

# UMA METODOLOGIA DE PROJETO DE CONTROLADORES HÍBRIDOS INTELIGENTES APLICADO NO CONTROLE ATIVO DE UMA VIGA FLEXÍVEL

RAFAEL LUÍS TEIXEIRA, JOSÉ FRANCISCO RIBEIRO

*Laboratório de Sistemas Mecânico, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia  
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Monica – Cep 38400.089 - Uberlândia, MG, Brasil  
E-mails: rafael@mecanica.ufu.br e jrubeiro@mecanica.ufu.br*

**Resumo**— Este trabalho propõe uma metodologia de projeto de controladores fuzzy. Eles são obtidos a partir de um processo de otimização que utiliza os algoritmos genéticos. Esse mecanismo de otimização requer o conhecimento da dinâmica do sistema. Uma rede neural artificial é então treinada para, a partir de dados de entrada e saída do sistema, modelar o comportamento dinâmico da planta. São otimizados a base de regras, o peso das regras e as funções de pertinência de entrada. A metodologia proposta é avaliada experimentalmente em uma viga de aço engastada-livre controlada por atuadores piezelétricos. Os controladores são avaliados no domínio do tempo e da frequência. Os resultados obtidos comprovam a eficiência da metodologia proposta.

**Abstract**— This work proposes a methodology of *fuzzy* controllers design. They are obtained by an optimization process that uses genetic algorithms. For this optimization procedure, the knowledge of the system dynamics is required. So an artificial neural network is trained to model the dynamic behavior of the plant from the experimental inputs and outputs of the system, the rule base, the weights of the rules and the input membership functions are optimized. The proposed methodology is evaluated experimentally on a steel cantilever beam controlled by piezoelectric actuators. Many controllers are evaluated on the time and frequency domain. The obtained results confirm the efficiency of the proposed methodology.

**Keywords**— Logic *Fuzzy*; Neural Network; Genetic Algorithms; Active Control of Vibration.

## 1 Introdução

Os sistemas mecânicos estão freqüentemente sujeitos as excitações que provocam vibrações indesejáveis, perturbando operadores e usuários e, em alguns casos, colocando em risco a própria integridade estrutural do sistema. Os avanços tecnológicos observados nas últimas décadas na área de materiais abriram novas perspectivas para o controle de vibrações. Os materiais ditos "inteligentes", que podem ter algumas de suas propriedades modificadas mediante uma ação de controle. Destaque especial para os materiais piezelétricos, que têm possibilitado a concepção de sensores e atuadores. A distribuição de sensores e atuadores piezelétricos, ao longo de amplas superfícies, permitindo o monitoramento e o controle de vibração é hoje uma realidade concreta (Banks et al., 1996).

Paralelamente ao desenvolvimento de materiais houve a necessidade de estabelecer instrumentos de análise e síntese de controladores voltados para sistemas não lineares, complexos e variantes no tempo. Surgiram os sistemas híbridos inteligentes baseados no uso de duas ou mais tecnologias de inteligência artificial, por exemplo: as redes neurais artificiais, os algoritmos genéticos e a lógica fuzzy. (Teixeira e Ribeiro, 2001; Uhrig e Tsoukalas, 1997). Esse novo campo é caracterizado por uma certa tolerância à imprecisão e ambigüidades decorrentes de variações paramétricas, perturbações dinâmicas, alterações ambientais, ignorância dos modelos.

Assim, são dois os objetivos principais desde trabalho: (i) propor uma metodologia de projeto de controladores híbridos inteligentes, centrados na lógica fuzzy, nos algoritmos genéticos e nas redes

neurais artificiais, que minimize o conhecimento do comportamento dinâmico do sistema a ser controlado, e (ii) avaliar a metodologia proposta experimentalmente quando aplicada no controle ativo de vibrações mecânicas. Para atender estes objetivos, esse trabalho está assim organizado: na seção 2 é apresentada a metodologia de projeto do controlador; a seção 3 mostra a metodologia aplicada no controle de uma viga de aço flexível engastada numa das extremidades e controlada por atuadores piezelétricos, na seção 4 são apresentados os resultados experimentais dos controladores no domínio do tempo e na seção 5 os mesmos são caracterizados no domínio da frequência. Na última seção são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 2 Metodologia de projeto de controladores híbridos inteligentes

Na última década, o emprego de redes neurais artificiais e da lógica fuzzy na solução de problemas de Engenharia, cresceu de forma muito significativa. Mais recentemente têm sido propostas estratégias de solução que unem essas áreas de conhecimento e acrescentam outras como os algoritmos genéticos, os sistemas caóticos, sistemas autônomos, etc. Estas estratégias constituem os sistemas híbridos, baseados em técnicas de inteligência artificial. Estes sistemas operam com plantas complexas, não lineares e pobremente conhecidas. São capazes de "perceber" alterações ambientais e/ou de funcionamento e de se adaptarem a diferentes condições de operação.

A lógica fuzzy faz uso da teoria dos conjuntos fuzzy, proposta em 1965, por Lofti Zadeh. Foi Mamdani em 1974, um dos pioneiros na formulação dos controladores fuzzy. Como características gerais os

controladores fuzzy são naturais e intuitivos na sua formulação, pois procuram imitar o comportamento consciente e a estratégia de controle de um operador humano. Dispensam o conhecimento detalhado do sistema físico. São de fácil implementação e aplicam-se a sistemas lineares e não lineares. Em muitas circunstâncias, no entanto, especialmente em se tratando de sistemas complexos e não lineares, não é possível estabelecer um comportamento intuitivo para o sistema que se deseja controlar. Não há um operador a ser "imitado" pelo controlador fuzzy pois o operador "não sabe" tratar de forma intuitiva a complexidade do problema. Pode-se, neste caso, propor-se um controlador fuzzy. No entanto, a possibilidade dele ser eficiente é obviamente muito remota. O desafio que se coloca é como escolher um controlador fuzzy eficiente para um sistema complexo, na ausência de informações intuitivas sobre tal sistema. Neste ponto é que surgem os algoritmos genéticos.

Os algoritmos genéticos (Holland,1992) procuram, de certa maneira, imitar o processo de evolução natural observado na natureza. Uma população de indivíduos, um conjunto de parâmetros, evolui num processo de aprendizado, onde os indivíduos mais aptos sobrevivem e transmitem, por reprodução, suas características hereditárias para a população seguinte. Esta evolução, que comporta cruzamentos e mutações, resulta numa população vencedora representando o conjunto ótimo de parâmetros que maximiza uma determinada função de custo. A formulação matemática desta evolução configura o algoritmo genético (Goldenberg, 1989). Os algoritmos genéticos necessitam, no entanto, do modelo do sistema dinâmico para que seus indivíduos (as soluções propostas) possam ser avaliados. Tal modelo pode ser obtido a partir de dados conhecidos de entrada e saída do sistema físico. As redes neurais artificiais (RNAs), por exemplo, podem fazer o mapeamento entre a entrada e a saída, configurando-se como um modelo do sistema físico.

À luz do acima exposto propõe-se neste trabalho investigar a seguinte metodologia para a síntese de um controlador:

- (i) dado um sistema a ser controlado e devidamente instrumentado, excita-se o mesmo com sinais de entrada conhecidos e registram-se os sinais de saída gerados;
- (ii) a partir dos sinais de entrada e saída constrói-se e valida-se um modelo neural do sistema dinâmico, utilizando a teoria das redes neurais artificiais;
- (iii) validado o modelo neural do sistema, define-se a arquitetura de um controlador fuzzy, observando: o número de entradas e saídas, o intervalo de variações dos sinais envolvidos, o número e a natureza (triangular, gaussiana etc) das funções de pertinência,
- (iv) define-se o comportamento dinâmico desejado para sistema (overshoot, tempo de subida e de acomodamento, banda passante, etc.), operando sob a ação do controlador a partir de certas condições de

contorno especificadas (condições iniciais, tempo de simulação, etc.)

(v) define-se uma função objetivo que, uma vez minimizada, resulte no comportamento definido no item anterior. A função objetivo deve ser capaz de "medir" a distância entre o comportamento real do sistema e o comportamento desejado durante o intervalo de simulação;

(vi) seleciona-se, via algoritmo genético, os controladores fuzzy, modificando alguns de seus parâmetros (regras, pesos, parâmetros das funções de pertinência etc), que minimizem a função objetivo definida anteriormente. Para isso simula-se o comportamento do sistema físico, sob a ação do controle, utilizando o modelo neural anteriormente validado e, finalmente,

(vii) verifica-se experimentalmente o desempenho do(s) controlador(es) proposto(s).

Para uma melhor compreensão desta metodologia veremos, nesta próxima seção, a aplicação da metodologia que avalia e discute numericamente e experimentalmente a metodologia de projeto proposta.

### 3 Aplicação da metodologia de projeto

A metodologia proposta é avaliada experimentalmente no controle ativo de vibrações de um sistema dinâmico que apresenta vários graus de liberdade. O sistema é composto por uma viga flexível de aço inoxidável (400 x 34,5 x 1,2 mm) rigidamente fixada em uma das suas extremidades e livre na outra, conforme mostrado nas Figuras 1 e 2.

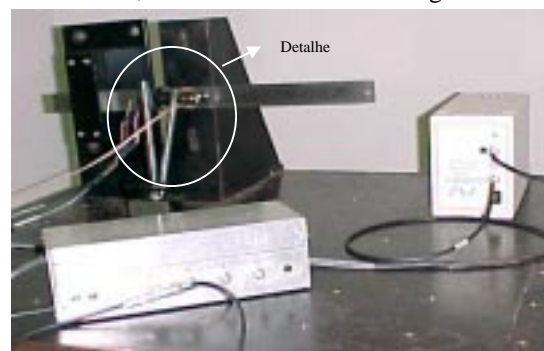


Figura 1. Bancada experimental do sistema mecânico vibratório.



Figura 2 Detalhe da instrumentação da bancada experimental.

A viga flexível é instrumentada com um sensor de proximidade que gera as informações dos deslocamentos da laterais da viga. Estas informações são utilizadas por um controlador fuzzy, implementado num PC. Os sinais de comando, calculados no PC, são enviados para um amplificador de fonte inversora que alimenta dois transdutores piezoelétricos, que transformam o sinal de entrada em momentos de controle. Os componentes do ensaio são mostrados na Figura 3.

O posicionamento do atuador ao longo da viga, distanciado 115,3 mm do engastamento, não foi objeto de análise neste trabalho, pois aproveitou-se uma estrutura experimental já disponível no laboratório. A posição do sensor, 146 mm do engastamento, foi definida considerando-se a excursão do deslocamento lateral da viga e a sensibilidade do sensor.

A Figura 4 mostra a resposta no tempo do comportamento da viga, observado pelo sensor, quando excitada por uma força de impacto. Destaca-se o comportamento muito pouco amortecido do sistema e, por conseqüência, o elevado tempo de acomodação, maior que 80 segundos. A Figura 5 mostra a resposta em frequência da viga livre obtida experimentalmente.

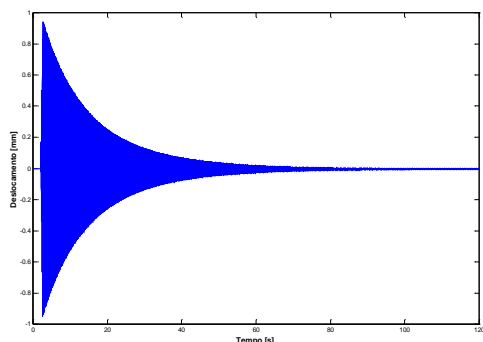


Figura 4 Resposta ao impulso do sistema sem controle

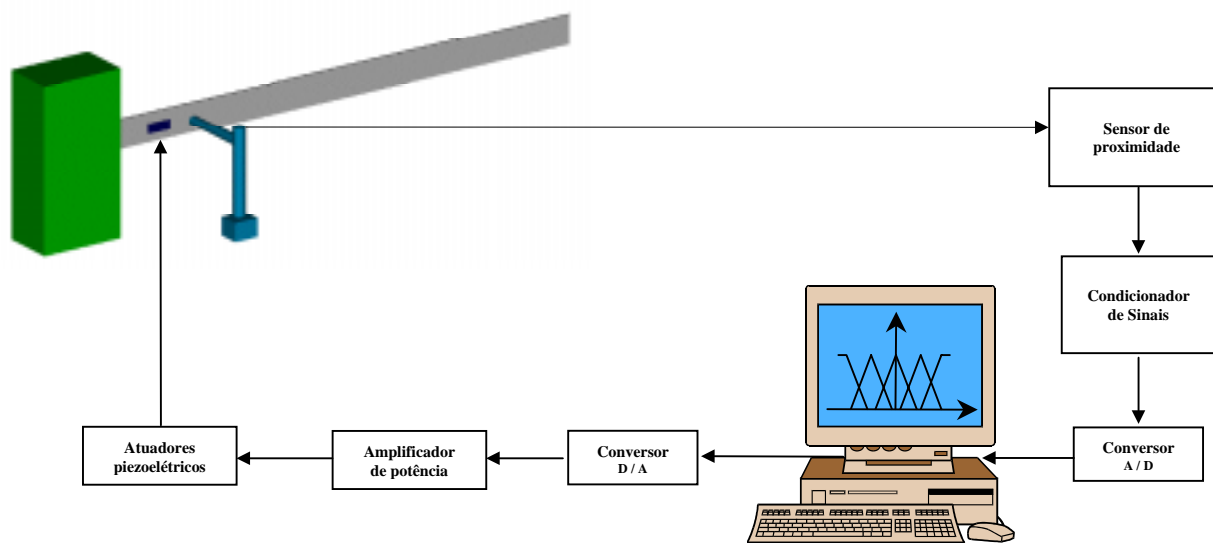


Figura 3. Esquema da montagem da instrumentação da bancada da viga vibratória.

A Figura 5 mostra a resposta em frequência da viga obtida experimentalmente.

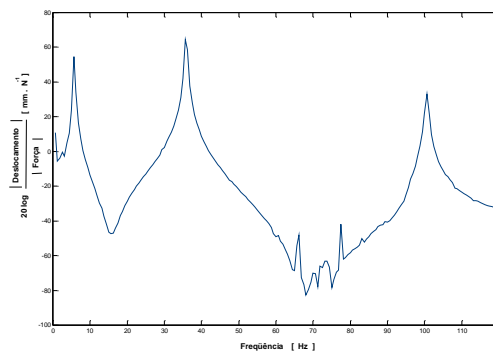


Figura 5. Resposta em frequência da viga

Como pode ser observado na Figura 5, a viga apresenta três frequências naturais abaixo de 120 Hz. Pretende-se, neste experimento, construir um controlador fuzzy que atenua as vibrações em baixa frequência e controle o primeiro modo de vibrar da viga. Para atender esta condição de projeto o sinal do sensor é filtrado por um filtro digital passa-baixa com banda passante de 10 Hz.

### 3.1 Identificação experimental da viga flexível

Para identificação da viga adotou-se a seguinte metodologia: gerou-se sinais de comandos para o sistema e capturou-se, via o sensor, o deslocamento da viga. Os sinais, adquiridos e comandados foram armazenados em arquivo, a uma taxa de 300 Hz, e utilizados no treinamento e validação do modelo neural do sistema, conforme Figura 6.

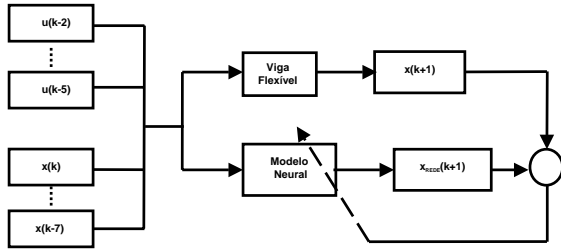


Figura 6. Identificação do modelo direto da planta

O vetor de entrada para o treinamento da rede foi:

$$X = [x(k) \ x(k-1) \ x(k-2) \dots x(k-7) \ u(k-2) \ u(k-3) \dots u(k-5)] \quad (1)$$

enquanto que a saída é o vetor  $x(k+1)$ . Este arranjo dos sinais de entrada foi obtido após alguns ensaios numéricos que avaliaram diferentes alternativas comparando a capacidade de propagação da rede em malha fechada.

A validação em malha fechada procura avaliar a capacidade da rede em propagar o estado futuro a partir de estados anteriores calculados pela própria rede. Esta funciona como um "integrador" da dinâmica do sistema. A validação começa apresentando à rede um determinado estado inicial (vetor  $X$ , dado pela equação 1) e uma ação de controle conhecida, a partir daí ela evolui no tempo, realimentando-se com seus próprios dados. Na validação observou-se: o comportamento em regime permanente, as frequências presentes no transitório e o amortecimento do sistema. Quando estes parâmetros se aproximavam dos valores esperados então o modelo era aceito.

Uma vez definido o modelo neural, que no caso apresentou uma boa estimativa em baixa frequência, o próximo passo é a otimização do controlador.

### 3.2 Otimização numérica dos controladores fuzzy

Uma vez elaborado o modelo neural da viga, definiram-se as estratégias de otimização dos controladores fuzzy. Neste caso, o sinal de erro,  $e(k)$ , foi definido como o sinal de deslocamento da viga  $y(k)$ , obtido pelo sensor de proximidade. O sinal de erro e a sua variação no tempo (derivada) foram as entradas do controlador fuzzy e saída o sinal de controle. A estratégia de otimização utilizada procurou minimizar o seguinte índice de performance:

$$IP_{VIGA} = -1/2 \int_0^t \sqrt{\alpha [x(t).F(t)]^2 + \beta [\dot{x}(t).H(t)]^2 + \gamma [u(t).G(t)]^2} dt \quad (2)$$

onde  $t$  é o tempo de simulação adotado em 2 segundos,  $x(t)$  é a resposta do modelo neural,  $u(t)$  é o valor de comando de controle obtido para um determinado controlador ou indivíduo do algoritmo.  $F(t)$ ,  $H(t)$  e  $G(t)$  são funções que ponderam no tempo os sinais de deslocamento, de velocidade e de controle enquanto os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são pesos constantes. No caso estudado estas funções  $F(t)$ ,  $G(t)$  e  $H(t)$  foram iguais e são mostradas na Figura 7. Com

estas funções procurou-se valorizar o comportamento em regime do sistema controlado e garantir a independência da otimização em relação às condições iniciais de simulação. Os pesos constantes foram escolhidos de forma que equilibrassem a contribuição das três parcelas na função objetivo. Os valores destas variáveis foram:  $\alpha=100$ ,  $\beta=1$  e  $\gamma=100$ .

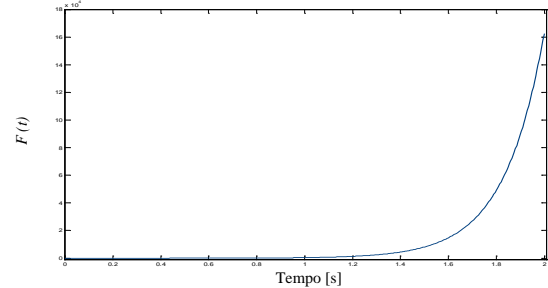


Figura 7. Função auxiliar  $F(t)$  para cálculo da função objetivo.

O algoritmo genético usado foi construído a partir da codificação dos indivíduos em ponto flutuante. Utilizou-se o torneio como mecanismo de seleção natural, promoveu-se a mutação e não foram realizados cruzamentos entre os indivíduos.

O controlador fuzzy inicial adotado possui uma base regra completa, onde todas as regras ativam a função de pertinência nula na saída, o que significa dizer, que para quaisquer entradas, o controlador inicial gera uma saída zero. Os pesos adotados para as regras foram todos unitários. Escolheu-se tanto para as variáveis linguísticas da entrada  $e(k)$  e  $\Delta e(k)$  cinco curvas de pertinência tipo gaussianas: negativo grande (NG), negativo pequeno (NP), zero (Z), positivo pequeno (PP) e positivo grande (PG), totalizando 25 regras. Para as saídas adotou-se cinco valores crisp, configurando o controlador fuzzy como do tipo Takagi-Sugeno.

O procedimento percorreu o seguinte caminho: otimizou-se primeiramente o conjunto de regras, tendo como variável dependente a função de pertinência da saída; a partir do controlador obtido no passo anterior, otimizou-se os pesos associados à cada uma das regras; em seguida, reduziu-se o conjunto de regras, eliminando aquelas, com peso inferior à 0,5 e fez-se novamente a otimização dos pesos, agora numa base de 13 regras. O controlador anterior, foi mais uma vez otimizado, observando como variáveis de otimização agora, os centros das funções de pertinência das duas entradas. A Tabela 1 mostra os testes efetuados.

Tabela 1 Controladores fuzzy otimizados

| Controlador | Estratégia de otimização                     | Amortecimento ( $\xi$ ) |
|-------------|--|-------------------------|
| V-livre     | -  | 0,002                   |
| V1          | Consequente da regra                         | 0,066                   |
| V2          | Pesos (base de regras completa)              | 0,091                   |
| V3          | Funções de pertinência das entradas (centro) | 0,096                   |
| V4          | Pesos (base de regras reduzida a 13)         | 0,092                   |
| V5          | Funções de pertinência das entradas (centro) | 0,107                   |

## 4 Resultados dos testes experimentais no domínio do tempo

Todos os controladores obtidos no item anterior foram avaliados experimentalmente. Para isso o sistema foi excitado durante 5 segundos por um comando senoidal. A frequência da excitação (5,6 Hz) foi escolhida de forma que provocasse uma perturbação considerável na viga e a amplitude do sinal foi de 4,5 volts. Dada a semelhança do comportamento dos diferentes controladores, apresentaremos apenas alguns deles.

O controlador V3, como já mencionado, otimiza os centros das funções de pertinência da entrada. A sua base de regras, mostrada na Tabela 2, é a mesma do controlador V2.

Tabela 2 Conjunto de regras do controlador V3.

| Erro      | NG        | NP        | Z         | PP       | PG        |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| <b>NG</b> | PP (0,01) | NP(0,49)  | NP(0,90)  | NG(0,30) | PP (0,73) |
| <b>NP</b> | NG(0,99)  | NG(0,95)  | NG(0,63)  | NG(0,45) | PP (0,84) |
| <b>Z</b>  | NG(0,37)  | PP (0,19) | Z (0,77)  | PG(1,00) | NG(0,81)  |
| <b>PP</b> | NG(0,37)  | PG(0,49)  | PP (0,70) | Z (0,02) | PP (0,03) |
| <b>PG</b> | NP(1,00)  | Z (0,48)  | NG(0,01)  | PG(0,68) | PG(0,53)  |

O ensaio com o controlador V3 ativado 0,5 segundos após o início das excitações revela, conforme mostra a Figura 8, um bom comportamento do controlador, que atenua de forma significativa as vibrações num tempo bastante pequeno.

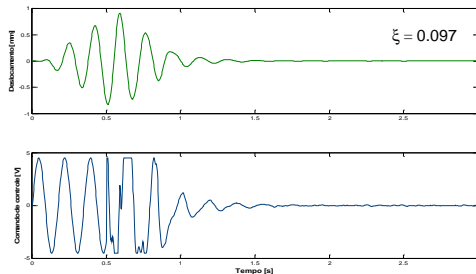


Figura 8. Deslocamento lateral e comando de controle para o sistema a malha fechada.

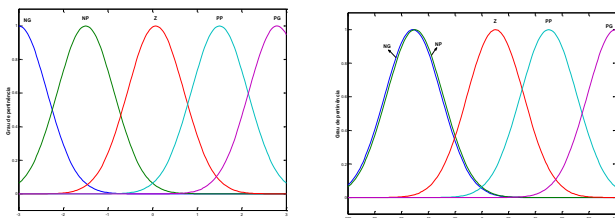


Figura 9. Funções de pertinência no universo do discurso do erro e da variação do erro, do controlador V5.

O controlador V5 teve alguns centros das funções de pertinência otimizados, conforme mostrado na Figura 9.

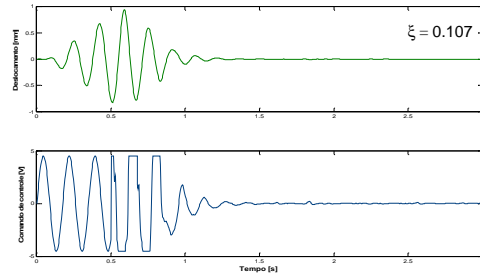


Figura 10 Deslocamento lateral e comando de controle para o sistema em malha fechada, com o controlador V5.

Observa-se na Figura 10, o bom comportamento do controlador, a despeito da base de regras ser incompleta. Verifica-se ainda neste caso uma alteração importante nos centros das funções de pertinência, especialmente da variação do erro. A alteração observada no centro da função de saída NP sugere uma baixa sensibilidade do sistema controlador-viga à variação do centro desta função de pertinência.

## 5 Caracterização do controle no domínio da frequência

Uma série de testes experimentais foram realizados com o propósito de avaliar o comportamento do controle no domínio da frequência. As Figuras 11 e 12 mostra os equipamentos utilizados nos testes.



Figura 11. Montagem da instrumentação da bancada da viga vibratória para caracterização dos controladores na frequência.

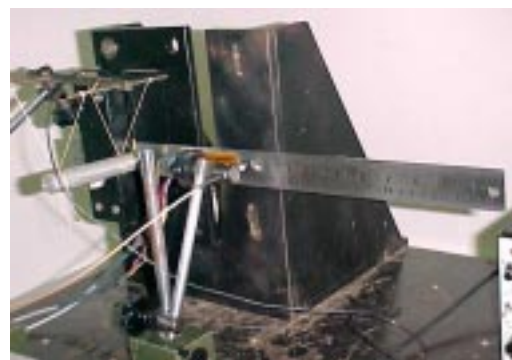


Figura 12. Detalhe do esquema da montagem da instrumentação da bancada da viga vibratória onde aparecem o sensor, o atuador e o pêndulo de impacto.



O sistema foi amostrado com um passo de 0,625 Hz, em uma banda de análise de 0- 500 Hz e utilizando janela retangular. Foram feitas avaliações da performance de todos os controladores no domínio da frequência, porém só serão mostrados os resultados obtidos com o controlador V2. No ensaio, a viga foi excitada com uma força impulsiva produzida pelo pêndulo de impacto. Esta mesma força é aplicada ao sistema livre e ao sistema controlado. Na Figura 13 a resposta em frequência do controlador V1 é comparado com a resposta do sistema livre.

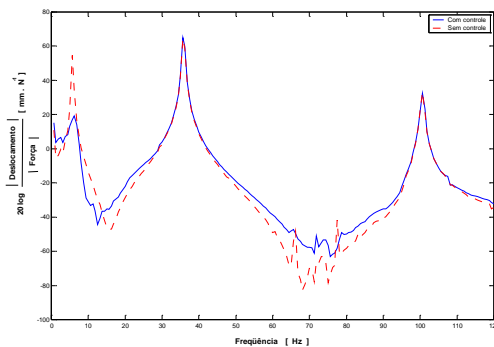


Figura 13 Resposta em frequência da viga livre e controlada.

Os gráficos revelam o forte amortecimento introduzido pelo controlador na região de baixa frequência e a uma influência muito pequena em alta, fato que está em concordância com os resultados obtidos no domínio do tempo e mostrados nos testes anteriores. A pouca influência do controlador em altas frequências se deve ao fato do controlador simplesmente não "enxergar" estas frequências, pois o sinal do sensor é filtrado em 10 Hz.

## 6 Conclusão e Desdobramentos

Este trabalho apresentou uma metodologia de projeto de controladores híbridos inteligentes, centrados na lógica fuzzy, nos algoritmos genéticos e em redes neurais artificiais

A metodologia proposta foi avaliada, numérica e experimentalmente no controle de vibrações de uma viga flexível engastada-livre.

Uma rede neural foi utilizada para modelar o comportamento dinâmico da planta, a partir de dados de entrada e saída. Para tanto utilizou-se o algoritmo backpropagation.

A otimização dos controladores fuzzy envolveu otimização genética, onde as variáveis dependentes foram modeladas por ponto flutuante, e os indivíduos (controladores fuzzy) experimentaram ao longo das gerações torneios seletivos e mutações.

Quanto ao controlador fuzzy, as informações demandadas pela metodologia proposta ao projetista são mínimas. Na estratégia utilizada definiu-se apenas o número de funções de pertinência das entradas e da saída e o intervalo de variações desses sinais. Admitiu-se ainda, que as funções de pertinência eram gaussianas na entrada e valores crisp na saída. O

algoritmo foi capaz de otimizar o conjunto de regras, os pesos de cada uma e ajustar os centros das funções de pertinência das entradas e os valores crisp da saída.

Pretende-se em trabalhos futuros testar a metodologia para sistemas mais complexos, com mais de uma entrada e uma saída e analisar a sensibilidade do procedimento proposto em relação aos parâmetros do controlador fuzzy.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pelos órgãos CAPES e CNPq.

## Referência Bibliográfica

- Banks, H.T., Smith, R.C., Wang, Y., 1996, "Smart Material Structures: Modeling, Estimation and Control", Wiley – Masson Research in Applied Mathematics Series.
- Holland J. H., 1992, Genetic Algorithms, Scientific America, Vol. 267, pp.66-72.
- Goldberg, D.E., 1989, Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning", Addison-Wesley Publishing Company, Inc. USA
- Mamdani, E.H. , 1974, "Applications of fuzzy algorithm for simple dynamic plant", Proceedings IEE 121(12), 1585-1588
- Teixeira, R.L. e Ribeiro, J. F., 2001, *Uma Metodologia de Projeto de Controladores Híbridos Inteligentes com aplicações no Controle Ativo de Vibrações Mecânicas*. Dissertação de Mestrado – UFU.
- Uhrig, R.E., Tsoukalas, *The approaches of Neuro-Fuzzy in Engineering, 1997.*
- Zadeh, L. A., 1965, *Fuzzy Sets, Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353.