

---

# CONTROLE NEBULOSO ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA: PROJETO E APLICAÇÃO EM SISTEMAS NÃO-LINEARES

**Tomas Copetti Callai\***  
tcallai@petrobras.com.br

**Leandro dos Santos Coelho†**  
leandro.coelho@pucpr.br

**Antonio Augusto Rodrigues Coelho‡**  
aarc@das.ufsc.br

\*Petrobras - Petróleo Brasileiro S. A. - Universidade Corporativa Petrobras  
Rua General Canabarro, 500 - 4o andar, CEP 20271.900 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil

†Laboratório de Automação e Sistemas - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PPGEPS/CCET/PUCPR  
Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, CEP 80215.901 - Curitiba, PR, Brasil

‡Departamento de Automação e Sistemas - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC  
Caixa Postal 476, CEP 88040.900 - Florianópolis, SC, Brasil

---

## ABSTRACT

The main contribution of this paper is the investigation of different model reference adaptation schemes for improving the performance of fuzzy logic control. Adaptive fuzzy control strategies are based on: i) fuzzy control with fuzzy internal model; ii) fuzzy control with fuzzy compensation; and iii) proportional and integral control with fuzzy adaptation. Numerical and experimental results are shown in order to assess the performance of each adaptive fuzzy control algorithm in nonlinear processes.

**KEYWORDS:** fuzzy control, nonlinear systems, stability, model reference, adaptive algorithms.

## RESUMO

A contribuição principal deste artigo é investigar diferentes esquemas de adaptação por modelo de referência para melhorar o desempenho de um controlador nebuloso. As abor-

dagens de controle nebuloso adaptativo são: i) controle nebuloso com modelo interno nebuloso; ii) controle nebuloso com compensação nebulosa; e iii) controle proporcional e integral com adaptação nebulosa. Os resultados de simulação e experimentais mostram o desempenho de cada algoritmo de controle nebuloso adaptativo em processos não-lineares.

**PALAVRAS-CHAVE:** controle nebuloso, sistemas não-lineares, estabilidade, modelo de referência, algoritmos adaptativos.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas modernas instalações industriais, os sistemas de controle devem garantir um adequado desempenho no intervalo das condições de operação do processo e estão sujeitos a diversas restrições. Para alguns processos não-lineares complexos, os requisitos de projeto não podem ser satisfeitos quando métodos de controle convencional baseados em modelos lineares do processo são utilizados. Neste contexto, muita atenção deve ser dada ao desenvolvimento de técnicas de identificação e controle não-lineares (Babuška *et al.*, 1996).

Adicionalmente, diversas técnicas de controle moderno vêm

---

Artigo submetido em 28/10/2005  
1a. Revisão em 13/06/2007  
Aceito sob recomendação do Editor Associado  
Prof. Ricardo Ribeiro Gudwin

sendo desenvolvidas nos últimos anos com o objetivo de melhorar o desempenho dos controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo). O controle adaptativo é uma das técnicas que apresenta os melhores resultados quando é necessária uma resposta rápida em sistemas, onde as condições de operação variam. Diferentes esquemas de adaptação foram propostos, tais como, auto-ajustável, modelo de referência e ganho escalonado (Åström e Wittenmark, 1995). O projeto de controladores adaptativos clássicos é baseado na modelagem matemática e é usualmente complexo devido ao esforço computacional dos algoritmos de controle (Minh e Hoang, 1996).

O controle nebuloso tem se mostrado uma alternativa viável ao controle clássico no controle de processos com parâmetros variantes no tempo, não-lineares e com informações imprecisas. Os controladores nebulosos são apropriados quando processos estruturalmente desconhecidos ou pouco conhecidos devem ser controlados. Para estes sistemas a aplicação de um controlador nebuloso frequentemente oferece um desempenho igual ou superior aos controladores convencionais. As leis de controle nebuloso (no caso de controladores linguísticos ou do tipo Mamdani) são definidas por regras linguísticas em uma base de regras. Usando os conceitos da lógica nebulosa, as regras podem ser processadas com um formalismo matemático. Se as regras linguísticas são conhecidas, o engenheiro de controle tem ainda que selecionar o número de conjuntos nebulosos, as funções de pertinência, os fatores de escala e a definição do universo de discurso.

Apesar das diversas aplicações comerciais e industriais bem sucedidas existem algumas desvantagens: (i) é difícil determinar alguns parâmetros do controlador, tais como funções de pertinência, método de desnebulização (“defuzzificação”) e método de inferência, de forma analítica; e (ii) o controlador nebuloso projetado para as condições nominais de um determinado processo pode apresentar um desempenho inadequado se ocorrerem variações paramétricas significantes, alterações estruturais ou perturbações ambientais (Sugeno, 1985; Moudgal *et al.*, 1995; Kung e Liaw, 1996; Chiu, 1998). Como forma de solucionar esses problemas é sugerida a utilização de um controlador nebuloso adaptativo por modelo de referência (Layne e Passino, 1996).

O uso de uma grande faixa de operação no controle de um processo não-linear pode levar o sistema a apresentar um desempenho indesejável devido à dinâmica variável da planta com um controlador nebuloso fixo. Além disso, as regras obtidas podem não ser válidas para todos os pontos de operação da faixa desejada (Rashid e Heger, 1993; Kung e Liaw, 1996; Layne e Passino, 1996; Minh e Hoang, 1996; Mrad e Deeb, 2002). Com o controlador nebuloso por modelo de referência, pretende-se superar as desvantagens de ambas as técnicas utilizando-as de forma complementar. O controla-

dor nebuloso permite que o projeto dispense o uso de modelos matemáticos complexos e se torne computacionalmente atrativo. O controle adaptativo permite que a imprecisão inerente ao projeto do controlador nebuloso seja superada pelo mecanismo de adaptação e que mudanças nas condições de operação sejam incorporadas no controlador.

A adaptação dos parâmetros de um controlador nebuloso possui as seguintes vantagens: (i) a escolha dos parâmetros do controlador nebuloso, que é uma tarefa complexa, pode ser auxiliada por procedimentos adaptativos para melhorar o desempenho destes controladores; (ii) no caso de perturbações e mudanças na dinâmica do processo, o mecanismo de ajuste pode modificar a característica do controlador nebuloso; (iii) o controlador pode ser ajustado para diferentes pontos de operação de sistemas não-lineares; e (iv) a combinação de um mecanismo de adaptação com um controlador auto-ajustável pode resultar em uma sintonia de controle automatizada (Procyk e Mamdani, 1979; Behmenburg, 1993).

Na literatura mencionam-se algumas abordagens para obtenção de uma sinergia entre controle nebuloso e modelos de referência. A seguir, menciona-se algumas destas propostas.

Behmenburg (1993) apresentou o ajuste de um controlador nebuloso por modelo de referência usando o modelo inverso do processo e uma abordagem baseada em gradiente para adaptar os parâmetros do controlador. Layne *et al.* (1993) introduziram a idéia de aprendizado de controle nebuloso usando modelo de referência para aplicações automotivas. Liaw e Lin (1995) desenvolveram um controlador com dois graus de liberdade com modelo de referência seguindo um procedimento de adaptação nebulosa. Li (1996) propôs um sistema de controle nebuloso com ajuste dos fatores de escala baseado em modelo de referência. Si *et al.* (1999) apresentaram um controlador com esquema de aprendizado neuro-nebuloso baseado em modelo de referência e gradiente descendente. Banerjee *et al.* (2000) analisaram o desempenho de um controlador adaptativo nebuloso baseado em modelo de referência para aplicações em processos multivariáveis com atraso de transporte. Koo (2001) propôs um esquema de controle nebuloso adaptativo por modelo de referência aplicado ao controle de um pêndulo invertido. Golea *et al.* (2002) propuseram uma nova metodologia para o projeto de controle adaptativo indireto nebuloso para aplicações em sistemas não-lineares contínuos no tempo. Park e Cho (2003) derivaram um controlador adaptativo direto baseado em identificação nebulosa de modelo Takagi-Sugeno e compensação de distúrbio para o controle de processos multivariáveis.

Outras abordagens relevantes apresentadas na literatura são as de Kovacic *et al.* (1993), Berstecher *et al.* (1996), Lee *et al.* (1996), Jin (1996), Fischle e Schroder (1999), Ordóñez e

Passino (1999), Lam *et al.* (2001), Mustafa (2001), Cho *et al.* (2002), Blazic *et al.* (2003), Yang *et al.* (2003), Gu *et al.* (2006), Feng (2006), Nounou e Rehman (2007) e Lee *et al.* (2007).

Neste artigo, três abordagens de projeto de controladores nebulosos baseadas em modelo de referência são apresentadas e aplicadas. As concepções de controle apresentadas são: (i) controle nebuloso com modelo interno nebuloso; (ii) controle nebuloso com compensação nebulosa; e (iii) controle proporcional e integral com adaptação nebulosa. Os resultados de simulação com a aplicação das técnicas de controle nebulosa em processos não-lineares são apresentados e discutidos. Além disso, as três abordagens são aplicadas em um processo experimental denominado balanço horizontal, servindo para mostrar a robustez e eficiência das técnicas de projeto em um estudo de caso em aplicações práticas. Neste contexto, a contribuição principal deste artigo é investigar diferentes esquemas de adaptação por modelo de referência visando à melhora do desempenho de um controlador nebuloso.

O artigo é organizado da seguinte forma. As estruturas e o projeto de controle nebuloso baseado em modelo de referência são apresentadas na seção 2. Na seção 3 são descritos os testes de simulação e experimentais realizados, além da apresentação e discussão dos resultados obtidos com três abordagens de controle nebuloso. Na seção 4 é apresentada a conclusão e os futuros trabalhos.

## 2 CONTROLE NEBULOSO ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA

Os controladores nebulosos convencionais são desenvolvidos sob a seguinte metodologia de projeto. Os sinais de entrada são, geralmente, o erro do sistema, ( $e(k) = y_r(k) - y(k)$ ) definido como a diferença entre a referência e a saída, e a derivada do erro, ( $de(k) = e(k) - e(k-1)$ ) definido como a diferença entre o erro no instante atual menos o erro no instante anterior.

No procedimento de nebulização (“fuzzificação”) são utilizados três valores nebulosos (negativo, zero e positivo) representados por conjuntos nebulosos, definidos pelas funções de pertinência com formato triangular e trapezoidal mostradas na Figura 1(a). O sinal de controle é calculado a partir de cinco valores nebulosos (negativo grande, negativo pequeno, zero, positivo pequeno e positivo grande), Figura 1(b), ou três valores nebulosos, dependendo do critério de otimização da malha e da estrutura de controle em questão.

A idéia de escolher um modelo de referência para o projeto de controladores tem sido muito utilizada na literatura de controle linear. Um modelo de referência pode ser utili-

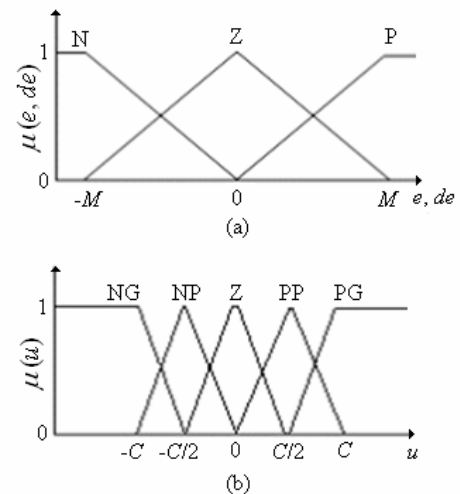


Figura 1: Funções de pertinência.

zado não somente para caracterizar objetivos de desempenho desejado, mas também refletir a possibilidade de achá-los. Os recentes avanços na direção do uso de sistemas nebulosos para controle por modelo de referência têm sido tópicos de diversos estudos.

A principal vantagem dos sistemas de controle nebuloso em comparação com a abordagem de controle convencional reside no fato de que na maioria das vezes nenhuma modelagem matemática é requerida para o projeto do controlador. A operação do controlador é baseada em regras de controle que são estabelecidas usando o conhecimento do comportamento do sistema e a experiência do engenheiro de controle. Entretanto, os controladores nebulosos, como os sistemas convencionais de controle PID, não podem se auto-ajustar para tratar mudanças em seus ambientes ou nas condições operacionais. Neste caso, algumas formas de adaptação são requeridas para manter o desempenho de controle quando da presença de mudanças significativas nas condições operacionais do processo. Visando ao aprimoramento do desempenho dos sistemas de controle para lidar com mudanças no comportamento dinâmico de processos a serem controlados, a seguir, são apresentadas três abordagens de controle nebuloso baseadas em modelo de referência.

### 2.1 Controle nebuloso com modelo nebuloso inverso

O controlador adaptativo proposto por Layne e Passino (1996), *Fuzzy Model Reference Learning Control* (FMRLC), é denominado controle adaptativo direto, uma vez que atualiza diretamente os parâmetros do controlador sem uma identificação explícita dos parâmetros do processo. Este controla-

dor é uma extensão dos conceitos do *self-organizing control* (SOC) proposto por Procyk e Mamdani (1979), em combinação com algumas idéias do *model reference adaptive control* (MRAC) de Åström e Wittenmark (1995).

O controlador FMRLC (Figura 2) utiliza um mecanismo de aprendizado que: (i) observa os dados de entrada e saída de um sistema de controle nebuloso; (ii) avalia o desempenho atual; e (iii) automaticamente sintetiza e/ou ajusta a base de conhecimento e os parâmetros do controlador nebuloso para que os requisitos de controle previamente estabelecidos sejam satisfeitos. Estes requisitos de controle são estabelecidos na definição do modelo de referência (Layne e Passino, 1996).

O controlador da Figura 2 pode ser dividido em três partes diferentes: (i) um controlador nebuloso do tipo PI, ou PID; (ii) um modelo de referência; e (iii) o mecanismo de ajuste da base de conhecimento (MMI – Modelo Nebuloso Inverso). Como controlador nebuloso do tipo PI, ou PID qualquer uma das estruturas apresentadas na literatura, tais como em Kwok *et al.* (1990), Misir *et al.* (1996), Coelho e Coelho (1999) e Golob (2001), pode ser utilizada.

Da mesma forma que o controlador PI ou PID convencional, o controlador nebuloso idealiza três tipos de ação do operador humano: (i) detectar qualquer alteração entre a saída do processo e o valor desejado e, então regular a entrada do processo proporcionalmente a magnitude do erro; (ii) avaliar a taxa de mudança na saída do processo e regular a entrada antecipadamente e; (iii) sumarizar o comportamento da saída por um período e regular a entrada correspondentemente (Kwok *et al.*, 1990).

No entanto, neste trabalho foi avaliado um controlador nebuloso do tipo PI com modelo nebuloso inverso baseado em modelo de referência para minimizar os efeitos do ruído e *kick* derivativo na ação de controle (Bobál *et al.*, 2005).

O modelo de referência propicia a possibilidade de quantificar o desempenho desejado do processo. De um modo geral, o modelo de referência pode ser qualquer tipo de sistema dinâmico calibrado pelo operador em função da dinâmica desejada e planta controlada (Åström e Wittenmark, 1995). O desempenho total do sistema é computado com relação ao modelo de referência gerando um sinal de erro  $e_m(k)$ , onde

$$e_m(k) = y_{mr}(k) - y(k) \quad (1)$$

Os critérios de projeto, tais como, estabilidade, tempo de subida, sobre-sinal, tempo de estabilização, são representados no modelo de referência e a entrada deste é o sinal de referência  $y_r(k)$ . O sistema atinge o desempenho desejado se o mecanismo de ajuste forçar  $e_m(k)$  permanecer num valor

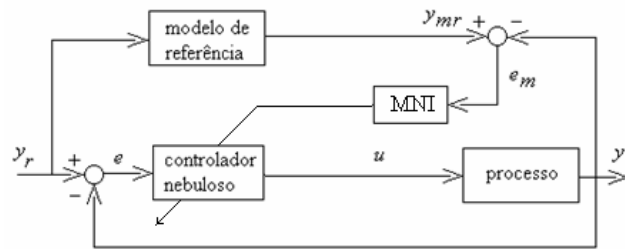


Figura 2: Controlador nebuloso com modelo nebuloso inverso.

mínimo ou nulo (Layne e Passino, 1996). Uma vez que a saída do sistema atinja o valor desejado, então  $e_m(k)$  tende a zero e o mecanismo de ajuste não tem influência significativa no sistema.

O mecanismo de ajuste é composto por um modelo nebuloso inverso (MNI) e por um “modificador da base de conhecimento”. O modelo nebuloso inverso tem a função de mapear o sinal  $e_m(k)$  para as modificações necessárias nos parâmetros do controlador, ou seja, determina como alterar a entrada do processo para que a saída esteja o mais próxima possível da saída do modelo de referência. É importante ressaltar e que não é necessário nem mesmo que um modelo matemático preciso do processo, e que não é necessário, nem mesmo que exista a inversa do processo (processos de fase não-mínima). Apenas uma idéia aproximada é necessária.

A modificação da base de regras se dá através da atualização dos valores dos centros das funções de pertinência. Com as informações a respeito das modificações necessárias nos parâmetros do controlador regidas pelo vetor  $p(k)$  proveniente do modelo nebuloso inverso, o mecanismo de ajuste altera os parâmetros do vetor dos centros de massa das funções de pertinência de saída, alterando assim o sinal de controle aplicado.

Sejam  $c_n^{j,\dots,k,l,\dots,m}$  os centros das funções de pertinência simétricas associadas aos conjuntos nebulosos  $U_n^{j,\dots,k,l,\dots,m}$ . A modificação da base de conhecimento é efetuada deslocando-se os centros das funções de pertinência dos conjuntos nebulosos  $U_n^{j,\dots,k,l,\dots,m}$  que estão associados com os conjuntos nebulosos que contribuíram para a ação de controle anterior  $u(k-1)$ . O tamanho do deslocamento dos centros é determinado pelo vetor  $p(k) = [p_1(k) \dots p_r(k)]^T$ , conforme a equação (2).

$$c_n^{j,\dots,k,l,\dots,m}(k) = c_n^{j,\dots,k,l,\dots,m}(k-1) + p_n(k) \quad (2)$$

As principais características deste controlador são: (i) apresenta uma adaptação local, pois o mecanismo de ajuste altera

Tabela 1: Base de regras do controlador PI nebuloso.

		erro, $e$		
		N	Z	P
variação do erro, $de$	N	Z	NP	PP
	Z	NG	Z	PG
	P	NP	PP	Z

Tabela 2: Base de regras do modelo nebuloso inverso.

		erro, $e$		
		N	Z	P
variação do erro, $de$	N	NG	Z	PP
	Z	NP	Z	PP
	P	NP	Z	PG

somente os centros das funções de pertinência ativadas naquele instante, e (ii) possui uma memória uma vez que em uma nova condição operacional o controlador deve adaptar-se, mas se retornar a essa mesma condição de operação já estará bem sintonizado.

Para ilustrar o funcionamento do controlador da Figura 2 são apresentadas as bases de regras do controlador FPI (Tabela 1) usado na malha direta, e do modelo nebuloso inverso (Tabela 2).

Nas Tabelas 1 e 2, os valores são definidos da seguinte forma: N – Negativo; Z – Zero; P – Positivo; NG – Negativo Grande; NP – Negativo Pequeno; PG – Positivo Grande e PP – Positivo Pequeno.

## 2.2 Controle nebuloso adaptativo com compensação nebulosa

Segundo Minh e Hoang (1996) a adaptação de um sistema de controle nebuloso pode ser obtida usando os mesmos esquemas desenvolvidos para os sistemas adaptativos clássicos. No entanto, tanto o projeto quanto a implementação podem ser simplificados pelo uso da lógica nebulosa no mecanismo de adaptação.

O diagrama da Figura 3 representa o controlador nebuloso adaptativo de Minh e Hoang (1996). Da mesma forma que a estrutura apresentada na Figura 2 o modelo de referência é responsável pela determinação da dinâmica desejada, e na maioria dos casos um sistema de primeira ordem pode ser usado como modelo de referência. Como a entrada apli-

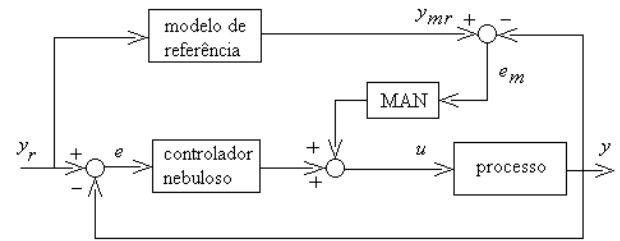


Figura 3: Controlador nebuloso adaptativo com compensação nebulosa.

cada tanto no modelo de referência quanto no controlador nebuloso é a mesma, a diferença ( $e_m$ ) entre a saída real ( $y$ ) e a saída do modelo de referência ( $y_{mr}$ ), valor desejado, serve como sinal de entrada para o mecanismo de adaptação. O mecanismo de adaptação nebuloso (MAN) gera, a partir desse sinal de erro ( $e_m$ ), uma compensação que é adicionada diretamente ao sinal de controle.

A estrutura interna do mecanismo de adaptação nebuloso (MAN) é muito similar a de um controlador PD nebuloso (Minh e Hoang, 1996; Kwok *et al.* 1990). Como tal, utiliza como sinais de entrada o erro do modelo, equação (3), e a variação do erro do modelo, equação (4), e calcula o sinal de controle correspondente através da avaliação das regras.

$$e_m(k) = y(k) - y_{mr}(k) \quad (3)$$

$$ce_m(k) = e_m(k) - e_m(k-1) \quad (4)$$

## 2.3 Controle PI convencional com adaptação nebulosa

O controlador apresentado na Figura 4 é uma proposta de alteração do controlador apresentado por Minh e Hoang (1996). A estrutura de funcionamento é basicamente a mesma: um modelo de referência determina as especificações de desempenho que devem ser atingidas e um mecanismo de adaptação nebulosa compensa a diferença entre a saída real e a saída desejada. A única diferença é que neste controlador é sugerida a utilização de um controlador PI convencional (fixo) na malha principal.

Grande parte dos controladores utilizados na indústria é do tipo PI(D) pelo conhecimento operacional de operadores de planta e da fácil implementação digital. Para típicos problemas de controle tais como fluxo, nível, etc. o controlador PI é suficiente. A equação PI analógica tem a seguinte forma:



$$U(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} \right] E(s) \quad (5)$$

enquanto que a equação de controle PI digital é dada por

$$u(k) = u(k-1) + K_c \left[ \frac{T_s}{T_i} e(k) + \Delta e(k) \right] \quad (6)$$

onde  $T_s$  é o período de amostragem,  $(K_c, T_i)$  são os ganhos do controlador e  $\Delta e(k)$  é a variação do erro.

As vantagens do controlador PI com adaptação adaptativa se referem principalmente a facilidade de projeto e implementação, uma vez que as técnicas de sintonia de controladores clássicos são bem conhecidas e bem exploradas na literatura de controle clássico. A idéia básica é sintonizar um controlador PI convencional para a condição nominal de operação e, quando houver alguma alteração no desempenho do sistema, o mecanismo de adaptação nebuloso deve compensar as imprecisões na dinâmica de malha fechada, devido a mudanças paramétricas ou a presença de ruído (proposta de malha de controle para tratar sistemas complexos).

Quando o controlador está operando nas condições nominais, o seguimento do modelo é perfeito e o mecanismo de adaptação não tem função. Se mudanças paramétricas significativas ocorrem, ou o conhecimento representado na base de regras não é confiável, um sinal de adaptação é produzido pelo mecanismo de adaptação nebuloso e é adicionado ao sinal de controle gerado pelo controlador direto, neste caso, o controlador PI convencional (Mrad e Deeb, 2002).

### 3 ANÁLISE DE RESULTADOS

Para comparar o desempenho dos sistemas de controle baseados em modelo de referência, de acordo com o seguimento de referência e a energia de controle aplicada, os seguintes índices são utilizados:

(i) somatório do erro quadrático:

$$J_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [e(k)]^2 \quad (7)$$

(ii) somatório do incremento de controle quadrático:

$$J_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [u(k) - u(k-1)]^2. \quad (8)$$

### 3.1 Resultados de simulação

Para efeito de avaliação das abordagens de projeto do controle nebuloso por modelo de referência são efetuadas simulações em um processo não-linear regido pela seguinte equação:

$$\dot{y}(k) = -y(k) + \text{sen}^2 \left( \sqrt{|y(k)|} \right) + u(k) \quad (9)$$

O modelo matemático do processo utilizado nas simulações, representado na equação (9), tem um alto grau de não-linearidade, como pode ser visualizado na Figura 5, que representa a não-linearidade estática da planta, ou seja, a variação do ganho estático de acordo com o nível da entrada. O ponto de operação de interesse para as simulações com variação de referência e perturbação de carga está em torno da origem (0,0), onde existe um ponto de inflexão na curva do ganho, tornando uma situação altamente não-linear.

As simulações são efetuadas por um período de 90 seg. O objetivo da simulação é avaliar o desempenho dos controladores nebulosos frente a um sistema não-linear, portanto, a variação da referência é feita da seguinte forma: no instante inicial é aplicado um degrau de magnitude (-2), após 30 seg a referência é colocada em (2) e permanece nesse nível.

No instante 60 seg é aplicada uma perturbação de carga de magnitude (-2), para que possa ser avaliada também a capacidade do controlador de rejeitar perturbações, e não só de realizar o seguimento de referência.

Na Figura 6 apresenta-se a dinâmica do controlador PI nebuloso sem nenhum tipo de adaptação para que possa ser realizada uma comparação entre os controladores, e que se possa ter uma dimensão da contribuição do sistema adaptativo. Essa comparação é relevante, porque o ajuste do controlador PI nebuloso não-adaptativo é a mesma dos controladores PI nebulosos implementados em conjunto com a sintonia das estratégias adaptativas. Portanto, a melhora que pode ser percebida nas respostas das Figuras 7 e 8 se deve a introdução da capacidade de adaptação aos controladores nebulosos (Layne e Passino, 1996; Minh e Hoang, 1996).

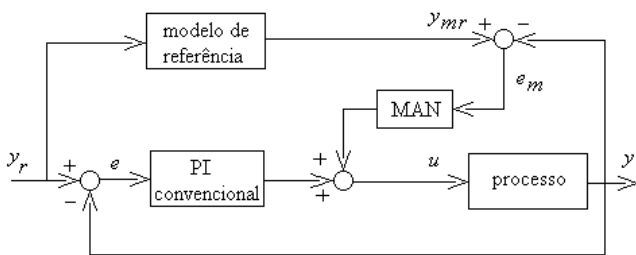


Figura 4: Controlador PI clássico com adaptação nebulosa.

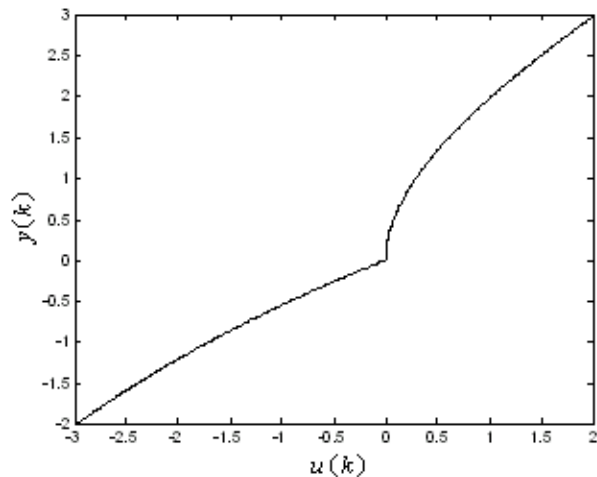


Figura 5: Não-linearidade estática do processo.

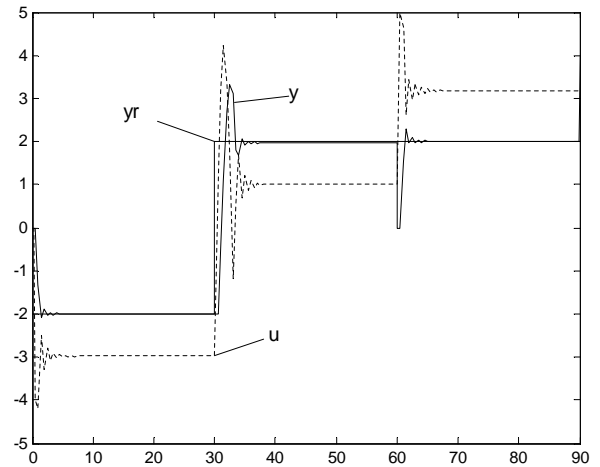


Figura 7: Controlador PI nebuloso com modelo nebuloso inverso.

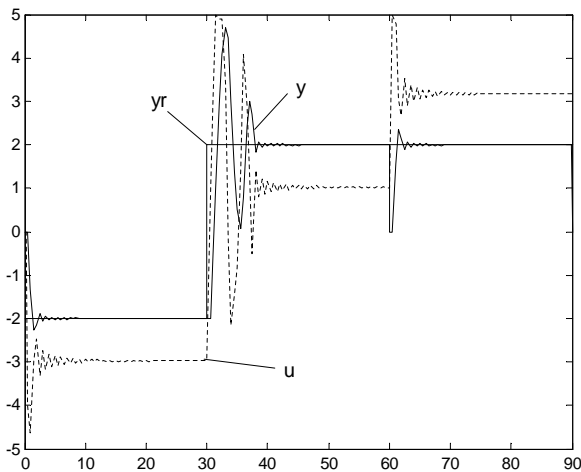


Figura 6: Controlador PI nebuloso não-adaptativo.

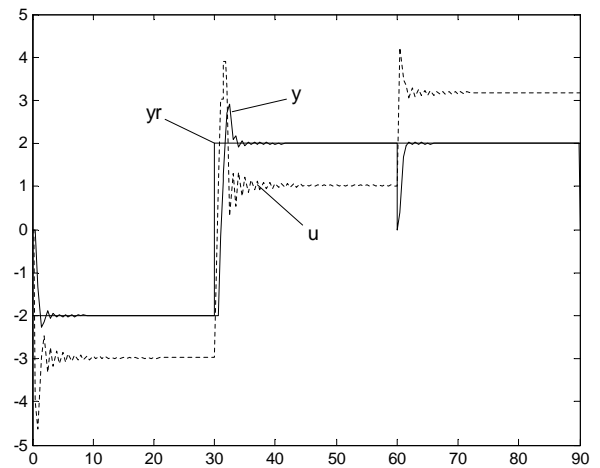


Figura 8: Controlador PI nebuloso com compensação nebulosa.

Enquanto o controlador PI nebuloso apresenta uma dinâmica pouco amortecida, os controladores PI nebulosos adaptativos apresentam uma rápida convergência e um menor sobre-sinal.

A resposta do controlador PI fixo com compensação nebulosa é a que apresenta o controle mais suave, mas um pouco oscilatório e lento (Figura 9). Para que se tenha uma dimensão quantitativa do desempenho dos controladores, na Tabela 3 são apresentados os resultados dos índices de desempenho e avaliados por 15 seg após cada alteração nas condições de operação do sistema.

Quantitativamente, nota-se que o controlador PI nebuloso com compensação nebulosa obteve o melhor desempenho em relação ao critério  $J_1$ . Neste contexto, observa-se pela Figura 8 que o controlador PI nebuloso com compensação nebulosa

apresenta bom seguimento de referência com erro nulo em regime permanente, destacando-se principalmente para a referência  $y(k)=2$  com sobre-elevação menor em relação aos outros controladores testados (Figuras 5, 6 e 8). Em termos da ação de controle, o controlador PI fixo com compensação nebulosa mostra o menor esforço de controle (critério  $J_2$ ). No entanto, o desempenho do controlador PI fixo com compensação nebulosa em termos do critério  $J_1$  só é superior ao controlador PI nebuloso (caso não-adaptativo), dos controladores analisados.

## 3.2 Resultados experimentais

Para efeito de comprovação da eficácia dos controladores nebulosos apresentados na seção 2, foi efetuado um experimento em um processo de laboratório ilustrado na Figura

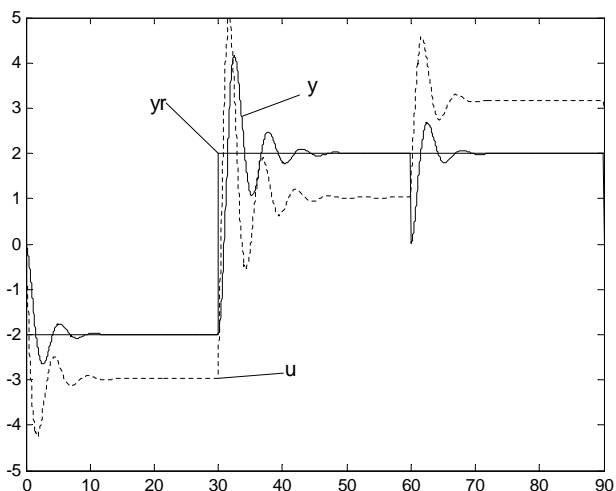


Figura 9: Controlador PI fixo com compensação nebulosa.

Tabela 3: Índices da simulação numérica.

critério	controlador			
	1	2	3	4
$J_1$	0,4718	0,3296	0,2977	0,3368
$J_2$	0,6050	0,4476	0,3629	0,2394

notação adotada:  
 controlador 1: PI nebuloso (não-adaptativo)  
 controlador 2: PI nebuloso com modelo nebuloso inverso  
 controlador 3: PI nebuloso com compensação nebulosa  
 controlador 4: PI fixo com compensação nebulosa

10. Esse processo é selecionado por apresentar um elevado grau de complexidade, isto é, integrador duplo, instabilidade em malha aberta, fase não-mínima e não-linearidades. As características deste processo tornam o uso de controladores convencionais inadequado, justificando o uso dos controladores nebulosos.

O processo utilizado nas experimentações denomina-se balanço horizontal e é constituído por uma haste horizontal com hélices conectadas as suas extremidades e um potenciômetro conectado ao eixo central. O objetivo de controle é posicionar a haste em ângulos pré-determinados através do controle da velocidade de rotação de uma das hélices, enquanto a outra é mantida em rotação constante. O ângulo de inclinação é obtido por um potenciômetro conectado no eixo central.

Cada controlador é avaliado com base em testes de seguimento de referência. O período de amostragem selecionado é 250 mseg e os experimentos tem a duração de 450 amostras (112,5 seg). Primeiro é aplicado um degrau de 2 Volts no instante inicial do experimento, após 150 períodos de amos-

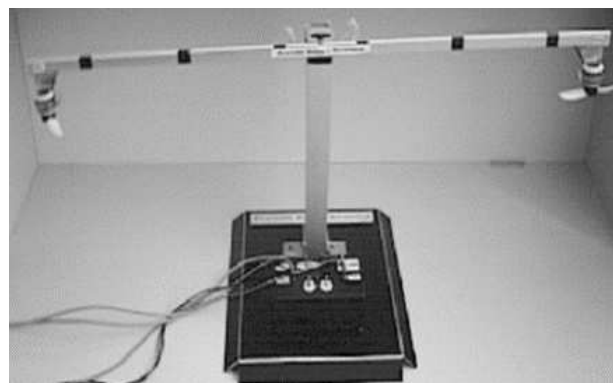


Figura 10: Processo experimental balanço horizontal.

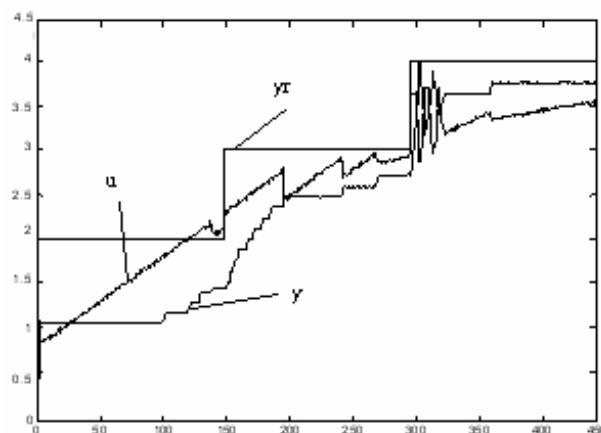


Figura 11: Controlador PI nebuloso não-adaptativo.

tagem a referência é deslocada para 3 Volts e, por fim, a referência é 4 Volts após o mesmo período de tempo permanecendo nesse nível até o final do experimento.

Os resultados experimentais foram obtidos no controle do processo balanço horizontal (Figura 10) e são apresentadas as respostas do sistema controlado pelos três controladores adaptativos apresentados. O experimento de rejeição de carga é efetuado aplicando uma perturbação elétrica de 0,5 Volts no instante 120 seg na saída do processo. Os índices de desempenho são também apresentados na Tabela 4 e computados por 20 seg após cada alteração nas condições de operação.

Os resultados são apresentados da seguinte forma: controlador PI nebuloso não-adaptativo na Figura 11; controlador PI nebuloso com modelo nebuloso inverso na Figura 12; controlador PI nebuloso com compensação nebulosa na Figura 13 e controlador PI fixo com compensação nebulosa na Figura 14.



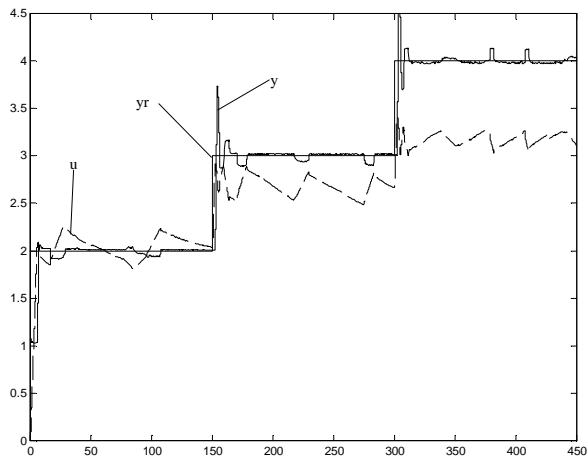


Figura 12: Controlador PI nebuloso com modelo nebuloso inverso.

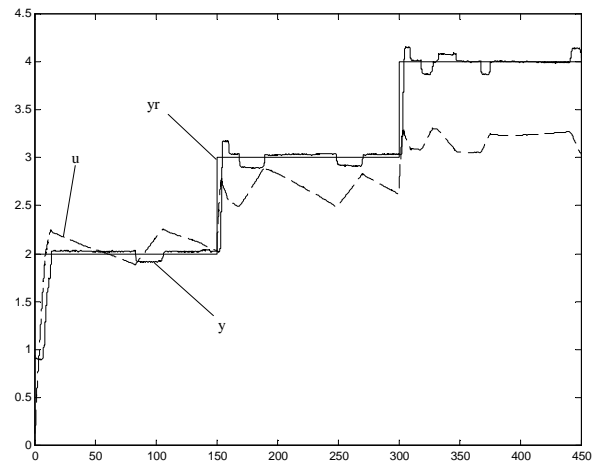


Figura 14: Controlador PI fixo com compensação nebulosa.

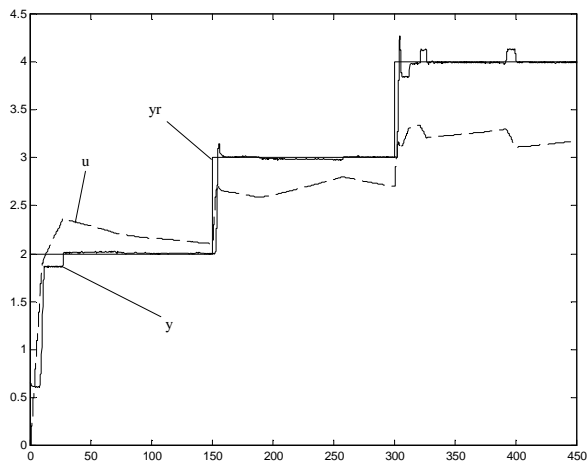


Figura 13: Controlador PI nebuloso com compensação nebulosa.

De acordo com as dinâmicas das Figuras 11 a 14 e da Tabela 4 observa-se que os resultados obtidos na experimentação são bastante promissores, pois em todos os três casos o sistema conseguiu realizar ambas as tarefas, seguimento de referência e rejeição de perturbação, de forma satisfatória e com uma dinâmica bem comportada (desempenhos significativamente superiores ao controlador PI nebuloso não-adaptativo).

Como forma de permitir uma melhor comparação entre os três controladores nebulosos abordados são apresentados os índices de desempenho (Tabela 4) relativos ao desvio no seguimento de referência e ao esforço de controle. Nota-se que os controladores PI nebuloso com modelo nebuloso inverso e PI nebuloso com compensação nebulosa têm desempenho superior aos outros dois controladores testados em relação ao critério  $J_1$  vinculado ao desvio no seguimento de referência.

Tabela 4: Índices de desempenho dos experimentos.

critério	controlador			
	1	2	3	4
$J_1$	0,4753	0,0863	0,0916	0,3368
$J_2(x 10^{-3})$	1,7398	0,0467	0,4215	2,1932

notação adotada:  
 controlador 1: PI nebuloso (não-adaptativo)  
 controlador 2: PI nebuloso com modelo nebuloso inverso  
 controlador 3: PI nebuloso com compensação nebulosa  
 controlador 4: PI fixo com compensação nebulosa

Entretanto, em termos da ação de controle, o controlador PI fixo com modelo nebuloso inverso apresenta o menor esforço de controle (critério  $J_2$ ) dos controladores testados.

## 4 CONCLUSÃO E FUTUROS TRABALHOS

Neste artigo foram apresentados três tipos diferentes de concepções de controladores adaptativos que utilizam a lógica nebulosa como ferramenta para adaptação e/ou como controlador nebuloso adaptativo por modelo de referência.

Todas as estruturas foram avaliadas tanto em simulações quanto em experimentos de laboratório. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios e os controladores propostos apresentaram uma melhora significativa de desempenho quando comparados com a estrutura de controle nebulosa sem características de adaptação.

Neste artigo mostrou-se que os controladores adaptativos nebulosos são boas soluções para o controle de plantas com alto

grau de complexidades e plantas não-lineares, sem a necessidade de realizar a identificação de modelos matemáticos linearizados, muitas vezes ineficazes, ou não-lineares, difíceis de serem obtidos na prática.

A melhora apresentada na comparação entre os métodos utilizados é válida, mesmo sabendo das diferenças entre as estruturas básicas destes controladores. No entanto, é interessante que sejam efetuados novos ensaios, em estudos de casos comparativos, entre as estruturas de controle apresentadas para consolidar os resultados apresentados neste artigo.

Para futuros trabalhos deseja-se estender a análise e o projeto de controladores nebulosos usando modelo de referência para sistemas monovariáveis com ruído estocástico e sistemas multivariáveis não-lineares.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao editor associado e aos revisores deste trabalho, que contribuíram significativamente através de suas sugestões.

## REFERÊNCIAS

- Åström, K. J. e Wittenmark B. (1995). *Adaptive control*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Babuška, R.; te Braake, H. A. B.; van Can, H. J. L., Krijgsman, A. J. e Verbruggen, H. B. (1996). Comparison of intelligent control schemes for real-time pressure control, *Control Engineering Practice*, vol. 4, no. 11, pp. 1585-1592.
- Banerjee, J. S.; Jones, K. O. e Williams, D. (2000). Multivariable model reference fuzzy adaptive control, *IEE Colloquium on Learning Systems for Control*, Birmingham, UK, pp. 10/1-10/4.
- Behmenburg, C. (1993). Model reference adaptive systems with fuzzy logic controllers, *Proceedings of 2nd IEEE Conference on Control Applications*, Vancouver, BC, Canada, pp. 172-176.
- Berstecher, R. G.; Palm, R. e Unbehauen, H. (1996). Direct fuzzy adaptation of a fuzzy controller, *Proceedings of the 13th World Congress of IFAC*, San Francisco, CA, USA, vol. K, pp. 49-54.
- Blazic, S.; Skrjanc, I. e Matko, D. (2003). Globally stable direct fuzzy model reference adaptive control, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 139, No. 1, pp. 3-33.
- Bobál, V.; Böhm, J.; Fessl, J. e Macháček, J. (2005). *Digital self-tuning controllers*. Springer-Verlag, London, UK.
- Chiu, S. (1998). Using fuzzy logic in control applications: beyond fuzzy PID control, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 18, No. 5, pp. 100-104.
- Cho, Y. -W., Park, C. -W. e Park, M. (2002). An indirect model reference adaptive fuzzy control for SISO Takagi-Sugeno model, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 131, No. 2, pp. 197-215.
- Coelho, L. S. e Coelho, A. A. R. (1999). Fuzzy PID controllers: structures, design principles and application for nonlinear practical process, *Advances in soft computing - engineering design and manufacturing*, Roy, R., Furuhashi, T. e P. K. Chawdhry (eds.), Springer-Verlag, London, pp. 147-159.
- Feng G. (2006). A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 14, No. 5, pp. 676-697.
- Fischle, K. e Schroder, D. (1999). An improved stable adaptive fuzzy control method, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 27-40.
- Golea, N.; Golea, A. e Kadjoudj, M. (2002). Indirect fuzzy adaptive control: hyperstability approach, *Proceedings of the 28th IEEE Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, IECON, Sevilla, Spain, pp. 1487-1492.
- Golob, M. (2001). Decomposed fuzzy proportional-integral-derivative controllers, *Applied Soft Computing*, Vol. 18, No. 3, pp. 1-14.
- Gu, H.; Zhang, T. e Shen, Q. (2006). Decentralized model reference adaptive sliding mode control based on fuzzy model, *Journal of Systems Engineering and Electronics*, Vol. 17, No. 1, pp. 182-192.
- Jin, Y. (1998). Decentralized adaptive fuzzy control of robot manipulators, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, Vol. 28, No. 1, pp. 47-57.
- Koo, T. J. (2001). Stable model reference adaptive fuzzy control of a class of nonlinear systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 9, No. 4, pp. 624-636.
- Kovacic, Z.; Borgdan, S. e Crnošija, P. (1993). Fuzzy rule-based model reference adaptive control of permanent magnet synchronous motor drives, *Proceedings of the 19th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vol. 1, Lahaina-Maui, Hawaii, pp. 207-212.
- Kung, Y. S. e Liaw C. (1996). A fuzzy controller improving a linear model following controller for motor drives, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 2, No. 3, pp. 194-202.

- Kwok, D. P.; Tam, P.; Li, C. K. e P. Wang (1990). Linguistic PID controllers, *Proceedings of 11th World Congress of IFAC*, Tallinn, Estonia, USSR, Vol. 7, pp. 192-197, 1990.
- Lam, H. K.; Leung, F. H. F. e Tam, P. K. S. (2001). Fuzzy control of a class of multivariable nonlinear systems subject to parameter uncertainties: model reference approach, *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 26, No. 2, pp. 129-144.
- Layne, J. R. e Passino, K. M. (1996). Fuzzy model reference learning control, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 33-47.
- Layne, J. R.; Passino, K. M. e Yurkovich, S. (1993). Fuzzy learning control for antiskid braking systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 122-129.
- Lee, C. H.; Chen, B. S. e Chang, Y. C. (1996). H-infinity tracking design of uncertain nonlinear SISO systems: adaptive fuzzy approach, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 32-43.
- Lee, W. -K.; Hyun, C. -H.; Lee, H.; Kim, E. e Park, M. (2007). Model reference adaptive synchronization of T-S fuzzy discrete chaotic systems using output tracking control, *Chaos, Solitons, and Fractals*, Vol. 34, No. 5, pp. 1590-1598.
- Li, H. -X. (1996). Adaptive fuzzy control, *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Beijing, China, Vol. 1, pp. 366-371.
- Liaw, C. M. e Lin, F. J. (1995). Position control with fuzzy adaptation for induction servomotor drive, *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, Vol. 142, No. 6, pp. 397-404.
- Minh, T. C. e Hoang, L. -H. (1996). Model reference adaptive fuzzy controller and fuzzy estimator for high performance induction motor drives, *Proceedings of 31st IEEE Annual Conference of the Industrial Application Society*, San Diego, USA, pp. 380-387.
- Misir, D.; Malki, H. A. e Chen, G. (1996). Design and analysis of a fuzzy proportional-integral-derivative controller, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 79, No. 3, pp. 297-314.
- Moudgal, V. G.; Kwong, W. A.; Passino, K. M. e Yurkovich, S. (1995). Fuzzy learning control for a flexible-link robot, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 199-210.
- Mrad F. e Deeb G. (2002). Experimental comparative analysis of adaptive fuzzy logic controllers, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 250-255.
- Mustafa, M. M. (2001). Fuzzy inference using piecewise polynomial interpolation and its application to model-reference fuzzy logic controller, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 118, No. 2, pp. 257-270.
- Nounou, H. N. e Rehman, H. (2007). Application of adaptive fuzzy control to AC machines, *Applied Soft Computing*, Vol. 7, No. 3, pp. 899-907.
- Ordóñez, R. e Passino, K. M. (1999). Stable multi-input multi-output adaptive fuzzy/neural control, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 345-353.
- Park, C. -W. e Cho, Y. -W. (2003). Adaptive tracking control of flexible joint manipulator based on fuzzy model reference approach, *IEE Proc. - Control Theory Appl.*, Vol. 150, No. 2, pp. 198-204.
- Procyk, T. e Mamdani, E. (1979). A linguistic self-organizing controller, *Automatica*, Vol. 15, No. 1, pp. 15-30.
- Rashid, N. K. A. e Heger, A. S. (1993). Tuning of fuzzy logic controllers by parameter estimation method, *Fuzzy Logic and Control: Software and Hardware Applications*, M. Jamshidi, N. Vadiie e T. Ross (eds.), Prentice Hall, pp. 374-392.
- Si, J.; Zhang, N. e Tang, R. (1999). A new on-line fuzzy control scheme based on reference model, *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, Washington, DC, USA, Vol. 6, pp. 4213-4216.
- Sugeno, M. (1985). An introductory survey of fuzzy control, *Information Science*, Vol. 36, No. 1-2, pp. 59-83.
- Yang, Y.; Zhou, C. e Ren, J. (2003). Model reference adaptive robust fuzzy control for ship steering autopilot with uncertain nonlinear systems, *Applied Soft Computing*, Vol. 3, No. 4, pp. 305-316.