



CONTROLE FUZZY ADAPTATIVO DE UMA VIGA FLEXÍVEL POR MEIO DE UM MICROCONTROLADOR

Israel Jorge Cárdenas Nuñez

Universidade Federal de Uberlândia
icardenas@mecanica.ufu.br

Prof. Dr. José Francisco Ribeiro

jribeiro@mecanica.ufu.br

Patrick Magalhães Cardoso

patrick@mecanica.ufu.br

Resumo. *Este trabalho apresenta uma nova metodologia de controladores fuzzy adaptativos a partir do ajuste on-line do fator de escala na entrada de um controlador fuzzy convencional. Esta metodologia é implementada num microcontrolador e testada experimentalmente no controle de vibrações de um sistema com vários graus de liberdade, constituído por uma estrutura flexível tipo viga e dotada de atuadores piezoelétricos. A viga é instrumentada por um acelerômetro, que gera as informações dos deslocamentos laterais da viga, tais informações são utilizadas pelo controlador fuzzy com mecanismo de adaptação que calcula o sinal de controle e gera um sinal elétrico do tipo PWM.*

Palavras-chave: *Controle fuzzy, Controle adaptativo, Vibrações, Atuadores piezoelétricos, Microcontroladores.*

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios no projeto de controladores está na busca de soluções que apresentem simultaneamente boas características de robustez e excelência no desempenho. Os controladores *fuzzy* (Mandani, 1975), a despeito de dispensarem o modelamento matemático clássico dos sistemas físicos, dependem do conhecimento a priori que um especialista possui a cerca do processo que se quer controlar. Em algumas situações é muito difícil, ao especialista, construir uma estratégia de controle confiável a partir dos enunciados lingüísticos que configuram a base de regras do controlador *fuzzy*. Algumas modificações no processo podem, inclusive, estarem fora do campo de experiência do especialista. Estas questões suscitaram nos últimos tempos o aparecimento dos controladores *fuzzy* adaptativos. São controladores que revelam alguma capacidade de modificar o seu comportamento em resposta à mudanças nas dinâmicas do processo e/ou perturbações. Diante deste cenário o presente trabalho propõe um novo mecanismo fuzzy de adaptação, implementado em microcontroladores e voltado para o problema de controle de vibrações de um sistema com vários graus de liberdade, constituído por uma estrutura flexível tipo viga.

Este trabalho está assim organizado: na seção 2 são apresentados os conceitos básicos dos controladores *fuzzy* adaptativos e é proposto uma nova estratégia de adaptação para este tipo de controladores, na seção 3 é descrito o tipo de microcontrolador utilizado, na seção 4 são apresentados os resultados experimentais e finalmente na seção 5 são feitas as devidas conclusões do trabalho.

2. CONTROLE FUZZY ADAPTATIVO

Muitos dos processos do mundo real que requerem controle automático são de natureza não linear e com parâmetros dependentes das condições de operação. A necessidade de identificar estas mudanças e de se adaptar a novas condições acrescenta aos controladores *fuzzy* adaptativos dois componentes extras, que não estão presentes nos controladores *fuzzy* convencionais. O primeiro componente é o “monitor de processos” que detecta as mudanças nas características do processo. Este monitoramento pode ser feito de duas maneiras: (i) medindo o desempenho do sistema sob controle ou (ii) estimando continuamente alguns parâmetros do modelo do processo.

O segundo componente é responsável pelo “mecanismo de adaptação”. Este mecanismo pode modificar os parâmetro do controlador, para melhorar o desempenho com base nas saídas do monitor de processo. A Figura(1) mostra o esquema de um controlador *fuzzy* adaptativo típico com todos seus componentes.

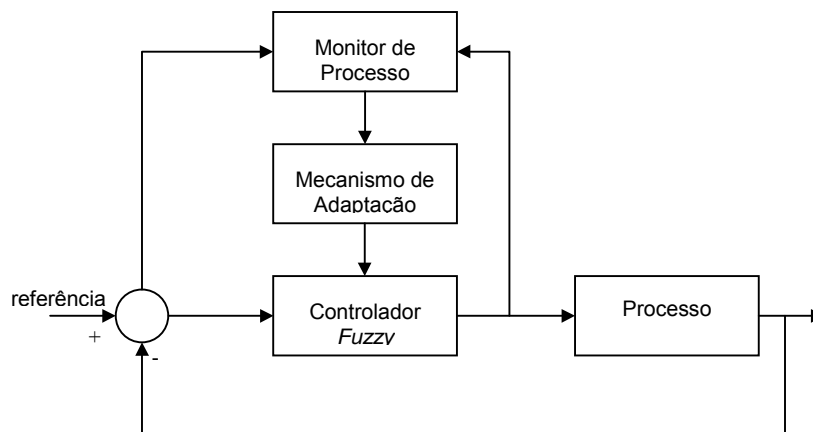


Figura 1. Componentes de um controlador fuzzy adaptativo

Os controladores adaptativos podem ser classificados como adaptativos de desempenho ou adaptativos de parâmetro, dependendo do tipo de monitoramento utilizado.

Os parâmetros normalmente adaptados nos controladores *fuzzy* são:

- o fator de escala das variáveis de entrada e/ou saída;
- a “forma” dos conjuntos *fuzzy* e
- as regras “se – então”.

Na literatura os controladores *fuzzy* adaptativos que modificam a definição do conjunto *fuzzy* ou o fator de escala são chamados *controladores auto-sintonizados* [Yamashita *et al.* (1988), Teixeira (2001), Maeda *et al.* (1991), Nomura *et al.* (1991) e Bartoloni *et al.* (1982)] enquanto que os controladores adaptativos que modificam as regras são denominados de *controladores auto-organizados* (*Self-Organizing Controller - SOC*) [Mandani (1975) e Procyk (1979)].

2.1. Proposta de adaptação do universo do discurso a partir do fator de escala

O desempenho de um controlador *fuzzy*, como já mencionado, depende em grande parte da magnitude dos sinais de entrada e saída manipulados pelo controlador. Uma maneira de melhorar o desempenho do controlador, proporcionando-lhe certa adaptabilidade, pode ser construída a partir do monitoramento da performance do processo controlado associado ao ajuste “*on line*” dos fatores de escala dos sinais de entrada e saída do controlador. Propõe-se neste trabalho um novo mecanismo de adaptação baseado nestas idéias

O mecanismo de adaptação proposto constitui um “controlador fuzzy secundário” para os fatores de escala de um controlador fuzzy primário. Projeta-se o controlador fuzzy primário de maneira usual mas observando a normalização no intervalo [-1; 1] do universo do discurso das variáveis cujos ganhos se pretende ajustar. A base de regras deste controlador e as funções de pertinência dos sinais envolvidos devem atender ao conhecimento heurístico do projetista.

Para ilustrar o procedimento seja um controlador fuzzy clássico dotado de duas entradas (erro e variação do erro) e uma saída. Suponha que se deseje melhorar o desempenho modificando o fator de escala da variação do erro. Assim:

$$\Delta e(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \cdot K_v(k) \quad (1)$$

onde $e(k)$ é o sinal do erro no instante k , $K_v(k)$ é o fator de escala da variação do erro e Δt é o tempo de amostragem.

Propõe-se neste trabalho que o fator de escala $K_v(k)$ obedeça a seguinte expressão:

$$K_v(k) = K_v(k-1) \cdot K K_v \quad (2)$$

onde $K K_v$ é a saída do controlador fuzzy do fator de escala. Observe-se que quando $K K_v$ é maior que a unidade o ganho aumenta, tornando o sistema mais sensível o que pode levar a ações de controle mais elevadas.

O diagrama de blocos do controlador fuzzy com o mecanismo de adaptação do universo do discurso é mostrado na Fig. (2).

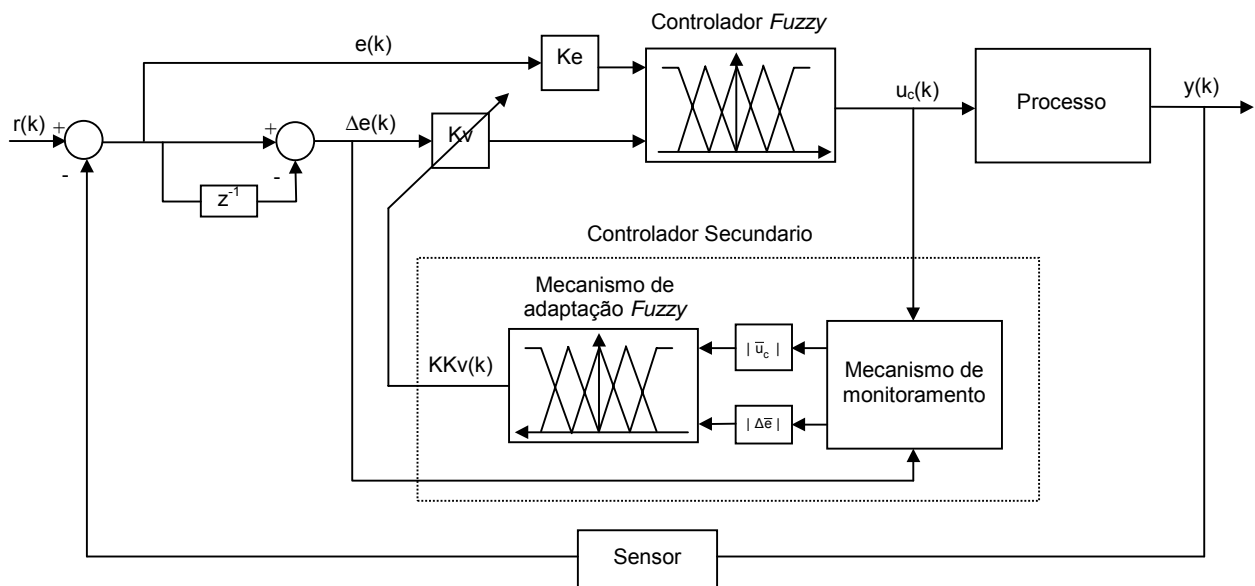


Figura 2. Controlador Fuzzy Adaptativo

Assim como nos controladores fuzzy adaptativos clássicos, nesta abordagem tem-se também presente o mecanismo de monitoramento e o mecanismo de adaptação.

Mecanismo de monitoramento: O controlador adaptativo é monitorado a partir da média absoluta da derivada do erro $|\Delta \bar{e}|$ e da média da saída do controle $|\bar{u}|$ observando os n -últimos instantes de amostragem. Estes valores são calculados da seguinte forma:

$$|\Delta \bar{e}| = \frac{|\Delta e(k)| + \dots + |\Delta e(k-n)|}{n+1} \quad (3)$$

$$|\bar{u}_c| = \frac{|u_c(k)| + \dots + |u_c(k-n)|}{n+1} \quad (4)$$

Mecanismo de adaptação: O mecanismo de adaptação é de natureza *fuzzy* possui duas entradas provenientes do mecanismo de monitoramento: a média absoluta da derivada do erro $|\Delta\bar{e}|$ e média absoluta do controle $|\bar{u}_c|$.

De forma similar ao controlador *fuzzy* principal, são definidas para cada uma destas entradas funções de pertinência. Supondo três funções (Pequeno, Médio e Grande) do tipo triangular igualmente espaçadas e definidas dentro de um universo de discurso apropriado. As saídas são funções de pertinência “*crisp*” que representam a ação desejada para o fator de escala, que seriam: (A)umentar K_v ($KK_v=1.2$); (M)anter K_v ($KK_v=1$) ou (D)iminuir K_v ($KK_v=0.8$), conforme mostrado na figura 3.

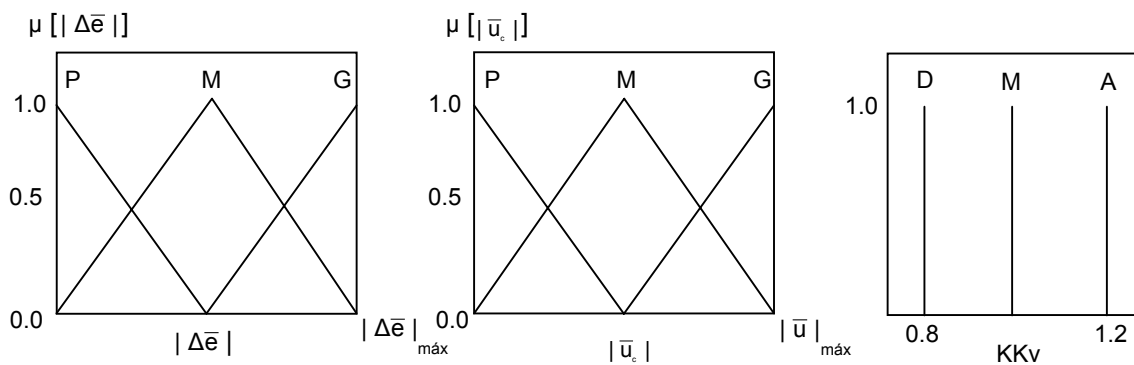


Figura 3. Funções de pertinência e intervalos fuzzy das variáveis de entrada do mecanismo fuzzy de adaptação

Pode-se, heurísticamente, inferir que:

- se $|\Delta\bar{e}|$ é grande e $|\bar{u}_c|$ é pequeno então é preciso aumentar o valor do controle. Isto pode ser obtido aumentando a sensibilidade à variação do erro do controlador *fuzzy* principal, ou seja aumentando o valor de K_v .
- se $|\Delta\bar{e}|$ é grande e $|\bar{u}_c|$ é grande então é preciso diminuir o valor do controle, pois o sistema pode estar divergindo. É preciso, portanto diminuir a sensibilidade à variação do erro do controlador *fuzzy* principal, ou seja é necessário diminuir o valor de K_v .
- se $|\Delta\bar{e}|$ é pequeno e $|\bar{u}_c|$ é pequeno então K_v deve ser mantido.

Estas e outras afirmações constituem a base de regras, construídas de forma intuitiva e retratadas na Tab. (1).

Tabela 1. Base de regras do mecanismo de adaptação fuzzy

		$ \Delta\bar{e} $		
		P	M	G
$ \bar{u}_c $	P	M	D	A
	M	M	M	D
	G	A	A	D

2.1.1. Inicialização do fator de escala

O procedimento de adaptação proposto requer a inicialização do fator de escala K_v , conforme a expressão 1. Em se admitindo uma condição inicial de grandes perturbações, a evolução de K_v ao longo do processo deve permitir o crescimento gradativo dos esforços de controle. Assim, K_v deve começar pequeno (baixa sensibilidade à entrada) o que conduz à esforços iniciais de controle também pequenos. O controlador adaptativo do fator de escala, observando a condição inicial de elevados erros e de pequeno controle atua de forma a aumentar a sensibilidade do controlador *fuzzy* principal aumentando o fator de escala K_v por meio da saída KK_v .

Quando o sistema converge tem-se uma a uma situação de baixos sinais de entrada e baixos sinais de controle e um valor de K_v praticamente constante ($KK_v \approx 1$). Caso haja nesta situação uma perturbação que provoque o aumento do erro o algoritmo de adaptação, tal como proposto, aumentaria o valor de K_v (via KK_v) o que poderia levar à divergência do controlador. Para resolver esta questão propõe-se que, uma vez detectado um condição de equilíbrio do processo (caracterizado por KK_v próximo da unidade durante um certo tempo) deve-se diminuir o valor do fator de escala ao patamar da inicialização. Se isto for feito, o controle continua pequeno, mas o sistema continua “aberto” à novas perturbações. Os seguintes passos precisam ser tomados para garantir o funcionamento adequado do algoritmo.

- Inicializa K_v
(um valor pequeno garante baixos sinais de controle, $K_v=1/1000$ por exemplo)
- Verifica se o sistema atingiu o regime permanente.
(se durante as últimas N amostras o valor de KK_v permanece na faixa de $1 \pm \delta\%$, $N=20$ e $\delta=1$, por exemplo)
- Se o regime permanente foi atingido, reinicializa-se o valor de K_v .

Esta formulação heurística para o controlador adaptativo do fator de escala foi objeto de avaliação e testes experimentais que são mostradas mas adiante.

3. MICROCONTROLADORES

O microcontrolador é um descendente direto do microprocessador. É utilizado em tarefas de controle e tem-se convertido na unidade fundamental de artefatos de uso cotidiano como: eletrodomésticos, máquinas ferramentas, equipamentos médicos, periféricos de computadores e uma infinidade de outras aplicações (Garcia, 1998).

O microcontrolador é um sistema de um só circuito integrado, que incorpora numa única pastilha várias facilidades da eletrônica, como por exemplo memória de programa, memória de dados, portas I/O, conversores de sinais etc.

A existência de ferramentas de desenvolvimento, baseados em linguagem de alto nível, tem facilitado, nos dias atuais, a tarefa de programação e o desenvolvimento de sistemas baseado em microcontroladores. Neste projeto foi utilizado o compilador C da PCW[®] (1), e como interface entre o compilador e o gravador de microcontroladores PICSTAR-PLUS[®] (2) utilizou-se o software MPLAB[®] (2).

Para a realização deste projeto foi utilizado o microcontrolador da Microchip[®] “PIC16F877”, que possui 8K de memória, 368 bytes de RAM, 3 timers, 8 canais A/D de 10 bytes, 2 canais de saída PWM, frequência máxima de operação de 20 MHz e voltagem de alimentação entre 2,4 a 6,0 V.

(1) PCW[®] - Compilador C comercializado pela Custom Computer Services, Inc., www.ccsinfo.com

(2) PICSTAR-PLUS[®] e MPLAB[®] - Ferramentas de desenvolvimento comercializados pela Microchip[®], www.microchip.com

4. CONTROLE FUZZY ADAPTATIVO DE UMA VIGA FLEXÍVEL POR MEIO DE UM MICROCONTROLADOR

Esta seção apresenta alguns resultados experimentais relativo ao controle do primeiro modo de vibrar de uma estrutura flexível do tipo viga, utilizando a metodologia de controladores *fuzzy* adaptativos e implementadas em microcontroladores. A bancada experimental mostrada na Fig. (4), é composta por uma viga flexível de aço inoxidável, com duas placas de material piezoelétrico coladas nas duas faces opostas. Em Nuñez (2001) é apresentada uma descrição detalhada deste sistema.

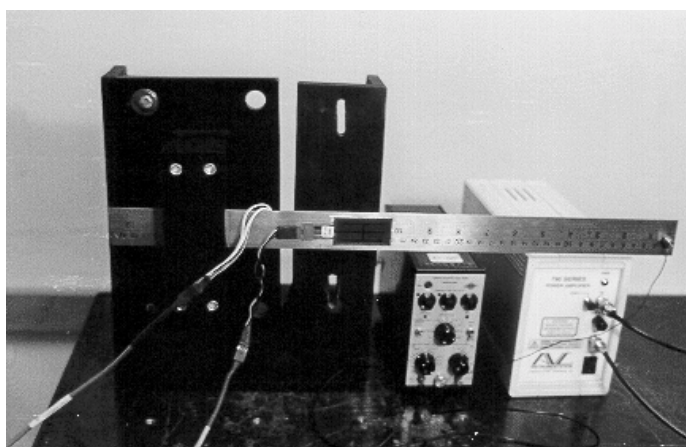


Figura 4. Bancada experimental do sistema mecânico composto por uma viga flexível

A viga flexível é instrumentada por um acelerômetro que coincide de forma deliberada com o nó do segundo modo de vibrar da viga, uma vez que a proposta do controle é atenuar as vibrações decorrentes do primeiro modo apenas. As informações do acelerômetro são utilizadas pelo controlador *fuzzy* adaptativo implementado num microcontrolador “PIC16F877”. O microcontrolador adquire o sinal do sensor, calcula o controle e gera um sinal de saída do tipo PWM que alimenta os transdutores piezoelétricos. Para monitorar o experimento foi utilizado um sistema de aquisição de dados que adquire os sinais de controle gerados pelo microcontrolador e também um sensor de proximidade indutivo posicionado na base da viga.

O elemento piezoelétrico, fornecido pelo fabricante da empresa ACX (*Active Control aXperts*), é constituído por duas placas de material piezoelétrico colados nas faces opostas da viga. Tais placas são comandadas por uma mesma tensão elétrica de sinais contrários, geradas por um amplificador de potência da ACX, a partir da tensão de entrada fornecida pela eletrônica de controle. Os componentes desta bancada são mostrados na Fig. (5).

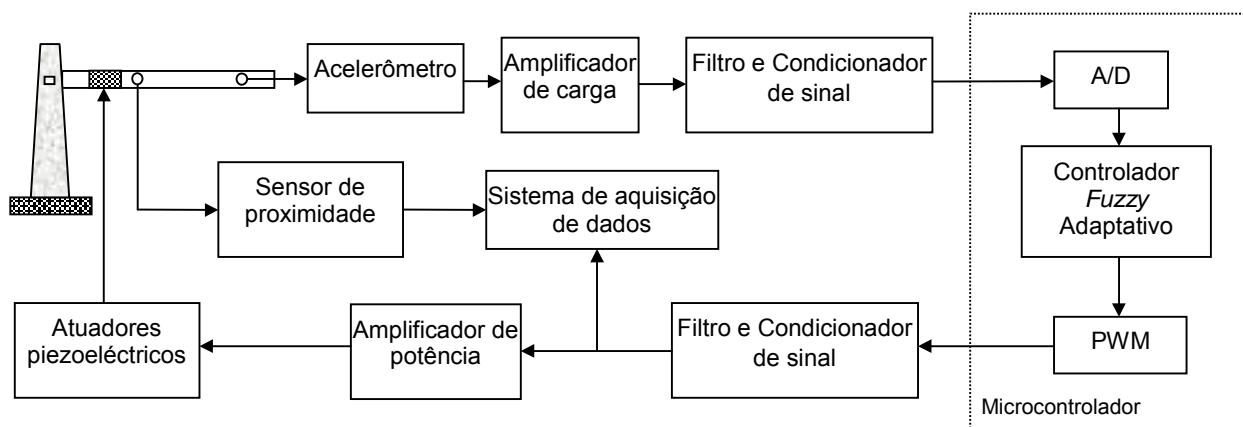


Figura 5. Instrumentação da bancada do sistema de vários graus de liberdade

É importante salientar que os sinais elétricos gerados pelo amplificador de carga do acelerômetro e pela saída PWM são devidamente condicionados (Nuñez, 2001).

4.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema em malha aberta sem o controlador foi testado experimentalmente com uma excitação inicial de natureza senoidal, na primeira frequência natural (5.75 Hz) e amplitude de 0.75V. A excitação dura apenas 0.5s, a partir deste instante o sistema oscila livremente como apresentado na Fig. (6).

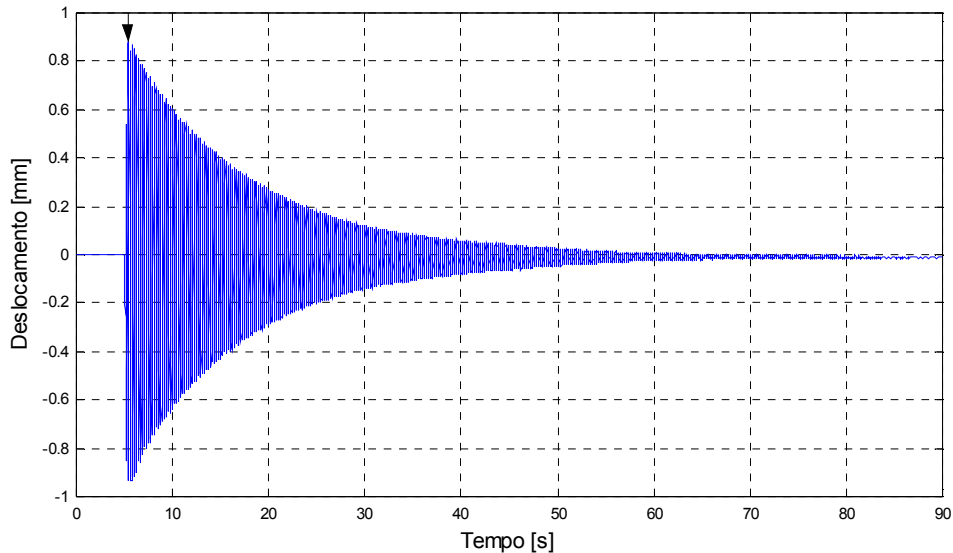


Figura 6. Resposta experimental do sistema sem controle a uma excitação senoidal

A figura mostra o comportamento pouco amortecido do sistema destacando-se o elevado tempo de acomodação, maior que 70s.

Para realizar o controle e verificar a eficiência do controlador adaptativo neste sistema, foi feito inicialmente o projeto do controlador *fuzzy* principal (convencional). Este controlador possui duas entradas, o erro e a variação do erro, e uma saída u_c de controle. Foram definidas para cada uma destas entradas três funções de pertinência [(N)egativo, (Z)ero e (P)ositivo] do tipo triangular e igualmente espaçadas e definidas dentro de um universo do discurso sintonizado de forma heurística (Abreu *et al.*, 2001). A saída deste controlador é do tipo *Sugeno* de ordem zero, com valores “*crisp*” (N=-1.0, Z=0 e P=1.0) constantes. A base de regras é mostrado na Tabela 2 e o mecanismo de inferência utilizado foi o max-prod.

Tabela 2. Base de regras do controlador *fuzzy* principal

		Δe		
		N	Z	P
e	N	P	-	-
	Z	P	Z	N
	P	-	-	N

Uma vez projetado o controlador principal, o segundo passo foi adicionar ao mesmo o mecanismo de adaptação proposto na seção anterior. Para fazer isso o universo do discurso do controlador principal foi normalizado num intervalo de -1 a 1 e foi acoplado ao controlador *fuzzy* principal o mecanismo *fuzzy* de adaptação.

Na Figura (7) é observado o desempenho do controlador fuzzy com mecanismo de adaptação quando comparado ao controlador convencional.

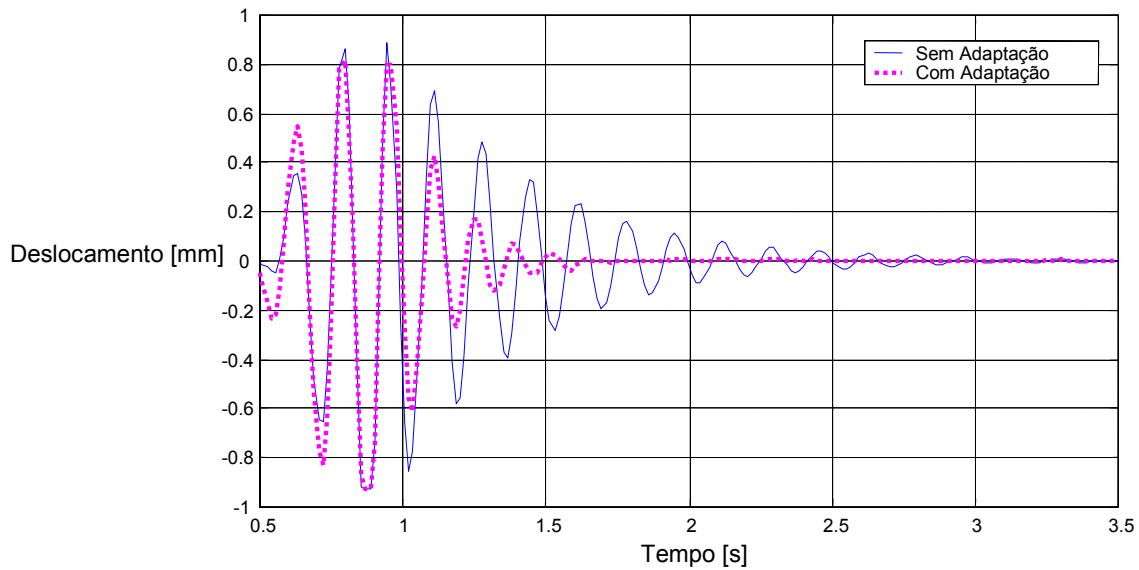


Figura 7. Deslocamento lateral do sistema com e sem mecanismo fuzzy de adaptação

Nesta figura é observado a eficiência dos controladores que introduzem um acentuado amortecimento ao sistema e verifica-se ainda que o tempo de acomodação do controlador com mecanismo de adaptação é inferior ao do controlador *fuzzy* convencional, apresentando assim uma eficiência ligeiramente superior.

Para avaliar a capacidade de adaptação deste procedimento proposto foram aplicadas excitações seqüenciais ao sistema. No começo o sistema está em repouso, o mesmo é perturbado por uma força excitadora com duração de 0,5s, passados 3,5s uma nova força excitadora é aplicada ao sistema. A Figura (8) mostra o comportamento do controlador a estas excitações.

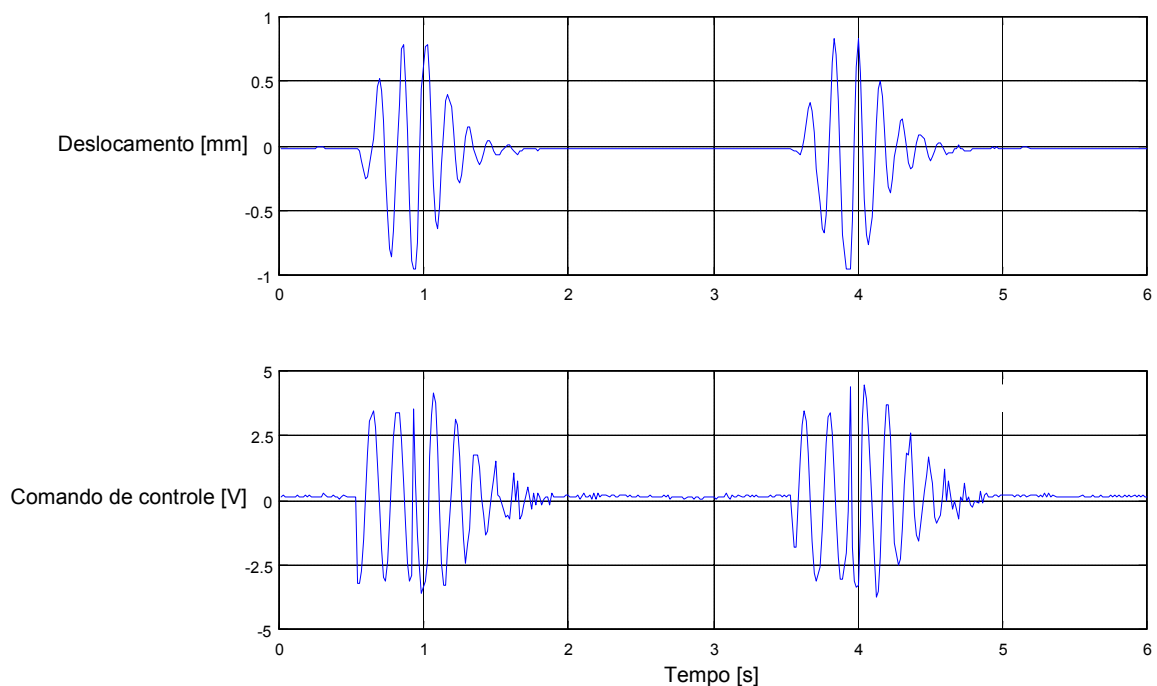


Figura 8. Deslocamento lateral e comando de controle, para duas excitações seqüências, do sistema *fuzzy* adaptativo

A Figura (9) revela o comportamento do valor de $1/K_v$ ao longo do tempo para a experiência descrita anteriormente. Como se pode verificar o mecanismo de adaptação revela-se bastante eficiente atendendo plenamente aos objetivos propostos de desempenho e adaptabilidade.

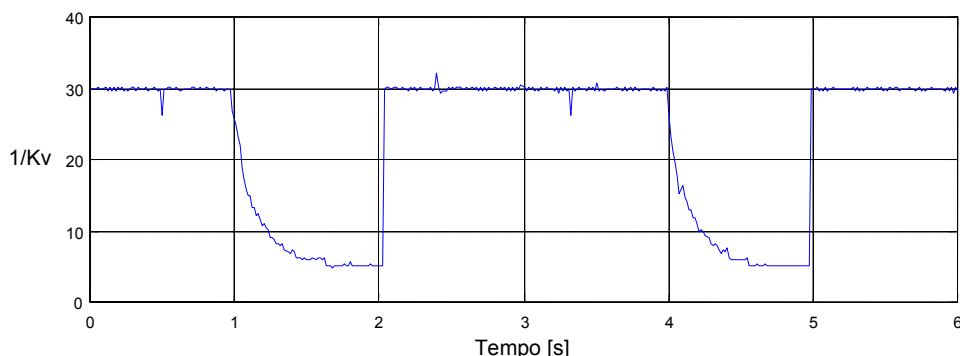


Figura 9. Variação do fator de escala K_v

5. CONCLUSÕES

O trabalho aponta para algumas conclusões importantes. No que concerne ao emprego de controladores *fuzzy* para atenuar vibrações mecânicas indesejadas observou-se a potencialidade desta ferramenta. Não foi necessário elaborar modelos matemáticos dos sistemas e a compreensão intuitiva do processo foi de grande valia, especialmente na formulação da base de regras.

O mecanismo de adaptação proposto mostrou-se também bastante eficiente, pois agregou ao sistema uma maior versatilidade diminuindo, de forma significativa, a sensibilidade do projeto à escolha de parâmetros do controlador *fuzzy*. Ficaram mais fáceis de serem definidos os universos do discurso envolvidos e o valor inicial do fator de escala (K_v) do mecanismo de adaptação.

6. REFERÊNCIAS

- Bartoloni, G., Casalino, G., Davoli, F., Mastretta, M., Minciardi, R., and Morten, E., "Development of Performance Adaptive *Fuzzy* Controllers with Application to Continuous Casting Plants." In: R. Trappl (ed.), *Cybernetics and Systems Research*, Amsterdam, North-Holland, 1982, pp. 721-728.
- Garcia D., 1998, "Curso de Introducción a los Microcontroladores", pp. 6-40, Bogota, Colombia.
- Mamdani, E.H., and Assilian, S., 1975, "An experiment in linguistic synthesis whit a fuzzy logic controller", *International Journal of Man-Machine Studies* 7,1-13.
- Maeda, A., Someya, R., and Funabashi, M., "A Self-tuning Algorithm for *Fuzzy* Membership Functions using a Computational Flow Network," Proc. of the IFSA '91, 1991.
- Microchip PIC Microcontrollers, 2000, "Data Book, Technology Inc." PIC16F877", USA.
- Nomura, H., Hayashi, I., and Wakami, N., "A Self-tuning Method of *Fuzzy* Control by Descent Method," Proc. of the IFSA '91, Brussels, 1991, pp. 155-158.
- Nuñez, I.J.C., 2001, "O Uso De Controladores Fuzzy Adaptativos, Implementados Em Microcontroladores, No Controle De Vibrações De Sistemas Mecânicos", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia –MG.
- Teixeira, R.L., 2001, "Uma Metodologia De Projeto De Controladores Híbridos Inteligentes Com Aplicações No Controle Ativo De Vibrações Mecânicas", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
- Yamashita, Y., Matsumoto, S., and Suzuki, M., "Start-up of a catalytic Reactor by *Fuzzy* Controller," *J. Chemical Engineering of Japan*, 21(1988) 277-281.

ADAPTIVE FUZZY CONTROL OF A FLEXIBLE BEAM THROUGH MICROCONTROLLERS

Israel Jorge Cárdenas Nuñez

Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. José Francisco Ribeiro

jribeiro@mecanica.ufu.br

Patrick Magalhães Cardoso

patrick@mecanica.ufu.br

***Abstract.** This work presents a new methodology of adaptive fuzzy controllers starting from the adjustment on-line of the scale factor in a conventional fuzzy controller's input. This methodology is implemented in a microcontroller and tested experimentally for the control of vibrations of a system with several degrees of freedom formed by a flexible beam and endowed with piezoelectric actuators. The beam is scored by an accelerometer, that generates the information of the lateral displacements of the beam, such information are used by the fuzzy controller with adaptation mechanism that calculates the control output and it generates an electric signal of the PWM type.*

***Keyword:** Fuzzy Control, Adaptative Control, Vibrations, Piezoelectric Actuators , Microcontrollers*