

# Controle Fuzzy-GA para Supressão de Vibrações com Acompanhamento de Referência

Carlos A. G. Fonseca  
UERN  
CEP 59124-400 Natal, RN  
cagf@ufrnet.br

Fábio M. U. de Araújo  
LECA, CT, UFRN  
CEP 59072-970 Natal, RN  
meneghet@dca.ufrn.br

André L. Maitelli  
LECA, CT, UFRN  
CEP 59072-970 Natal, RN  
maitelli@dca.ufrn.br

**Resumo** - Neste trabalho são apresentados três controladores nebulosos, do tipo Takagi-Sugeno-Kang, utilizados para suprimir vibrações mecânicas em um sistema eletro-mecânico baseado no princípio da alavanca. Buscando-se um melhor desempenho do sistema controlado e a simplificação do processo de sintonia desses controladores foram utilizados algoritmos genéticos na otimização de suas funções de pertinência, de entrada, sua memória associativa nebulosa e suas funções Sugeno, de saída. Esse sistema de controle demonstra então, a aplicação de duas técnicas de inteligência artificial para resolver um problema em que técnicas de controle linear podem não propiciar uma solução adequada ou exigir um alto grau de complexidade para que essa solução seja alcançada. Foram realizadas várias simulações digitais para se avaliar o desempenho do sistema controlado, avaliou-se a supressão de vibrações no que diz respeito ao rastreamento de referência na presença de distúrbios, comprovando-se a eficácia do algoritmo proposto na otimização de controladores nebulosos. Foi feita uma comparação entre os resultados obtidos com os diversos controladores.

**Palavras-chave** - Controle nebuloso, algoritmos genéticos, otimização, supressão de vibrações.

## I. INTRODUÇÃO

A incerteza e a imprecisão são dois dos principais aspectos da imperfeição da informação. Quando se lida com informações, como no caso de modelos matemáticos, ou de qualquer outra natureza, para representação de fenômenos ou sistemas físicos, estes aspectos requerem uma grande atenção, pois estão intrinsecamente ligados entre si e ao mesmo tempo são opostos [1].

A teoria dos conjuntos nebulosos foi desenvolvida a partir de 1965 por Zadeh, para tratar do aspecto vago

da informação [2]. Esta teoria é adequada para o tratamento de informações fornecidas por seres humanos.

Sistemas de controle nebuloso vem sendo utilizados com sucesso em áreas nas quais as técnicas tradicionais podem não ser tão eficientes, como: eletrodomésticos, sistemas de auxílio à tomada de decisão e controle industrial sofisticado [3]. Esta ineficiência das técnicas tradicionais está relacionada às características intrínsecas ao sistema, devido à necessidade de se agregar conhecimento especializado de operadores humanos, ou até mesmo em situações onde o sistema possui dinâmica pouco conhecida ou fortes não-linearidades.

A utilização de controladores nebulosos implica no ajuste de vários parâmetros e a medida em que a complexidade do processo aumenta, torna-se cada vez mais difícil se estabelecer a configuração ideal de um controlador nebuloso. Neste trabalho, sugere-se a aplicação de algoritmos genéticos para otimização dos parâmetros de controladores nebulosos, do tipo Takagi-Sugeno-Kang (TSK), utilizados para supressão de vibrações em um sistema eletro-mecânico baseado no princípio da alavanca. Aborda-se a otimização das funções de pertinência de entrada, da base de regras e das funções sugeno de primeira ordem desses controladores. Com isso objetiva-se tornar automática a busca dos parâmetros ótimos dos controladores, facilitando assim o seu uso.

## II. SISTEMA ELETROMECAÂNICO

O sistema eletromecânico a ser controlado foi o mesmo apresentado em [4]. Consiste de uma alavanca bi-apoiada em sistemas dotados de rigidez e amortecimento. O apoio central conta com um servoposicionador, que atua sobre o sistema provendo deslocamentos verticais que são usados para cancelar vibrações provenientes da base, isolando a carga útil que está apoiada na extremidade livre da alavanca. A Figura I mostra este sistema.

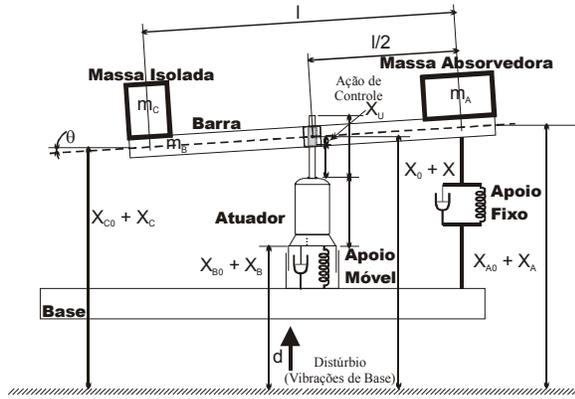


FIGURA I. SISTEMA ELETROMECHANICO

Vários modelos matemáticos têm sido apresentados para tal sistema. Em [5] o seguinte modelo linearizado no domínio da frequência para o sistema de alavanca sem o atuador é encontrado:

$$Y(s) = \begin{bmatrix} G(s) & G_d(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_U(s) \\ D(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

E a seguinte equação diferencial, também linear, para o atuador:

$$\begin{aligned} T_m \ddot{\theta}_m(t) + \dot{\theta}_m(t) &= k_m e_a(t) \Rightarrow \\ \Rightarrow T_m \frac{\ddot{x}_u(t)}{L_p} + \frac{\dot{x}_u(t)}{L_p} &= k_m e_a(t) \end{aligned} \quad (2)$$

onde:

$$\begin{aligned} T_m &= 0,0395s \quad k_m = 12,7707(v \cdot s)^{-1} \\ L_p &= 0,01m / rad \end{aligned}$$

Os modelos matemáticos das funções de transferência  $G(s)$  e  $G_d(s)$ , foram discretizados com um período de amostragem de 0,01s, foi utilizado o método segurador de ordem zero nas entradas. Estas funções são utilizadas para implementação do algoritmo proposto neste trabalho, para otimização dos controladores fuzzy.

A função de transferência  $G(s)$  discretizada, da forma mencionada anteriormente, é dada por:

$$G(z) = \frac{\beta_1 z^5 - \beta_2 z^4 - \beta_3 z^3 + \beta_4 z^2 - \beta_5 z + \beta_6}{z^6 - \alpha_1 z^5 + \alpha_2 z^4 - \alpha_3 z^3 + \alpha_4 z^2 - \alpha_5 z + \alpha} \quad (3)$$

onde:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 8,393 \cdot 10^{-6} & \beta_2 &= 4,065 \cdot 10^{-6} & \beta_3 &= 2,645 \cdot 10^{-5} \\ \beta_4 &= 3,183 \cdot 10^{-5} & \beta_5 &= 9,870 \cdot 10^{-6} & \beta_6 &= 1,673 \cdot 10^{-7} \\ \alpha_1 &= 5,645 & \alpha_2 &= 13,297 & \alpha_3 &= 16,727 & \alpha_4 &= 11,850 \\ \alpha_5 &= 4,482 & \alpha_6 &= 0,707 \end{aligned}$$

A função de transferência  $G_d(s)$ , referente a planta de distúrbio discretizada, como mencionado anteriormente, é dada por:

$$G_d(z) = \frac{\beta_1 z^4 - \beta_2 z^3 + \beta_3 z^2 - \beta_4 z + \beta_5}{z^5 - \alpha_1 z^4 + \alpha_2 z^3 - \alpha_3 z^2 + \alpha_4 z - \alpha_5} \quad (4)$$

onde:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0,100 & \beta_2 &= 0,338 & \beta_3 &= 0,422 & \beta_4 &= 0,230 \\ \beta_5 &= 0,046 \\ \alpha_1 &= 4,645 & \alpha_2 &= 8,652 & \alpha_3 &= 8,075 & \alpha_4 &= 3,775 \\ \alpha_5 &= 0,707 \end{aligned}$$

### III. CONTROLE NEBULOSO

Devido sua capacidade de lidar com incertezas e imprecisões a Lógica Nebulosa tem se caracterizado como uma das tecnologias atuais bem sucedidas para o desenvolvimento de sistemas para controlar processos sofisticados, possibilitando a utilização de controladores simples para satisfação de requerimentos de projeto complexos, mesmo quando o modelo do sistema a ser controlado apresenta incertezas [6]-[12].

Neste trabalho utilizaram-se algoritmos genéticos para otimizar três controladores nebulosos, do tipo TSK, para atuar em um sistema eletromecânico, cujo principal objetivo é a redução da transmissibilidade de vibrações entre uma base sujeita a tais distúrbios e uma dada carga útil sensível aos seus efeitos.

A diferença entre os três controladores implementados é apenas no número de funções de saída. O Controlador 1 possui três funções de saída sendo duas de ordem zero e uma de primeira ordem, já o Controlador 2 possui quatro funções de saída, sendo duas de primeira ordem e duas de ordem zero, finalmente o Controlador 3 possui cinco funções de saída, sendo três de ordem zero e duas de primeira ordem, todos os três controladores possuem como entrada o erro e sua derivada.

O sistema de controle em malha fechada é ilustrado na figura abaixo.

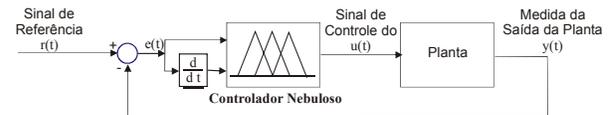


FIGURA II. SISTEMA DE CONTROLE EM MALHA FECHADA

#### A. Especificações de Desempenho

O sistema linear em malha aberta quando submetido a um sinal de referência do tipo degrau, com amplitude de 0,1m, apresenta uma resposta lenta, com um tempo

de acomodação, para uma faixa de  $\pm 5\%$  da referência, de 12,6 segundos. O tempo de subida de 0 a 100% é de 22,9 segundos [13], isso mostra a existência de dois modos de vibração, um mais lento e superamortecido e um mais rápido e oscilante. Esta resposta não pode ser considerada satisfatória para a grande maioria das aplicações práticas a que este tipo de sistema se propõe.

Com os controladores nebulosos otimizados objetiva-se obter resultados cada vez melhores com respeito tanto ao acompanhamento de referência quanto à rejeição de distúrbios, respeitando os limites de saturação do servo-atuador. As especificações de desempenho são:

- Um sinal de referência do tipo degrau deve ser acompanhado sem erro de regime;
- O tempo de subida deve ser reduzido a no máximo 10% do tempo obtido pelo sistema não controlado;
- O tempo de acomodação para ( $\pm 5\%$ ), por sua vez deve ser reduzido a no máximo 20% do tempo obtido para o sistema não controlado;
- Apesar das especificações acima resultarem em um aumento significativo da velocidade de resposta do sistema, o sobre-sinal que poderá surgir em decorrência desse aumento de velocidade deverá ser de no máximo 10%;
- O sinal de controle gerado pelo controlador nebuloso deve ser suave e não ultrapassar os limites de saturação do servo atuador que são de  $\pm 12,0v$ .

#### IV. ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos genéticos são métodos de busca baseados nos mecanismos de seleção e evolução natural, que têm o objetivo de encontrar o indivíduo ótimo de uma população geneticamente aperfeiçoada. O aperfeiçoamento dá-se com a renovação da população, obedecendo a critérios probabilísticos e/ou determinísticos de seleção e reprodução naturais. Eles fornecem estratégias eficientes de busca que podem ser usadas em problemas de otimização ou de classificação.

Os indivíduos utilizados são formados por: 47 genes, no caso do Controlador 1 e 49 genes no caso dos outros dois controladores: 2 e 3. Os dois primeiros genes representam os coeficientes  $t_1$  e  $t_2$  da função sugeno de primeira ordem dos controladores nebulosos,

$\left[ t_1 \cdot e \quad t_2 \cdot \frac{de}{dt} \quad 0 \right]$ , os 20 genes subseqüentes são uma representação das funções de pertinência por seus pontos notáveis.

As funções de pertinência utilizadas são funções triangulares, e os triângulos são considerados isósceles, então armazena-se as informações das abscissas dos vértices da base e as abscissas  $c$  são obtidas através da metade da diferença entre os termos  $a$  e  $b$ , onde a subtração tem como primeira parcela o termo de maior módulo [14]. A Figura III mostra os parâmetros das funções de pertinência, da entrada erro, a serem otimizados. Os mesmos parâmetros foram utilizados para otimização das funções de pertinência da entrada derivada do erro.

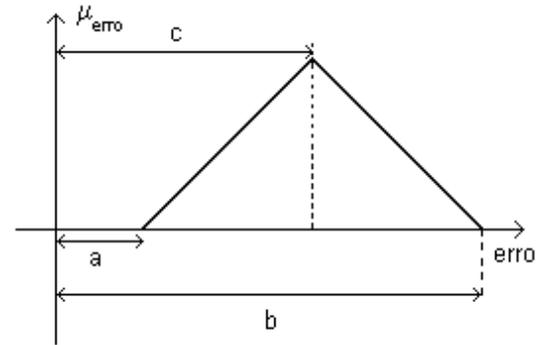


FIGURA III. PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Os 25 genes seguintes formam a base de regras. Para os controladores com quatro e cinco funções de saída ainda existem mais dois genes que representam os coeficientes  $t_3$  e  $t_4$  da segunda função linear de saída,

$$\left[ t_3 \cdot e \quad t_4 \cdot \frac{de}{dt} \quad 0 \right] \text{ destes controladores.}$$

A primeira população foi gerada de maneira aleatória. A função de avaliação utilizada é dada pela soma ponderada entre o quadrado do erro e o quadrado da variação do erro. Foi dado um menor peso (0,16/1) para o quadrado da variação do erro na função de avaliação, pois foi observado que quanto maior sua influência nesta função maior é o tempo de acomodação do sistema [14], como era de se esperar.

Foi utilizado o processo de seleção híbrida, onde o melhor indivíduo é selecionado por elitismo e os demais de forma estocástica através do método da roleta.

Para reprodução foram utilizados três operadores genéticos: o de recombinação, o de clonagem e o de mutação. O operador de recombinação dá origem a dois indivíduos-filho. Neste trabalho os dois são aproveitados para formar a nova população. Todos os indivíduos-filho são gerados a partir de recombinação e todos têm uma chance de sofrer mutação de 5% para cada gene, com exceção do melhor indivíduo que não sofre mutação e é clonado a cada geração, garante-se

assim que a melhor solução do problema encontrada em uma geração não será perdida, podendo ser melhorada ou mantida ao longo das gerações.

Foram utilizados três critérios de parada: atingir o número máximo de gerações previamente estabelecido; o melhor indivíduo se repetir durante 25% do número máximo de gerações e a média da população permanecer constante por 10% do número máximo de gerações.

Para as funções de pertinência foram utilizados como espaço de busca: o intervalo  $[-1; 1]$  para função erro e o intervalo  $[-20; 20]$  para função derivada do erro. Os espaços de busca para os demais parâmetros dos controladores são mostrados na seção seguinte.

## V. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para avaliação de cada indivíduo utilizou-se 2000 iterações, considerando o tempo de amostragem de 0,01 segundos, corresponde à resposta do sistema de 0 a 20 segundos.

Na obtenção desses resultados os algoritmos genéticos pararam por repetição do melhor indivíduo.

As figuras IV e V trazem, respectivamente, os gráficos da saída do sistema e do sinal de controle, para o caso do sistema com o Controlador 1. Os parâmetros do algoritmo genético para este caso foram: população de 20 indivíduos, valor máximo do coeficiente do erro da função linear de saída,  $t_1$ , igual a 33, valor máximo do coeficiente da variação do erro da função linear de saída,  $t_2$ , igual a 12, o máximo de 100 gerações, referência do tipo degrau com amplitude de 0,1m e distúrbio do tipo degrau com amplitude de 0,01m.

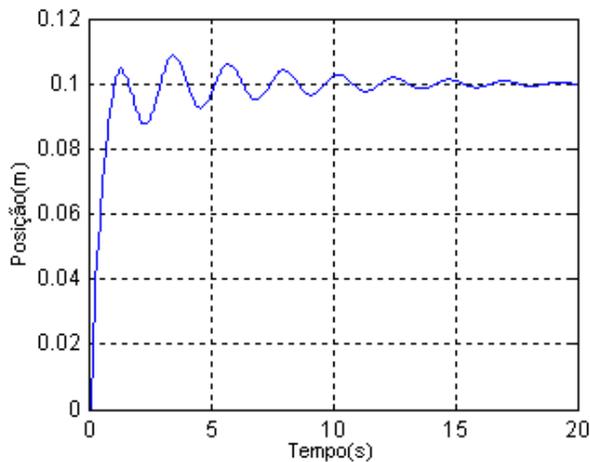


FIGURA IV. SAÍDA DO SISTEMA COM O CONTROLADOR 1

Após 83 gerações o sistema com o Controlador 1 apresentou uma boa resposta, satisfaz as especificações de desempenho: foi eficiente na rejeição de distúrbio e

acompanhamento de referência, não apresentou erro de regime e seu tempo de subida foi de 1,06s.

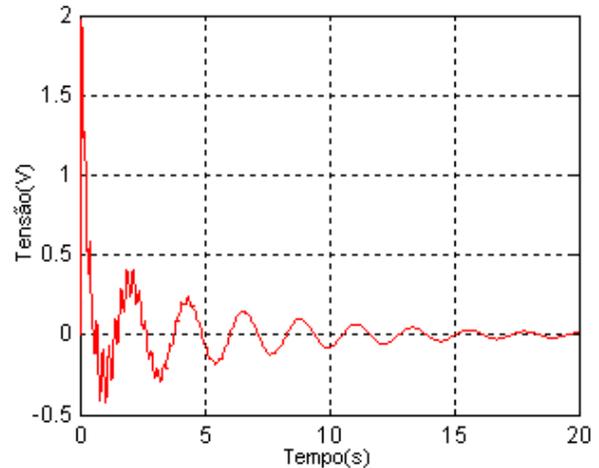


FIGURA V. SINAL DE CONTROLE DO CONTROLADOR 1

Realizaram-se também testes com o Controlador 2, utilizando a mesma configuração do Controlador 1, só que com mais uma função linear de saída com limites máximos para o coeficiente do erro e de sua derivada iguais a 0,4 e 46, respectivamente. Os resultados que podem ser vistos nas figuras VI e VII foram encontrados após 76 gerações.

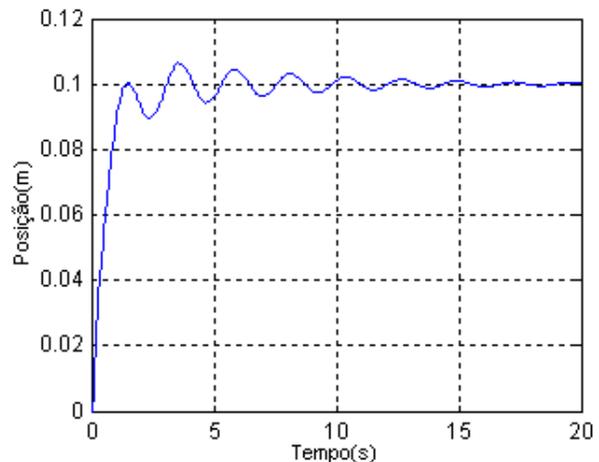


FIGURA VI. SAÍDA DO SISTEMA COM O CONTROLADOR 2

O sistema com o Controlador 2 também atendeu às especificações de desempenho, apresentou ainda um tempo de subida de 1,46s. Através da comparação do desempenho dos dois controladores testados até agora, pode-se observar que o Controlador 2 foi pior que o Controlador 1, pois foi mais lento. Ele apresentou um sinal de controle um pouco mais suave, como pode ser

percebido através da comparação entre as figuras V e VII.

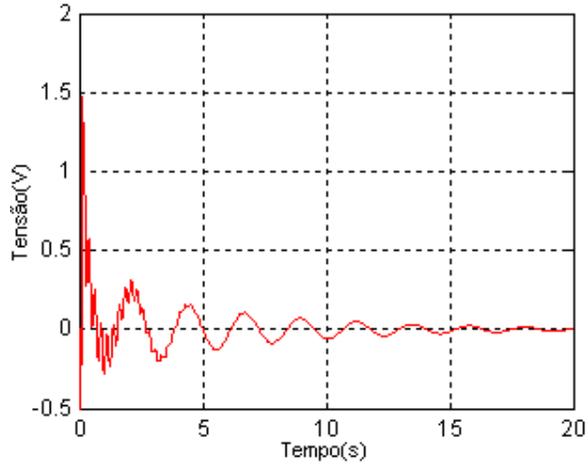


FIGURA VII. SINAL DE CONTROLE DO CONTROLADOR 2

O Controlador 3 teve a mesma configuração do anterior, com mais uma função de saída que foi a função cujo sinal de controle é nulo. As figuras VIII e IX mostram o desempenho deste controlador.

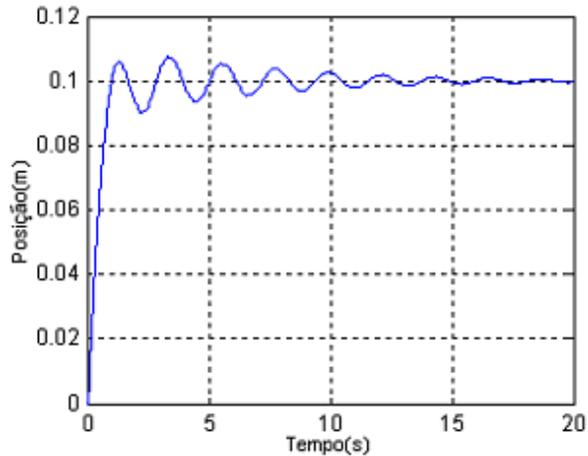


FIGURA VII. SAÍDA DO SISTEMA COM O CONTROLADOR 3

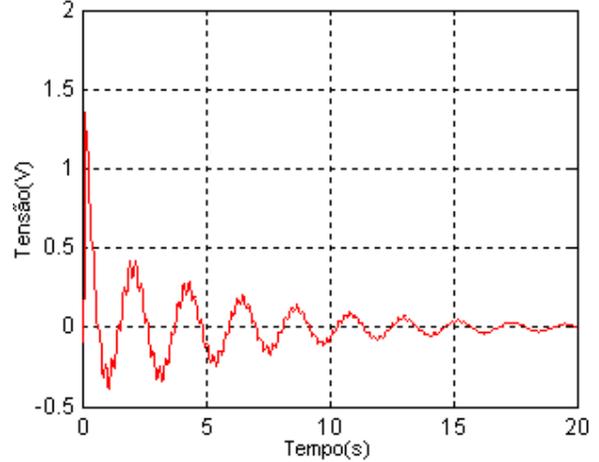


FIGURA IX. SINAL DE CONTROLE DO CONTROLADOR 3

Assim como os outros dois sistemas apresentados este atendeu às especificações de desempenho, seu tempo de subida foi de 1,01s. O desempenho deste sistema pode ser considerado superior ao dos outros dois, pois foi mais rápido que eles.

O sinal de controle do Controlador 3 foi ainda mais suave que o do Controlador 2.

Para obtenção destes resultados do sistema com o Controlador 3 foram necessárias 93 gerações.

As figuras X e XI mostram as funções de pertinência de entrada do Controlador 3 para este resultado obtido.

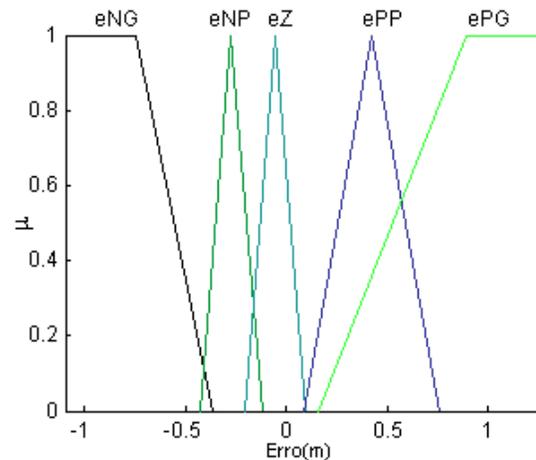


FIGURA X. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DO ERRO

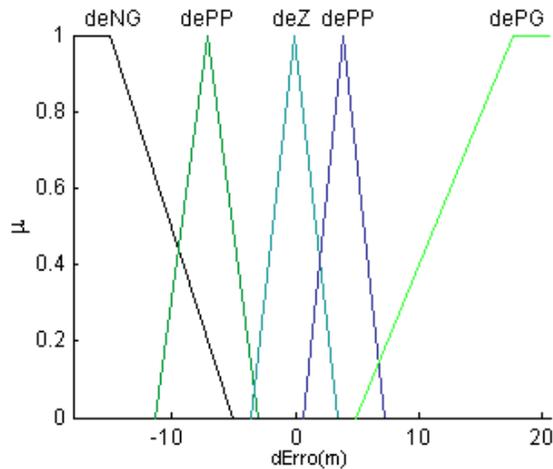


FIGURA XI. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DA DERIVADA DO ERRO

## VI. CONCLUSÕES

Um modelo linear do sistema eletromecânico para isolamento de vibrações mecânicas de base em baixas frequências, apresentado em [5], foi utilizado como planta para projeto otimizado de três controladores nebulosos, que diferem entre si apenas pelo número de funções de saída.

Algoritmos genéticos foram utilizados na otimização dos controladores. A implementação dos algoritmos genéticos para cada controlador difere apenas pelo tamanho do indivíduo, que varia de acordo com o número de parâmetros a serem otimizados em cada controlador.

O controlador com cinco funções de saída apresentou desempenho melhor que os outros, mas todos apresentaram bons resultados com a presença apenas de uma pequena oscilação indesejada. Os três controladores apresentaram seus resultados com sinais de controle bem abaixo dos níveis de saturação do servo atuador.

Testes foram realizados no intuito de minimizar ao máximo o erro de rastreamento.

Para se chegar a um número ideal de indivíduos foram realizados vários testes e então buscou-se um meio termo entre o tempo de execução do algoritmo e a resposta do sistema.

Com este trabalho apresentou-se um procedimento automático para obtenção de parâmetros ótimos para controladores nebulosos, parâmetros estes que são difíceis de serem ajustados de forma manual. Reduziu-se assim o esforço e o tempo de busca destes parâmetros.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S.A. Sandri, “Lógica Nebulosa”, *V Escola de Redes Neurais*, São José dos Campos, São Paulo, 1999, pp. c073-c090.
- [2] L.A. Zadeh, “Fuzzy Sets”, *Fuzzy Sets, Information and Control*, 1965, 8, pp. 338-353.
- [3] L.C. Jain, e R.K. Jain, “Advances in Fuzzy Systems Applications and Theory”, *Hybrid Intelligent Engineering System*, World Scientific, 1997, Vol.11.
- [4] F.M.U. de Araújo, T. Yoneyama, e C.L. Nascimento Jr., “Um Controlador Nebuloso TSK Aplicado em um Sistema para Isolamento de Vibrações”, *Proc. of the V SBAl*, Canela, Brasil, 2001.
- [5] F.M.U. de Araújo, e T. Yoneyama, “Modelling, Analyzing and Controlling of a Nonlinear Electro-Mechanical System to Intelligent Control of Vibration”, *Proc. of the CONEM 2002*, João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2002.
- [6] J.L. Castro, “Fuzzy Logic Controllers are Universal Approximators”, *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, IEEE, 1995, 25(4) pp. 629-635.
- [7] Chiu, S., e S. Chand, *Adaptive Traffic Signal Control Using Fuzzy Logic*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Nova Iorque, 1994.
- [8] Driankov, D., H. Hellendoorn, e M. Reinfrank, *An Introduction to Fuzzy Control*, Springer-Verlag, 1993.
- [9] S. Dutta, “Fuzzy Logic Applications: Technological and Strategic Issues”, *IEEE Trans. on Engineering Management*, IEEE, 1993, 40(3) pp. 237-254.
- [10] R. Guerra, S.A. Sandri, e M.L.O.S., “Controle de Altitude Autônomo de Satélites Usando Lógica Nebulosa”, *Anais do IV SBAl*, 1997, pp. 337-342.
- [11] C.L. Karr, e E.J. Gentry, “Fuzzy Control of Ph Using Genetic Algorithms”, *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, IEEE, 1993, 1(1) pp. 46-53.
- [12] C.C. Lee, “Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller (part I)”, *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics*, IEEE, 1990, 20(2) pp. 404-418.
- [13] F.M.U. de Araújo, e T. Yoneyama, “Modelamento e Controle de um Dispositivo Eletromecânico para Controle Ativo de Vibrações”, *Anais do II SNCA*, Salvador, Bahia, 2001.
- [14] C.A.G. Fonseca, F.M.U. de Araújo, A.V. Medeiros, e A.L. Maitelli, “Algoritmos Genéticos para Otimização de um Controlador Nebuloso para Supressão de Vibrações”, *Anais do VI SBAl*, Bauru, São Paulo, 2003, pp. 959-963.