

## CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÃO USANDO CONTROLADORES BASEADOS EM LÓGICA FUZZY

**Gustavo Luiz Chagas M. de Abreu**

**José Francisco Ribeiro**

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. João Naves de Ávila, 2160, Campus Santa Mônica, Bloco 1M  
Cx. P. 38400 – 089 – Uberlândia, MG, Brasil

***Resumo.** O grande avanço experimentado pela teoria dos controladores fuzzy nos últimos anos tem aberto novas possibilidades de aplicação prática de tais controladores. Este trabalho investiga as potencialidades dos controladores fuzzy no controle de vibrações de sistemas flexíveis. Propõe-se uma metodologia de projeto de amortecedores dinâmicos de vibrações, ativos, construídos a partir da lógica fuzzy e tendo como atuadores bobinas magnéticas. O comportamento não linear dos atuadores magnéticos associado à variações ou incertezas no modelo da planta são características que colaboram em tese o uso dos controladores fuzzy. Para a validação da metodologia, foi construído e instrumentado um sistema vibratório com um grau de liberdade, um atuador magnético, um sistema digital de controle baseado num PC e um "driver" de corrente. Alguns resultados experimentais são mostrados e confrontados com os resultados teóricos esperados.*

***Palavras-chave:** Controle Ativo, Lógica Fuzzy e Atuadores Magnéticos.*

### 1. INTRODUÇÃO

O controle de sistemas físicos utilizando a lógica Fuzzy é uma área que tem despertado grandes interesses em universidades e centros de pesquisas na última década. A utilização dos sistemas Fuzzy (sistemas nebulosos) no controle moderno foi introduzido a partir do trabalho de Lotfi Zadeh, 1965, e se aplica em áreas onde decisões objetivas precisam ser tomadas a partir de um conjunto de informações muitas vezes vagas, imprecisas e não adequadamente quantificadas.

As razões para tanto interesse se concentram em algumas características básicas desta tecnologia, quais sejam: (i) é natural e intuitiva na sua formulação pois tenta imitar o comportamento consciente ou a estratégia de controle de um operador humano; (ii) não prescinde do conhecimento detalhado dos modelos dos elementos do processo a ser controlado (planta, sensores, atuadores, etc.); (iii) se aplica a sistemas lineares e não lineares; (iv) é de implementação fácil e de baixo custo e (v) apresenta características de robustez à incertezas ou variações paramétricas.

Um grande apelo da tecnologia fuzzy 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. Na lógica Booleana um determinado elemento pertence ou não a um conjunto específico, ou formalmente, seja  $U$  uma coleção de objetos, chamado universo de discurso,  $u$  um elemento particular deste universo e  $A$  um dado conjunto contido em  $U$ , então, ou  $u \in A$  ou  $u \notin A$ . Para cada elemento do universo de discurso pode-se, portanto, determinar sem ambigüidades quando pertence ou não a um conjunto. Na teoria dos conjuntos Fuzzy faz-se uma generalização da teoria clássica. A extensão está na possibilidade de um determinado elemento poder pertencer a um conjunto com um valor chamado grau de pertinência (Zadeh, 1965). Assim, um elemento não simplesmente pertence ou não pertence a um conjunto, como na teoria clássica, mas poderá pertencer a um conjunto com grau de pertinência que varia no intervalo  $[0,1]$ , onde o valor  $0$  indica uma completa exclusão (não – membro), o valor  $1$  representa completa pertinência (totalmente membro) e os valores deste intervalo representam graus intermediários de pertinência do objeto com relação ao conjunto. A função que define os graus de pertinência dos elementos é chamada função de pertinência e é uma generalização da função característica da teoria clássica, uma vez que associa para todo elemento do universo de discurso um valor do intervalo  $[0,1]$  ao invés do conjunto de apenas dois elementos  $\{0,1\}$ .

As abordagens dos controladores convencionais mais utilizados procuram tratar as não linearidades dos sistemas físicos através de aproximações. Ou os sistemas são considerados simplesmente lineares, lineares por partes, ou são descritos por extensas tabelas de buscas ("lookup tables"), que procuram mapear as entradas e saídas do processo. Classicamente a escolha entre um procedimento ou outro depende dos custos envolvidos, complexidade de implementação e o desempenho desejado. Os controladores fuzzy por sua vez não ignoram a não linearidade dos processos, pelo contrário incorporam-nas na sua metodologia de projeto. Tal metodologia envolve a construção de regras, operadores lógicos e funções de pertinência, que mapeam, através de um processo de inferência, as variáveis de entrada em variáveis de saída. Qualquer função linear ou não que faça este mapeamento pode ser aproximada por uma função construída a partir da lógica fuzzy. Wang et al., 1992 provaram o seguinte teorema:

**Teorema 01** : *Dado uma função contínua  $f(.)$  no universo  $U \subset \mathbb{R}^N$  e uma constante arbitrária  $\varepsilon > 0$  então existe uma função  $g(.)$  definida no conjunto de funções derivadas segundo a lógica de controle fuzzy onde*

$$\min_{(x_1, x_2, \dots, x_n) \in U} |g(x_1, x_2, \dots, x_n) - f(x_1, x_2, \dots, x_n)| < \varepsilon$$

O teorema não estabelece o número de regras e funções de pertinência necessárias para se atingir uma determinada precisão na aproximação que se busca. Este número pode ser muito elevado em alguns casos e aí a vantagem da interpretação humana ou lógica das regras pode desaparecer. Apesar disso ele não perde a sua força.

Na facilidade de implementação física dos controladores fuzzy está outra grande parte do sucesso dos mesmos em se tratando de aplicações comerciais. Um problema de controle de temperatura numa sala, solucionado através de controladores convencionais e implementados em microcontroladores, através de tabelas de busca, demandou 64 Kb de memória. Já a solução, baseada na lógica fuzzy foi implementada em apenas 0.5Kb, (Apronix Inc., 1993), uma economia expressiva de recursos portanto.

Outra característica importante dos controladores fuzzy é a robustez das soluções alcançadas, que proporcionam bom desempenho mesmo diante de variações nos parâmetros dos sistemas físicos. Esta característica está na origem da formulação da teoria de controle fuzzy, que utilizando de um conjunto de regras naturais, intuitivas e próprias do senso comum

procura aproximar o comportamento do controlador do comportamento humano no mundo real.

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

Etapa 01 : caracterização do intervalo de valores que as variáveis de entradas e de saída podem assumir. Esta etapa não apresenta nenhuma dificuldade de ser vencida.

Etapa 02 : definição de um conjunto de funções, denominadas funções de inferência, que mapeam as variáveis de entrada e saída no universo  $[0,1]$ . A Figura 1 exemplifica a definição destas funções. Estas funções recebem nomes (rótulos) que procuram traduzir verbalmente algum significado para o fenômeno físico modelado. A definição do número de funções e a forma das mesmas é um campo aberto à investigações.

Etapa 03: Definição de um conjunto de regras, usando operadores lógicos, que buscam estabelecer uma relação entre valores da entrada e da saída. .O estabelecimento das regras, ou seja a natureza e o número das mesmas é uma variável de projeto que não dispensa naturalmente o uso da experiência e do bom senso. Um número elevado de regras não significa necessariamente um melhor desempenho. A relação custo benefício entre a demanda adicional de memória, o tempo de processamento e a melhoria no desempenho do controlador precisa ser criteriosamente avaliada quanto da construção do conjunto de regras.

Etapa 04: 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 fuzzy. 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 "*fuzzificação*"), a segunda opera com as regras, os rótulos e o resultado fase de "*fuzzificação*" e gera um conjunto de variáveis fuzzy através de um mecanismo de inferência a terceira e última subetapa transforma os resultados da inferência em uma saída numérica ("*fase de defuzzificação*"). A Figura 1 ilustra esta etapa

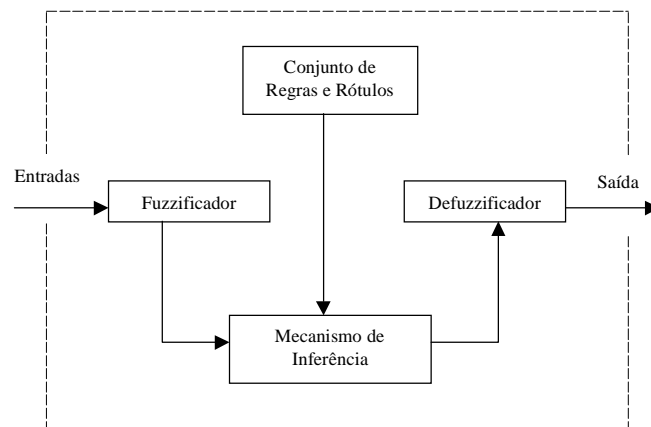


Figura 1 – Sistema de inferência difuso.

Após esta breve revisão dos principais conceitos da lógica fuzzy apresenta-se a seguir o problema do controle de um sistema de vibração de segunda ordem com um grau de liberdade.

## 2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CONTROLE

O problema que se pretende resolver é controlar os deslocamentos laterais presentes em um sistema vibratório com um grau de liberdade utilizando-se das metodologias dos sistemas fuzzy implementadas em microcomputador.

O sistema vibratório, mostrado na Fig. 2, constitui-se de uma mesa de um grau de liberdade e atuadores magnéticos instalados de modo a produzirem forças de atração que amortecem os movimentos oscilatórios da mesa.

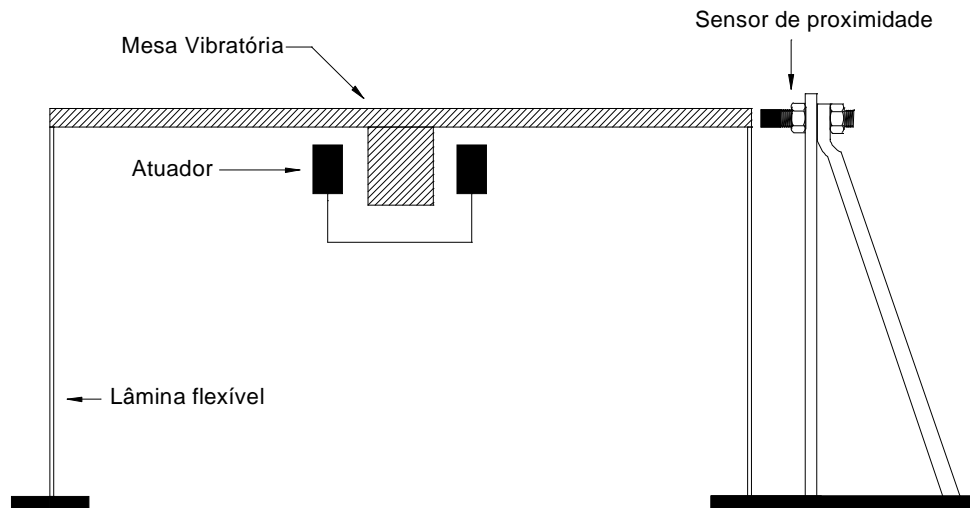


Figura 2 – Sistema Vibratório.

A mesa é instrumentada com um sensor de proximidade que detecta seus movimentos laterais que por sua vez são traduzidos por uma tensão de saída que alimenta o sistema digital de controle, a qual, gera uma tensão para o driver de corrente alimentando finalmente os solenóides do atuador magnético por uma corrente de controle.

O sistema completo com os seus vários componentes é mostrado na Fig. 3:

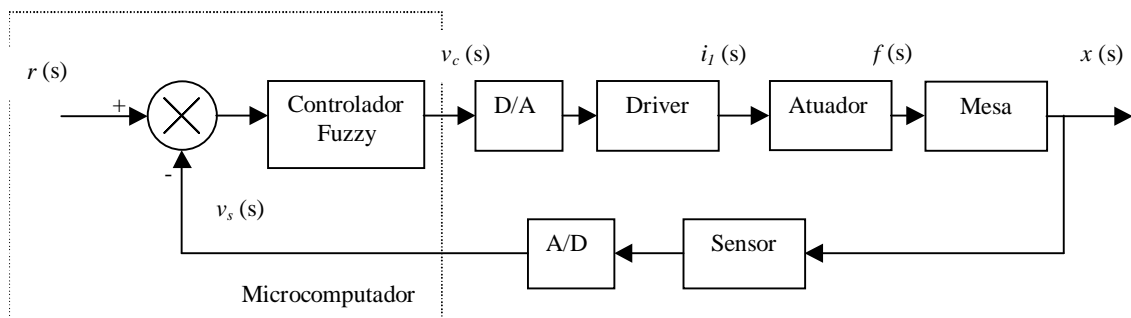


Figura 3 – Componentes do sistema mesa-controlador.

A mesa é modelada como um sistema de segunda ordem descrito pela função de transferência:

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2},$$

onde  $X(s)$  é a transformada de Laplace da saída (deslocamento) e  $F(s)$  é a transformada de Laplace da entrada (Força),  $\omega_n$  é a frequência natural e  $\xi$  a razão de amortecimento.

Um dos grandes problemas, em se tratando de controladores baseados em atuadores magnéticos, é a característica altamente não linear dos mesmos. No sentido de superar esta dificuldade foi usado no experimento uma configuração de enrolamentos proposta por Schweitzer et al., 1976, que procura minimizar tal característica. Na verdade o atuador apresenta duas bobinas uma onde se injeta a corrente de controle e outra que é percorrida por uma corrente constante. Em (Ribeiro et al., 1997), é discutida em detalhe as propriedades do atuador.

Em torno da condição nominal de operação, onde os deslocamentos são pequenos, a força gerada pelo atuador é dada por:

$$F = F_0(i + y), \quad (1)$$

onde  $i$  é a razão entre a corrente de controle e a corrente de polarização;  $y$  é a razão entre o deslocamento observado e o deslocamento da mesa e o tamanho do entreferro do atuador e  $F_0$  uma constante que depende dos parâmetros físicos do atuador.

O driver de corrente, apresentando características lineares em baixas frequências (0 a 100 Hz), foi modelado como:

$$\frac{i_I(s)}{v_c(s)} = K_{driver}, \quad (2)$$

onde  $i_I(s)$  é a corrente de saída,  $V_c(s)$  a tensão de entrada e  $K_{driver}$  é uma constante de proporcionalidade.

O sensor utilizado nos ensaios é do tipo DYMAC que não apresenta contato entre as partes. Tem a função de monitorar as posições da mesa e seu sinal de saída é proporcional à distância lida pelo mesmo, já que este sistema trabalha com frequências menores do que 100 Hz enquanto o sensor oferece boa proporcionalidade para frequências menores de 3 Mhz.

$$\frac{v_s(s)}{x(s)} = K_{sen\ sor}, \quad (3)$$

onde  $x(s)$  é o deslocamento da mesa,  $v_s(s)$  é a tensão de saída do sensor e  $K_{sen\ sor}$  é o ganho do sensor obtido de forma experimental.

### 3. SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DA LÓGICA FUZZY

O sinal do sensor foi adquirido por uma placa de aquisição comandada pelo microcomputador a uma taxa de 200 Hz, aproximadamente 15 vezes superior a frequência natural amortecida da mesa. Definiu-se como variáveis de entrada para o controlador Fuzzy o erro e a derivada do erro. A saída ( $v_c$ ) é um sinal digital que passa por uma placa D/A que alimenta o “driver” de corrente.

Cada variável de entrada e saída foi dividida em 7 regiões Fuzzy (N3,...,N1,Z,P1,...,P3) igualmente espaçadas. Funções de pertinência gaussianas foram atribuídas para cada variável (Fig. 4) e uma tabela composta de regras baseadas em informações lingüísticas e numéricas foi formada conforme mostrada na Tabela 1.

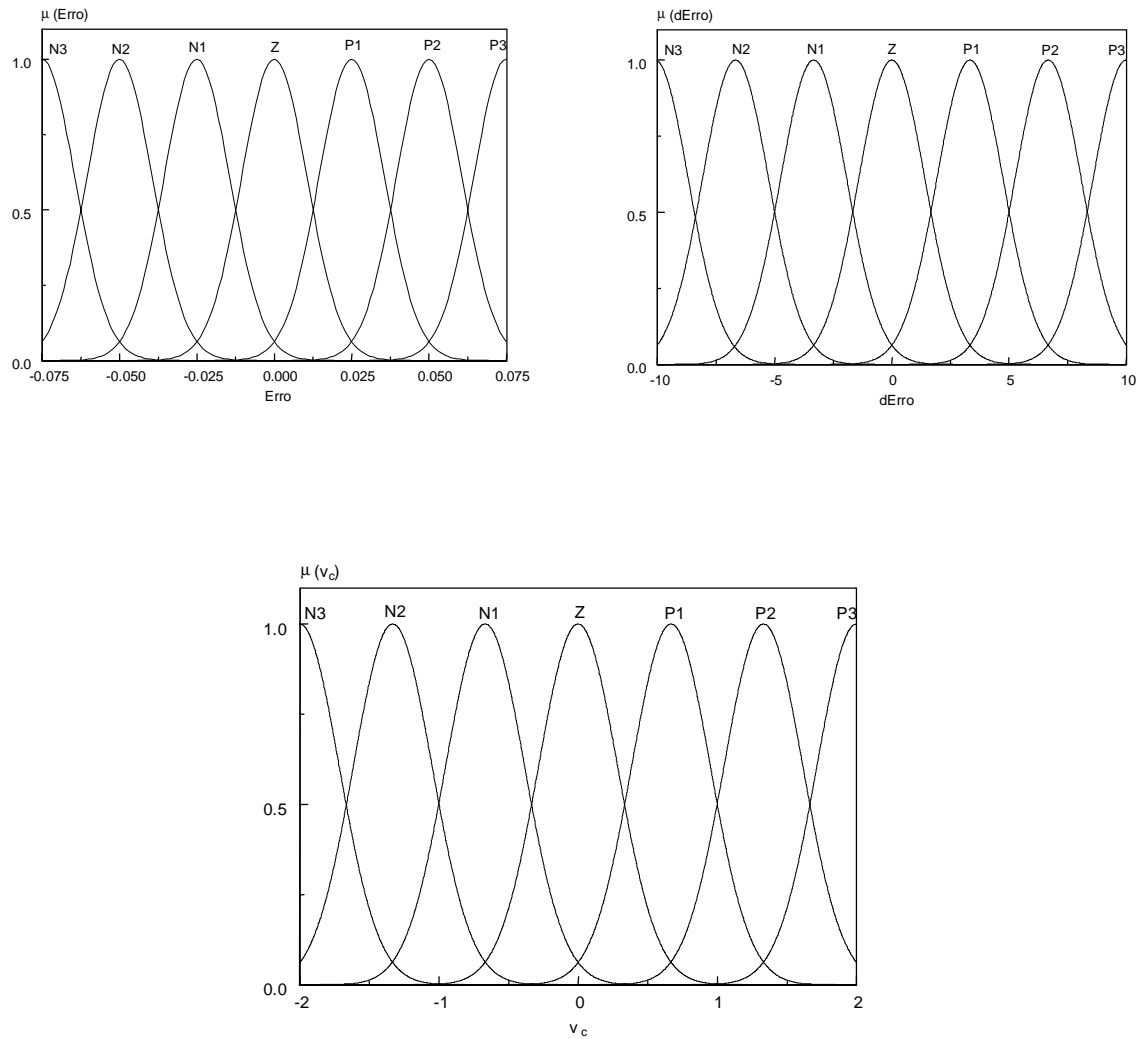


Figura 4 – Funções de pertinência e intervalos fuzzy.

Tabela 1 – Base de regras utilizada.

		Erro						
		N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3
dErro	N3	N3			N3			Z
	N2		N2		N2		Z	
	N1			N1	N1	Z	P2	
	Z	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3
	P1		P1	Z	P1	P1		
	P2		Z		P2		P2	
	P3	Z			P3			P3

Esta tabela, previamente calculada, corresponde a uma matriz, onde suas entradas serão o erro de posição e a variação do erro de posição da mesa vibratória. Assim, cada par de elementos de entrada corresponde a um elemento desta matriz, cujo valor fornece a tensão de saída ( $v_c$ ) que será aplicada ao driver de corrente.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema vibratório utilizado nos testes experimentais é o mostrado na Figura 5.

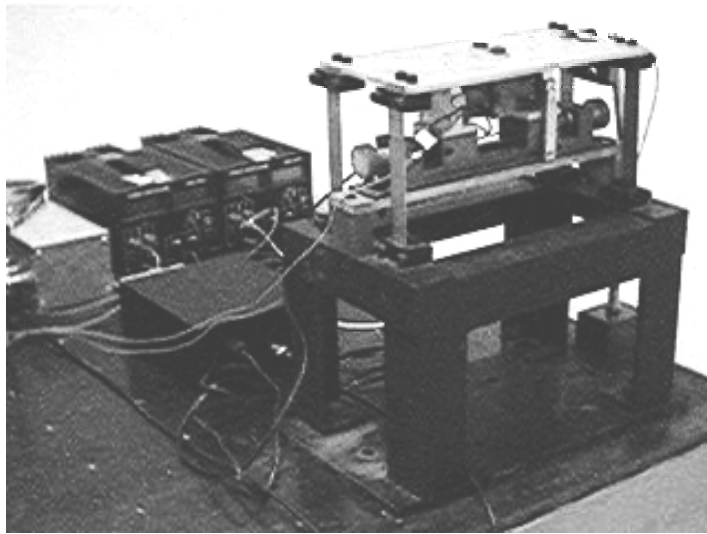


Figura 5 – Mesa vibratória.

Os parâmetros de cada componente que compõe o sistema físico foram obtidos experimentalmente e são descritos a seguir:

Mesa vibratória:

- (a) Frequência natural:  $\omega_n = 77,5$  [rad/s]
- (b) Amortecimento global:  $\xi = 7,07E-3$
- (c) Rigidez global:  $k = 11377,882$  N.m<sup>-1</sup>

Sensor de proximidade:

$$k_{sensor} = 2,0 \text{ Volts/mm}$$

Driver de corrente:

$$K_{driver} = 0.435 \text{ Ampère/Volts.}$$

Atuador magnético:

- (a) Área do entreferro:  $A = 225$  mm<sup>2</sup>
- (b) Número de espiras:  $N = 100$  espiras
- (c) Corrente de saturação:  $i_2 = 0,5$  Ampère
- (d) “gap” nominal:  $s = 1,5$  mm

Para a verificação da eficiência do controlador proposto são apresentados a seguir a simulação e teste experimental realizados para o sistema sem controle e controlado. A simulação numérica do sistema completo foi implementada utilizando um software de simulação (Matlab<sup>®</sup>) que forneceu dois tipos de resposta para o sistema: a) sistema livre e b) sistema excitado por força de impacto.

A Figura 6 mostra o diagrama de blocos do sistema em malha fechada com o controlador fuzzy utilizado na simulação numérica.

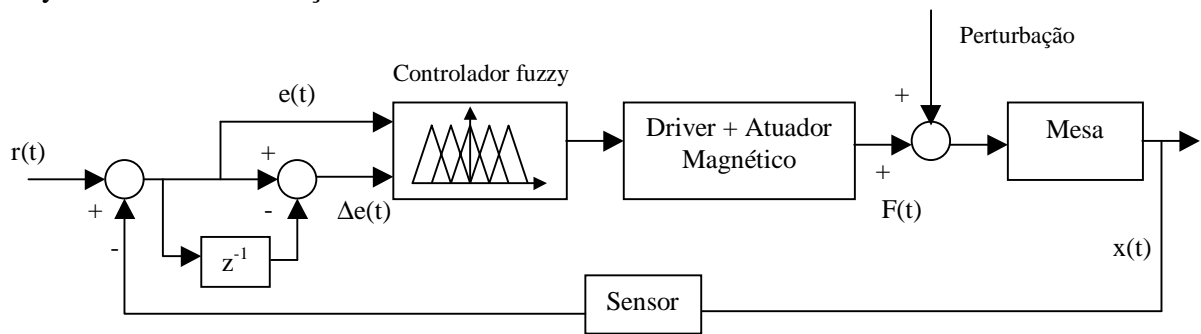


Figura 6 – Sistema de controle de deslocamento lateral utilizando o controlador fuzzy.

O sistema em malha aberta (sem o controlador fuzzy) foi simulado numericamente com uma entrada tipo impacto resultando no gráfico apresentado na Fig. 7.

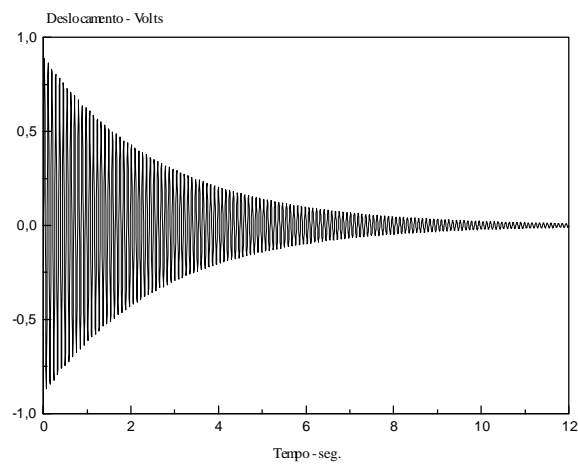


Figura 7 – Resposta numérica do sistema sem controle a uma excitação impulsiva.

No ensaio experimental o sistema sem controle, excitado por uma força de impacto, apresentou os seguintes deslocamentos laterais (Fig. 8).

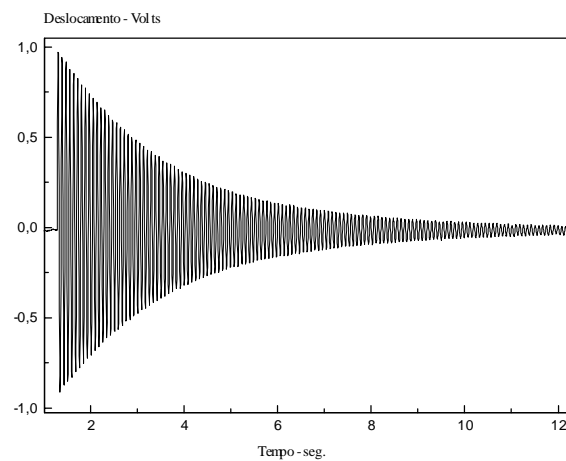


Figura 8 – Resposta experimental do sistema sem controle a uma excitação impulsiva.



Como pode ser visto nas Figs. 7 e 8, a boa concordância entre a modelagem teórica e experimental.

Inicialmente, foi feita a determinação, através de simulação numérica, da resposta ao impacto para o sistema vibratório com o controlador fuzzy. A Figura 9 mostra o resultado de simulação obtido.

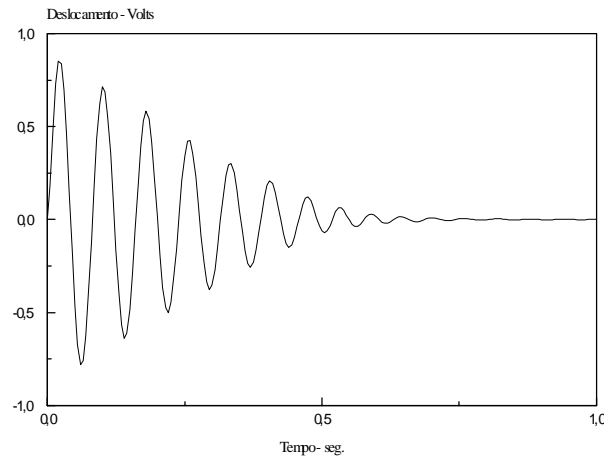


Figura 9 – Resposta numérica do sistema com controle a uma excitação impulsiva.

Em ensaio feito na bancada de testes, observou-se o seguinte comportamento da mesa, frente à excitação de impacto, sob a ação do sistema de controle (Fig. 10).

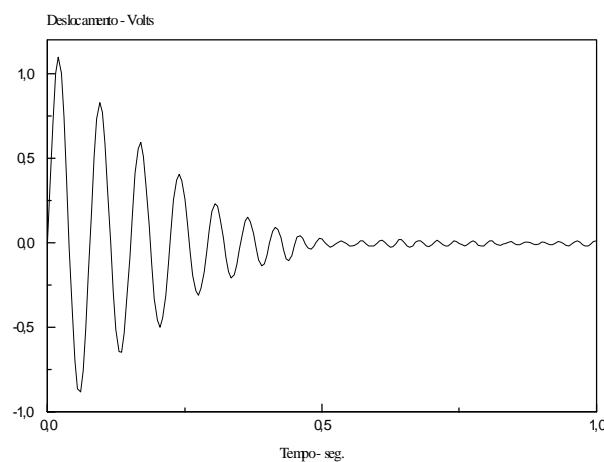


Figura 10 – Resposta experimental do sistema com controle a uma excitação impulsiva.

Com relação aos resultados apresentados, pode-se observar a boa concordância entre a modelagem teórica e experimental, tanto para o sistema sem controle como para o sistema controlado.

Uma dificuldade encontrada no projeto do controlador fuzzy foi o estabelecimento adequado dos limites do universo de discurso. Uma busca por tentativa e erro foi empregada no presente projeto.

Técnicas de estimação de parâmetros mais sofisticadas que possam aplicar duas metodologias atuais de projeto de sistemas de controle estão sendo investigadas: lógica fuzzy e redes neurais artificiais (Jang, 1993) e serão objetos de divulgação muito brevemente.

## 5. COMENTÁRIOS E DESDOBRAMENTOS

Neste trabalho apresentou-se uma metodologia de controle ativo de vibrações que utiliza controladores baseados em lógica fuzzy. Os resultados obtidos através da aplicação deste tipo de controlador em sistemas vibratórios foram bastante otimistas, devendo-se ainda salientar a facilidade de construção do controlador, implementação das regras de operação, e de não haver necessidade do modelo matemático do sistema. Quanto ao controlador fuzzy propriamente dito caracterizou-se como uma alternativa bastante eficiente no caso estudado aos controladores clássicos convencionais.

Resta, como perspectiva para o futuro imediato, implementar um controlador fuzzy com características de adaptação, onde as regras e as funções membros possam ser otimizadas a partir dos dados experimentais e do comportamento esperado para o sistema. Testes de robustez devem ainda ser executados de forma a avaliar o comportamento deste sistema diante de incertezas ou de variações abruptas nos parâmetros da planta.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Apronix Inc., 1993, Fuzzy Logic – From Concept To Implementation, User Manual.

Jang, R. (1993). ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.23, No. 3, pp. 665-685.

Ribeiro, J. F., Lépre, F. P. e Ribeiro, P. E., 1996, O uso de Atuadores Magnéticos no Controle Ativo de Vibrações de Sistemas Mecânicos, IV CEM-NNE, 439-444.

Shweitzer, G. & Lange, R., 1976, Characteristics of a magnetic rotor bearing for active vibration control, First Internat. Conf. on Vibration in Rotating Machinery, Cambridge, paper N° C239/76, September.

Wang, L. X. e Mendel, J. M., 1992, Fuzzy Basis Function, Universal Approximators and Orthogonal Least-Squares Learning, IEEE Trans Neural Networks, Vol. 3, pp. 807-814, September.

Zadeh, L. A., 1965, Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353.

### ACTIVE CONTROL OF VIBRATION USING CONTROLLERS BASED IN FUZZY LOGIC

**Abstract.** *The great progress tried by the theory of the controllers fuzzy in the last years has been opening new possibilities of practical application for these controllers. This work investigates the potentialities of the fuzzy controllers in the control of vibrations in flexible systems, A methodology of project of active dynamic damping of vibrations that uses magnetic coils as actuators is presented. The non-linear behavior of the magnetic actuators associated to variations or uncertainties in the model of the plant collaborate, in thesis, to the use of the fuzzy controllers. For the validation of the methodology, it was built a one degree of freedom vibratory system, a magnetic bearing, a digital system of control implemented in a PC and a “current driver”. Some experimental results are shown and confronted with the expected theoretical results.*

**key-words:** *Active Control, Fuzzy Logic and Magnetic Bearings.*