da ED: 30 gerações;
- espaço de busca dos quatro parâmetros de projeto dos dois exemplos:  $K_e \in [0; 5]$ ;  $K_{\Delta e} \in [-6; 1]$ ;  $K_c \in [0; 10]$  e  $K_D \in [0; 0,001]$ .
- restrições impostas ao sinal de controle:
  - exemplo 1:  $u \in [-0,2; 0,2]$  e
  - exemplo 2:  $u \in [0; 5]$ .

Os melhores ganhos obtidos para os dois controladores PID com a otimização via ED são apresentados na tabela 1.

As figuras 5 e 6 mostram os resultados de controle nebuloso em malha fechada quando usados os parâmetros de projeto apresentados na tabela 1. Nota-se que o controlador foi bem sucedido no controle dos dois exemplos. Entretanto, nota-se uma maior dificuldade do controlador em lidar com a dinâmica não-linear do exemplo 1, pois o sistema de controle apresentou dinâmica oscilatória antes de estabilizar na referência desejada.

Tabela 1. Resultado usando ED para otimização do controlador nebuloso PI + D convencional.

exemplo 1: coluna de destilação				
$f$	$K_e$	$K_{\Delta e}$	$K_c$	$K_D$
131,2591	2,5571	-0,6289	3,5078	$2,1 \cdot 10^{-16}$
exemplo 2: processo fan-and-plate				
$f$	$K_e$	$K_{\Delta e}$	$K_c$	$K_D$
3484,9295	2,3089	-0,5531	0,52315	$1,0 \cdot 10^{-16}$

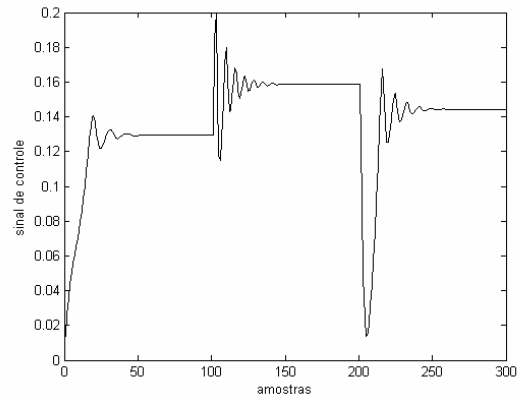
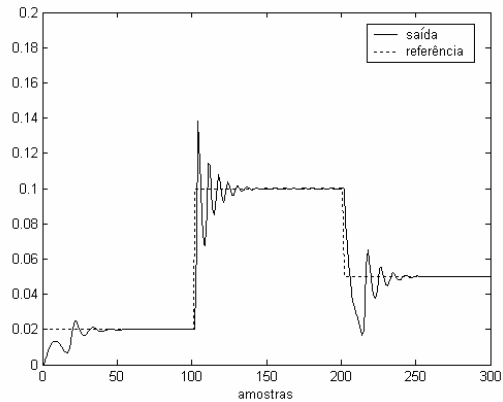


Figura 6. Resultado de controle nebuloso otimizado por ED para o exemplo 1 (coluna de destilação).

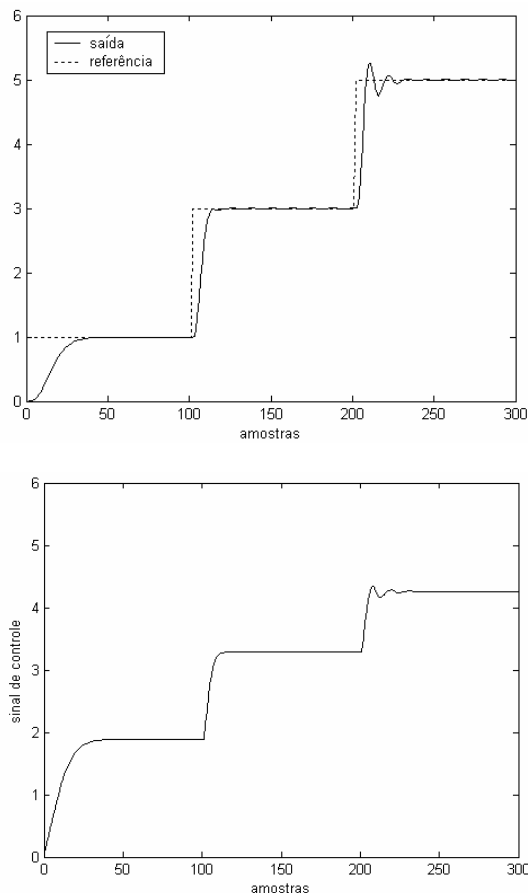


Figura 7. Resultado de controle nebuloso otimizado por ED para o exemplo 2 (processo *fan-and-plate*).

## 5 Conclusão e Futura Pesquisa

A análise e o projeto de um controlador nebuloso do tipo Mamdani requer a sintonia de parâmetros muitas vezes de forma heurística. Neste artigo o projeto de base de regras do controlador nebuloso foi realizado *a priori* e a otimização dos fatores de escala e ganho derivativo de uma concepção de controlador PI nebuloso combinado a ação D convencional foi realizada usando evolução diferencial.

Neste trabalho, a proposta de avaliar dois exemplos de processo não-lineares do tipo Hammerstein foi apresentada e validada com sucesso pelo controlador nebuloso otimizado pela ED. Futura pesquisa visará à concepção de técnicas de controle nebuloso em sistemas não-lineares multivariáveis que apresentem forte acoplamento entre as variáveis de entrada e saída.

## Referências Bibliográficas

Aguirre, L. A. (2000). *Introdução à identificação de sistemas não-lineares: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*, Editora da UFMG, Belo Horizonte, MG.

- Coelho, L. S. e Mannala, M. J. (2005). Sintonia de controladores PID baseada em evolução diferencial aplicada à automação de ensaios em cabos condutores de energia elétrica, *Learning and Nonlinear Models*, **3**(2): 71-83.
- Edgar, C. R. e Postlethwaite, B. E. (2000). MIMO fuzzy internal model, *Automatica*, **36**(6): 867-877.
- Eskinat, E., Johnson, S. H. e Luyben, W. L. (1991). "Use of Hammerstein models in identification of nonlinear systems, *AIChE Journal*, **37**(1): 255-268.
- Gao, X. e Feng, Z. -J. (2005). Design study of an adaptive fuzzy-PD controller for pneumatic servo system, *Control Engineering Practice*, **13**(1): 55-65.
- Jang, J. -S. R. e Sun, C. -T. (1995). Neuro-fuzzy modeling and control, *Proceedings of the IEEE*, **83**(3): 378-406.
- Jee, S. e Koren, Y. (2004). Adaptive fuzzy logic controller for feed drives of a CNC machine tool, *Mechatronics*, **14**(3): 299-326.
- Kolokotsa, D. (2003). Comparison of the performance of fuzzy controllers for the management of the indoor environment, *Building and Environment*, **38**(12): 1439-1450.
- Mamdani, E. H. e Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, **7**(1): 1-13.
- Marchi, P. A. (1999). Abordagem não-linear para modelagem e controle preditivo: estudo de caso, *Dissertação de mestrado*, PGEEL/UFSC, Florianópolis, SC.
- Mraz, M. (2001). The design of intelligent control of a kitchen refrigerator, *Mathematics and Computers in Simulation*, **56**(3): 259-267.
- Park, C. -W. e Park, M. (2004). Adaptive parameter estimator based on T-S fuzzy models and its applications to indirect adaptive fuzzy control design, *Information Sciences*, **159**(1-2): 125-139.
- Qin, S. J. (1994). Auto-tuned fuzzy logic control. *Proceedings of American Control Conference*, Baltimore, Maryland, USA, pp. 2465-2469.
- Santos, J. E. S. (2003). Controle preditivo não-linear para sistemas de Hammerstein, *Qualificação de doutorado*, PGEEL/UFSC, Florianópolis, SC.
- Storn, R. (1997). Differential evolution — a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *Journal of Global Optimization*, **11**(4): 341-359.
- Storn, R. e Price, K. (1995). Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, *Technical Report TR-95-012*, International Computer Science Institute, Berkeley, CA, USA.
- Sun, Q., Li, R. e Zhang, P. (2003). Stable and optimal adaptive fuzzy control of complex systems using fuzzy dynamic model, *Fuzzy Sets and Systems*, **133**(1): 1-17.