

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS INTELIGENTES USANDO CONTROLADORES NEBULOSOS ADAPTATIVOS

GUSTAVO LUIZ C. M. DE ABREU, JOSÉ F. RIBEIRO

*Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia*

Av. João Naves de Ávila, 2160, Uberlândia, MG, 38400-902

E-mails: gmanhaes@mecanica.ufu.br, jrubeiro@mecanica.ufu.br

Resumo— Neste trabalho propõe-se uma metodologia de projeto de controladores nebulosos adaptativos aplicados à atenuação de vibrações em estruturas inteligentes utilizando atuadores piezoelétricos incorporados. O controlador nebuloso do tipo Takagi-Sugeno é construído a partir de um conjunto de regras nebulosas do tipo SE-ENTÃO cujos parâmetros são ajustados em tempo real segundo uma lei de adaptação derivada da teoria de estabilidade de Lyapunov. Esta metodologia de controle é experimentalmente verificada em uma viga de aço engastada-livre e um conjunto de testes é realizado para avaliar a eficiência do controlador nebuloso adaptativo proposto.

Abstract— This paper presents a design methodology of adaptive fuzzy controllers applied to the attenuation of vibrations in smart structures containing incorporated piezoelectric actuator patches. The Takagi-Sugeno-type adaptive fuzzy controller is constructed from a set of fuzzy IF-THEN rules whose parameters are adjusted on-line according to some adaptation law. The adaptive law is derived based on the Lyapunov's stability theory. This control methodology is experimentally verified in a steel cantilever test beam and a set of experimental tests are made in the system to verify the efficiency of the adaptive fuzzy controller proposed.

Keywords— Adaptive Fuzzy Controllers, Lyapunov's Stability Theory, Smart Structures and Piezoelectric Actuators.

1 Introdução

A atenuação das vibrações mecânicas é um dos assuntos mais importantes na área de engenharia mecânica, pois a redução dos níveis de vibrações à patamares aceitáveis possibilita a diminuição do risco de fadiga dos materiais e evita a propagação destas vibrações para meios adjacentes, o que pode causar desde ligeiro desconforto até graves danos estruturais.

Recentemente, uma nova alternativa no controle de vibrações em estruturas flexíveis tem sido alvo de investigação de vários estudiosos da área (Taylor et al., 1985). Segundo essa alternativa, uma estrutura pode ter a sua resposta minimizada, utilizando de forma integrada elementos ativos, como sensores e atuadores constituídos de materiais piezoelétricos (estruturas inteligentes).

As cerâmicas piezoelétricas desenvolvem um campo elétrico, quando sujeitas a uma força (ou pressão) e apresentam uma deformação mecânica, quando sujeitas a um campo elétrico. Este é o fenômeno da piezoelectricidade que tem grande aplicabilidade em diversas áreas da ciência e principalmente na área de controle de estruturas flexíveis. Um dos primeiros relatos sobre o uso de materiais piezoelétricos como atuadores no controle de estruturas, foi apresentado por Crawley e de Luis (1987), que construíram três protótipos de estruturas com cerâmicas piezoelétricas incorporadas, quais sejam: uma viga de alumínio com atuadores piezoelétricos colados sobre suas superfícies, uma viga de grafita/epoxy e outra com fibra de vidro/epoxy, ambas com material piezoelétrico imerso nas estruturas e empregaram um controlador por realimentação proporcional à velocidade. Chou et al.

(1997) aplicaram o controle robusto para o controle ativo de vibrações em uma viga composta por sensores e atuadores piezoelétricos. Wang et al. (1999) propuseram uma nova metodologia de otimização da massa de estruturas com atuadores e sensores piezoelétricos e do sistema de controle simultaneamente.

Uma das dificuldades no projeto dos controladores clássicos decorre da necessidade do conhecimento prévio do modelo matemático da planta a ser controlada. Em alguns casos esta informação é muito complexa ou de difícil obtenção. Apesar disto, informações verbais ou lingüísticas de sentido intuitivo como "deslocamento muito grande", "velocidade bastante lenta" ou "variação do erro mais ou menos rápida", provenientes da experiência do operador sobre o processo, bem como sobre os critérios de desempenho desejados, são quase sempre conhecidas. Estas informações, embora não sejam muito precisas, fornecem aspectos importantes sobre o comportamento do sistema.

Nos últimos anos, este tipo de informação tem sido aplicada com sucesso no controle de sistemas. São os controladores nebulosos, projetados a partir da teoria dos conjuntos nebulosos. Tais controladores têm apresentado na prática, resultados excelentes, que encorajam as pesquisas, a despeito das críticas contumazes dos adeptos dos controladores clássicos Mendel (1995).

O controle de sistemas flexíveis utilizando a Lógica Nebulosa é uma área da engenharia que vem sendo intensamente utilizada na última década. Zeinoun e Khorrami (1994) utilizaram um algoritmo de controle, baseado em Lógica Nebulosa, para o amortecimento das vibrações de uma viga engastada-livre através de sensores e atuadores piezoelétricos.

Ofri et al. (1996) controlaram, através da Lógica Nebulosa uma grande estrutura flexível por meio de atuadores piezocerâmicos e compararam sua eficiência com outros tipos de controladores como o LQR.

Atualmente, não há registros na literatura de trabalhos que utilizam controladores nebulosos adaptativos empregando atuadores constituídos por materiais piezelétricos no amortecimento de vibrações. Neste contexto, o conceito de sistemas adaptativos ou sistemas inteligentes (Wang, 1992), devem ser entendidos como sistemas que percebem alterações ambientais e/ou de funcionamento e que se adaptam, auto ajustando-se a novas condições de trabalho. A proposta deste trabalho é, num primeiro momento, construir um controlador nebuloso adaptativo do tipo Takagi-Sugeno de primeira ordem descrito por um conjunto de regras nebulosas SE-ENTÃO e cujos parâmetros são ajustados em tempo real a partir de uma lei de adaptação obtida segundo a teoria de estabilidade de Lyapunov e por fim investigar as potencialidades do controlador nebuloso adaptativo implementado experimentalmente e aplicado em uma estrutura flexível do tipo viga engastada-livre contendo atuadores piezoelétricos incorporados. Será um objetivo de análise, o mecanismo de adaptação dos parâmetros do Takagi-Sugeno, observando, particularmente as características de estabilidade do sistema em regime transiente.

2 Descrição do Controlador Nebuloso Utilizado

A utilização dos sistemas nebulosos no controle moderno foi introduzido a partir do trabalho de Lotfi Zadeh, 1965 e o grande apelo da tecnologia nebulosa em controle é a possibilidade de se operar com "meias verdades ou meias mentiras", ou seja, pode-se admitir uma incerteza na definição das variáveis de entrada e de saída.

Basicamente, um sistema nebuloso é composto por cinco blocos funcionais, conforme ilustrado na Figura 1.

- uma base de regras contendo um número de regras do tipo SE-ENTÃO;
- um conjunto de rótulos (funções de pertinência) ou conjuntos nebulosos usados nas regras nebulosas;
- um mecanismo de inferência (tomador de decisões) que realiza as operações de inferência nas regras;
- uma interface de nebulização que transforma os valores reais das variáveis de entrada em graus de pertinência a um determinado conjunto (nebulizador) e
- uma interface de desnebulização que transforma os resultados da inferência em uma saída numérica (desnebulizador).

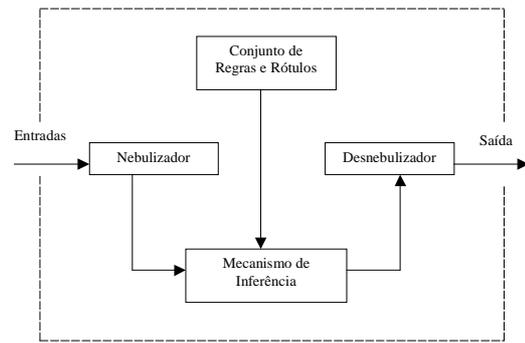


Figura 1 – Sistema de inferência nebulosa.

O problema de controle usando a lógica nebulosa envolve a superação de algumas etapas bem definidas:

- Definição das variáveis de entrada e saída. As variáveis de entrada/saída de um controlador nebuloso podem ser divididas em variáveis do sistema e variáveis linguísticas. A maioria dos controladores nebulosos empregam as variáveis do sistema: erro e variação do erro como entrada e força, voltagem ou outra variável da lei de controle como saída.
- Definição de um conjunto de funções de pertinência, que mapeam as variáveis de entrada e saída no universo $[0,1]$. Estas funções recebem nomes (rótulos) que procuram traduzir verbalmente algum significado para o fenômeno físico modelado.
- Definição de um conjunto de regras, usando operadores lógicos, que buscam estabelecer uma relação entre valores da entrada e da saída. A base regras do controlador nebuloso é importante para o bom funcionamento do sistema de controle. A base de regras ou base de conhecimento, contendo vários se-então é construída como segue:

$$R_i: \text{ Se } x_1 \text{ é } A_{i1} \text{ e } x_2 \text{ é } A_{i2} \dots \text{ e } x_n \text{ é } A_{in} \text{ então } y_i \text{ é } B_i \quad (1)$$
 onde R_i é a i -ésima regra, A_{ik} é um conjunto nebuloso, x_k é uma variável de entrada, y_i é a saída da i -ésima regra e B_i é o conjunto nebuloso da saída representado, neste trabalho, por uma combinação algébrica das variáveis de entrada mais um termo constante (Takagi e Sugeno, 1985) descrita da seguinte forma:

$$B_i = c_o^i + c_1^i x_1 + \dots + c_n^i x_n \quad (2)$$
 onde c_k^i são os parâmetros do consequente no modelo nebuloso Takagi-Sugeno.
- Mecanismo de inferência nebulosa. O mecanismo de inferência nebulosa que baseia-se no produto composicional Max-Prod (Zadeh, 1965) foi empregado neste trabalho.
- Uma vez definidas as regras, derivadas a partir de uma linguagem simbólica e com significado bem intuitivo para o projetista, passa-se à fase da tradução matemática da linguagem simbólica construída. Isto é conduzido através da utilização

de operadores lógicos definidos pela teoria dos conjuntos nebulosos. Esta tarefa se divide na verdade em três subetapas: A primeira transforma os valores reais das variáveis de entrada em graus de pertinência a um determinado conjunto (fase de "nebulização"), a segunda opera com as regras, os rótulos e o resultado fase de "desnebulização" e gera um conjunto de variáveis nebuloso através do mecanismo de inferência a terceira e última subetapa transforma os resultados da inferência em uma saída numérica ("fase de desnebulização"). Neste trabalho, a média ponderada da saída de cada regra foi empregado no cálculo da saída final do controle na seguinte forma:

$$u_f = \frac{\sum_{i=1}^M \left(\prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right) (c_o^i + c_1^i x_1 + \dots + c_n^i x_n)}{\sum_{i=1}^M \left(\prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)} \quad (3)$$

onde M é o número de regras nebulosas, $\mu_{A_j^i}(x_j)$ representam as funções para $j = 1, 2, \dots, n$ e $i = 1, 2, \dots, M$.

A equação 3 pode ser reescrita na seguinte forma:

$$u_f(x|\Theta) = \Theta^T \Xi(x) \quad (4)$$

onde $\Theta = (c_o^1, \dots, c_n^1, c_o^2, \dots, c_n^2, \dots, c_o^M, \dots, c_n^M)$ é o vetor de parâmetros ajustáveis do modelo Takagi-Sugeno e

$$\Xi(x) = (\xi_o^1(x), \dots, \xi_n^1(x), \xi_o^2(x), \dots, \xi_n^2(x), \dots, \xi_o^M(x), \dots, \xi_n^M(x)) \lim_{t \rightarrow \infty} (e(t)) = 0 \quad (9)$$

é um vetor definido por:

$$\xi^i(x) = \frac{\left(\prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right) [1, \dots, x_n^i]}{\sum_{i=1}^M \left(\prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)} \quad (5)$$

para $i = 1, 2, \dots, M$.

Após esta breve revisão dos principais conceitos da lógica nebulosa apresenta-se a seguir a construção de um controlador nebuloso adaptativo obtido a partir da teoria de estabilidade de Lyapunov.

3 Obtenção da Lei de Adaptação do Controlador Nebuloso

Nesta seção serão apresentados brevemente os conceitos fundamentais da teoria de Lyapunov aplicados para a obtenção da lei de adaptação dos

parâmetros do modelo Takagi-Sugeno explicitados no vetor Θ .

Considere-se um sistema de n -ésima ordem ou um processo a controlar ser caracterizado pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} x^{(n)} &= f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + bu \\ y &= x \end{aligned} \quad (6)$$

onde f é um vetor de dimensão n cujos componentes são funções não-lineares, b é uma constante positiva desconhecida e u e y são as entradas e saídas do sistema, respectivamente.

Deseja-se que o sistema de controle siga de muito perto algum modelo de referência. O problema de projeto em questão é sintetizar um controlador u que sempre gere um sinal que force o estado do processo y a controlar em direção a um estado desejável y_m . Desta forma o erro entre a referência (estado desejável) e o estado do sistema é definido por:

$$e = y_m - y \quad (7)$$

O objetivo principal de projeto do controlador adaptativo é que os autovalores da dinâmica do erro assumam parte real negativa, de modo que esta dinâmica possua um estado de equilíbrio assintoticamente estável:

$$e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e = 0 \quad (8)$$

Desde que as raízes da equação característica 8 estejam no semiplano esquerdo, pela uma escolha adequada dos coeficientes k_1, k_2, \dots, k_n , significa que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (e(t)) = 0 \quad (9)$$

No presente problema deseja-se reduzir o vetor erro a zero por meio de um vetor de controle u adequado. Desta forma, isolando-se o termo u da eq. 6 e usando (7) e (8), tem-se:

$$u^* = \frac{1}{b} \left(-f(x) + y_m + \underline{k}^T \underline{e} \right) \quad (10)$$

onde:

$$\underline{e} = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T, \underline{k} = (k_n, \dots, k_1)^T, \underline{x} = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T \text{ e } u^* \text{ não é explícito, pois } f(x) \text{ e } b \text{ não são conhecidos.}$$

Supondo que o controle u seja dado pela eq. 4, ou seja, $u = u_f(x|\Theta)$ e substituindo em 6, chega-se:

$$x^{(n)} = f(x) + bu_f(x|\Theta) \quad (11)$$

Somando bu^* em ambos os lados da eq. 11 e após algumas manipulações algébricas, tem-se que:

$$\dot{e} = \Lambda_c e + b_c (u^* - u_f(x|\Theta)) \quad (12)$$

onde

$$\Lambda_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & -k_{n-1} \end{bmatrix}, b_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b \end{bmatrix} \quad (13)$$

Um ponto de partida conveniente na síntese do vetor de controle u é a construção de uma função de Lyapunov para o sistema dado pela eq. 12. Admita-se que a forma da função de Lyapunov seja:

$$V_e = \frac{1}{2} e^T P e \quad (14)$$

onde P é uma matriz hermitiana ou simétrica real definida positiva.

Uma condição necessária e suficiente para que o estado de equilíbrio seja assintoticamente estável é que, dada uma matriz Q definida positiva hermitiana qualquer, exista uma matriz P hermitiana definida positiva tal que:

$$\Lambda_c^T P + P \Lambda_c = -Q \quad (15)$$

Tomando-se a derivada de V_e em relação ao tempo, tem-se:

$$\dot{V}_e = \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} \quad (16)$$

Substituindo a eq. 12 em 16, chega-se:

$$\dot{V}_e = -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b_c (u^* - u_f(x|\Theta)) \quad (17)$$

Desta forma, uma lei de adaptação será desenvolvida para ajustar os parâmetros do vetor Θ . Para isto, define-se o vetor de parâmetros ótimos como:

$$\Theta^* \stackrel{\Delta}{=} \arg \min_{\Theta} (\sup |\varepsilon|) \quad (18)$$

onde ε é definido por $\varepsilon = u_f(x|\Theta^*) - u^*$, ou seja, o erro que se comete no sinal do controle. Desta forma, a equação 12 pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \Lambda_c e + b_c (u_f(x|\Theta^*) - u_f(x|\Theta)) - b_c \varepsilon \\ &= \Lambda_c e + b_c \Phi^T \Xi(x) - b_c \varepsilon \end{aligned} \quad (19)$$

onde $\Phi = \Theta^* - \Theta$ e $\Xi(x)$ é dado por 5. Neste momento, define-se uma nova função de Lyapunov na forma:

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{b}{2\gamma} \Phi^T \Phi$$

onde γ é uma constante positiva. Usando-se as equações 19 e 15, tem-se:

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b_c (\Phi^T \Xi(x) - \varepsilon) + \frac{b}{\gamma} \Phi^T \dot{\Phi} \quad (20)$$

Seja p_n a última coluna de P , então a partir da eq. 13 temos que:

$$e^T P b_c = e^T p_n b \quad (21)$$

Substituindo a eq. 21 em 20, obtém-se:

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T Q e + \frac{b}{\gamma} \Phi^T (\gamma e^T p_n \Xi(x) + \dot{\Phi}) - e^T P b_c \varepsilon \quad (22)$$

Desta forma, escolhe-se uma lei de adaptação na forma:

$$\dot{\Phi} = \gamma e^T p_n \Xi(x) \quad (23)$$

Para $\dot{\Phi} = -\dot{\Phi}$, a eq. 22 é reescrita como:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e - e^T P b_c \varepsilon \quad (24)$$

que é definida negativa.

4 Implementação do Controlador Nebuloso Adaptativo

Em breves palavras, o controlador nebuloso adaptativo é obtido obedecendo-se os seguintes passos:

1. *Fase Inicial:*
 - a. Para garantir a estabilidade do sistema, estabeleça os parâmetros k and Q (matriz definida positiva) e resolva a equação 15 de modo a obter $P > 0$;
 - b. Especifique o conjunto de regras nebulosas;
 - c. Inicialize o vetor de parâmetros do modelo Takagi-Sugeno Θ_0^T .
2. *Lei de Adaptação:*
 - a. Ajuste o vetor de parâmetros Θ^T utilizando a lei de adaptação descrita por 23 na seguinte forma:

$$\Theta_{t+1}^T = \Theta_t^T + \gamma e^T p_n \Xi(x) dt \quad (25)$$

onde t é tempo atual e dt é o tempo de amostragem.

Usando-se a eq. 3 calcule um novo sinal de controle usando o vetor de parâmetros atualizados Θ_{t+1}^T , calculados a partir da lei de recorrência dada por 25.

5 Formulação do Problema de Controle

O problema que se pretende resolver neste trabalho é controlar as vibrações presentes em um sistema vibratório constituído por uma estrutura flexível tipo viga utilizando-se das metodologias dos sistemas nebulosos implementadas em um microcomputador.

A bancada experimental é constituída de uma estrutura do tipo viga de material aço inox com duas

placas de material piezolétrico coladas nas duas faces opostas da estrutura (proporciona o movimento de flexão da estrutura), como pode ser vista na Figura 2. A estrutura flexível possui 400 [mm] de comprimento e 34.5 x 1.2 [mm] de seção transversal e a condição de contorno pretendida é engastada-livre. As placas de material piezolétrico estão posicionadas a uma distância de 92.93 [mm] do engastamento.

O elemento piezolétrico, fornecido pelo fabricante da empresa ACX (Active Control eXperts), é constituído por duas placas de material piezolétrico comandados por uma mesma tensão elétrica de sinais contrários, de modo que sua deformação é transmitida à viga de aço. Estes elementos, por sua vez, são alimentados por um amplificador de potência da ACX, que amplifica a tensão de entrada com um ganho na ordem de 30 V/V.

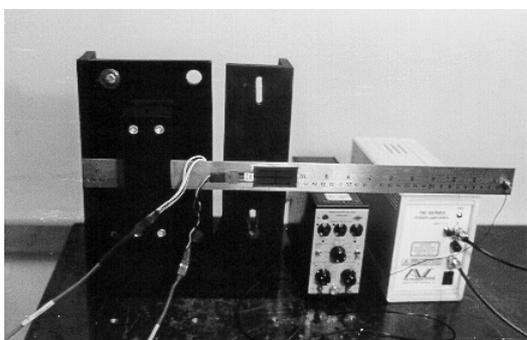


Figura 2. Bancada Experimental.

Segundo o diagrama mostrado na Figura 3, o sinal do acelerômetro é carreado para a entrada A/D do microcomputador que faz o interfaceamento entre o acelerômetro e o amplificador de voltagem em um tempo de amostragem de 3 ms. O amplificador alimenta duas placas de elementos piezolétricos de modo a proporcionar o movimento de flexão na estrutura.

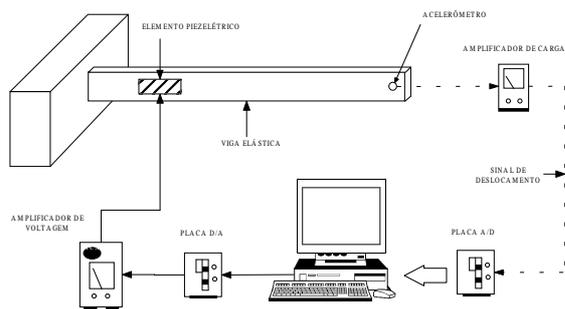


Figura 3 – Diagrama esquemático do experimento de controle utilizado.

6 Implementação do Algoritmo de Controle

Deseja-se que o sistema de controle siga a referência $y_{ref} = 0$ e as etapas que foram seguidas para a definição dos parâmetros iniciais do controlador nebuloso adaptativo são descritas a seguir.

1. Fase Inicial:

- (a) Define-se $k = [3 \ 2]$ e $Q = \text{diag}(5,5)$. Com estes dados, resolve-se a eq. 15 e obtém-se:

$$P = \begin{bmatrix} 5 & 2.5 \\ 2.5 & 2.5 \end{bmatrix}.$$

- (b) O controlador nebuloso apresenta duas entradas: erro and variação do erro e uma saída: sinal de voltagem aplicado no amplificador de voltagem. Definiu-se um controlador nebuloso que apresentou 3 funções de pertinência igualmente espaçadas (Negativo – N, Zero – Z and Positivo – P) de modo a representarem a cada um dos valores lingüísticos das variáveis de entrada. O universo de discurso das variáveis de entrada foram definidas como: erro (e): -4 to 4 [mm] e mudança do erro (Δe): -150 to 150 [mm/s].

Desta maneira, a base de regras foi constituída por um total de 9 regras e conseqüentemente 27 parâmetros a serem adaptados no modelo Takagi-Sugeno (veja Tabela 1).

Tabela 1 – Base de regras.

		Mudança do erro		
		N	Z	P
Erro	N	1F_1	2F_2	3F_3
	Z	4F_4	5F_5	6F_6
	P	7F_7	8F_8	9F_9

onde cada uma das funções F de saída de cada regra é descrita pela seguinte lei de formação:

$$\begin{cases} F_1 = c_o^1 + c_1^1 e + c_2^1 \Delta e \\ \vdots \\ F_9 = c_o^9 + c_1^9 e + c_2^9 \Delta e \end{cases} \quad (26)$$

Cada uma das células da Tab. 1 representa uma regra da seguinte forma:

R_1 : **Se** o erro é N e a mudança do erro é N **então** A voltagem de saída é F_1

- (c) Seja $\Theta_0^T = [0 \ 0 \ \dots \ 0]^T$, ou seja, os valores iniciais de todas as constantes ($c_o^1, \dots, c_n^1, c_o^2, \dots, c_n^2, \dots, c_o^9, \dots, c_n^9$) foram admitidas nulas e tome $\gamma = 0,0001$.

A lei de adaptação ou lei de recorrência é dada por 25.

7 Resultados e Discussões

Em ensaio experimental, o sistema sem controle, foi excitado pelos atuadores piezolétricos na sua primeira frequência natural num tempo de 0.5s através de um sinal senoidal gerado pelo microcomputador. Os deslocamentos da viga, gerados por esta excitação, podem ser vistos na Figura 4. Como pode ser visto na Figura 4, o sistema leva aproximadamente 20 segundos para atingir patamares de deslocamento significativamente reduzidos.

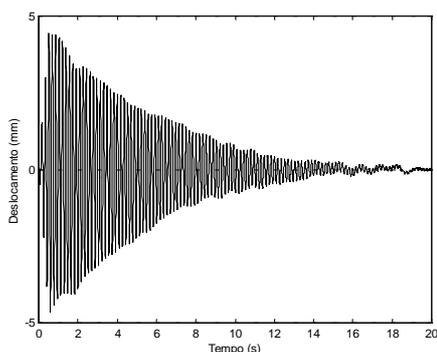


Figura 4 – Deslocamento da extremidade livre da viga para o sistema sem controle.

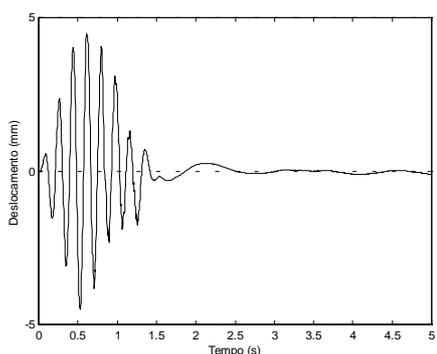


Figura 5 – Deslocamento da extremidade livre da viga para o sistema controlado.

Com relação aos resultados apresentados, pode-se observar que o comportamento do sistema controlado utilizando o controlador nebuloso adaptativo é eficiente no que diz respeito à rapidez de amortecimento das oscilações, apresentando um comportamento bastante estável em regime transiente. A Figura 6 mostra a evolução temporal dos parâmetros do modelo Takagi-Sugeno.

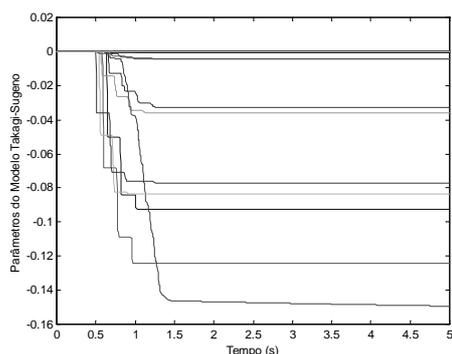


Figura 6 – Evolução temporal dos parâmetros do modelo Takagi-Sugeno.

8 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia de controle nebuloso adaptativo implementado num microcomputador e aplicado em uma viga elástica com material piezolétrico incorporado. Experimentos foram conduzidos com o objetivo de validar a metodologia de controle desenvolvida e de avaliar a

ação do controlador nebuloso proposto. O controlador mostrou-se eficiente para o problema em questão. Demonstrou, no domínio do tempo, características de desempenho bastante satisfatórias. O elemento piezolétrico, utilizado como atuador neste trabalho, teve sua eficiência constatada a partir dos resultados experimentais realizados na bancada de testes. Uma etapa natural e evidente deste trabalho é a utilização do material piezolétrico como sensor ao invés do emprego do acelerômetro.

Referências Bibliográficas

- ACX, Active Control eXperts, Inc. All rights reserved, <http://www.acx.com>.
- Chou, Jyh-Horng; Chen, Shinn-Horng; Chang, Min-Yung e Pan, An-Jia (1997). Active Robust Vibration Control of Flexible Composite Beams with Parameter Perturbations, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 39, No. 7, pp. 751-760.
- Crawley, E. F., e de Luis, J. (1987). Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures, *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 10, pp. 1373-1385.
- Lee, M. (1990). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part I and II, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 20, No. 2, pp. 404-435.
- Mendel, J. M. (1995). Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, No. 3, pp. 345-377.
- Ofri, A.; Tanchum, W. e Guterman, H. (1996). Active Control for Large Space Structure by Fuzzy Logic Controllers, *IEEE*, pp. 515-518.
- Takagi, T. e Sugeno, M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 15, No. 1, pp. 116-132.
- Zadeh, L. A. (1965). Information and Contro, Vol. 8, pp. 338-353.
- Zeinoun, I. J. e Khorrami, F. (1994). An Adaptive Control Scheme Based on Fuzzy Logic and its Application to Smart Structures, *Smart Mater. Struc.*, Vol. 3, pp. 266-276.
- Wang, Li-Xin (1992). Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems, *Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control*, Tucson, Arizona, December, pp. 2511-2516.
- Wang, Z.; Chen, S. e Han, W. (1999). Integrated Structural and Control Optimization of Intelligent Structures, *Engineering Structures*, Vol. 21, pp. 183-191.