



CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS DE UM ROTOR FLEXÍVEL UTILIZANDO CONTROLADORES *FUZZY*

Rafael Luís Teixeira

Laboratório de Sistemas Mecânicos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Cep 38400.089 - Uberlândia, MG, Brasil
rafael@mecanica.ufu.br

Valder Steffen Jr.

vsteffen@mecanica.ufu.br

José Francisco Ribeiro

jribeiro@mecanica.ufu.br

Patrick Magalhães Cardoso

patrick@mecanica.ufu.br

Resumo: *Este trabalho propõe o uso de controladores fuzzy aplicado ao controle ativo de vibrações de um rotor flexível. O controlador projetado é baseado na lógica fuzzy, o que permite trabalhar com sistemas complexos, não lineares, variantes no tempo e que dispensa o conhecimento preciso dos modelos matemáticos envolvidos. O rotor utilizado é composto de um eixo, três discos, dois mancais de rolamento e é controlado por atuadores eletromagnéticos. São feitos ensaios experimentais durante a operação do sistema, particularmente na passagem pela 1ª velocidade crítica. É realizada, ainda, uma comparação com o controlador clássico proporcional derivativo. Os resultados comprovam a potencialidade do controlador fuzzy proposto e abrem boas perspectivas de aplicação desses controladores em situações reais na indústria.*

Palavras-chave: *Controle Ativo de Vibrações, Rotores Flexíveis e Lógica Fuzzy.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o projeto de máquinas rotativas tais como turbinas, compressores, bombas, etc., requer rotores operando em altíssimas velocidades, o que acarreta o projeto de eixos cada vez mais esbeltos e flexíveis. A consequência desse fato é que, normalmente, esses rotores são supercríticos, provocando vibrações indesejáveis na passagem pelas velocidades críticas.

A literatura reporta vários métodos que permitem, aos rotores flexíveis, a passagem segura pelas velocidades críticas, tais como: (i) a mudança da rigidez do suporte do mancal, o que resulta na alteração das frequências críticas (Heinzman, 1980); (ii) o uso de mancais eletromagnéticos cujas forças externas são controladas em malha fechada (Ribeiro, 1995; Schweitzer e Ulbrich, 1980); (iii) a troca das características de amortecimento promovida pela supressão de pressão do filme de óleo (Burrows e Sahinkaya, 1984); (iv) a aplicação de forças externas de controle através de atuadores eletromagnéticos em malha fechada (Burrows e Sahinkaya, 1983); etc..

Surgiram, mais recentemente, os sistemas inteligentes baseados no uso de técnicas de inteligência artificial, como por exemplo: a lógica *fuzzy*, as redes neurais artificiais, os algoritmos genéticos (Teixeira, 2001; Uhrig e Tsoukalas, 1997).

Essas novas tecnologias são caracterizadas por uma certa tolerância à imprecisão e ambigüidades decorrentes de variações paramétricas, perturbações dinâmicas, alterações ambientais, ignorância dos modelos.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é propor um controlador *fuzzy* que minimize as vibrações de um rotor, permitindo ao mesmo operar na primeira velocidade crítica e passar por ela, até atingir a velocidade de trabalho. O controlador é avaliado experimentalmente no domínio do tempo. É feita também uma caracterização do controlador no domínio da frequência, onde uma comparação com um controlador proporcional derivativo (PD) é apresentada.

Para atender estes objetivos, esse trabalho está assim organizado: na seção 2 é apresentado o modelo da planta e de seus componentes; a seção 3 apresenta o algoritmo *fuzzy* de controle, na seção 4 são apresentados os resultados experimentais do controlador no domínio do tempo. Na seção 5 são comparados e caracterizados, no domínio da frequência, os controladores *fuzzy* e PD. Finalmente, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2. DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DA BANCADA DO ROTOR COM EIXO FLEXÍVEL

O sistema a ser avaliado neste trabalho é um rotor constituído de um eixo flexível [$\phi 10 \times 552$ mm], dois mancais e quatro discos (diâmetros de 150, 25, 90, 12 mm), conforme ilustrado na Fig.(1). A massa do conjunto rotor e discos é 4 Kg. O acionamento do rotor é feito por um motor de corrente contínua de 90 W de potência, capaz de proporcionar rotações de até 7000 rpm, através de um acoplamento flexível.

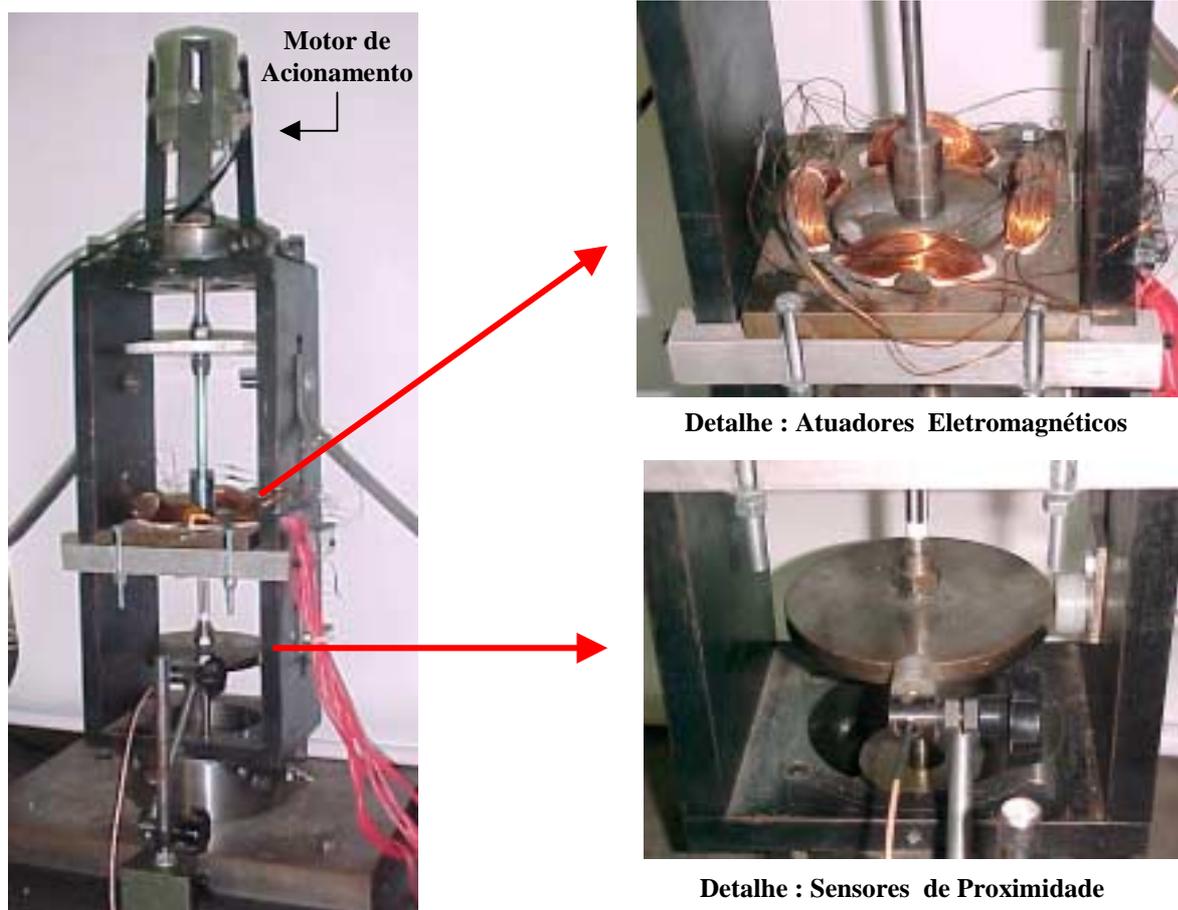


Figura 1: Bancada do Rotor Flexível Instrumentado.

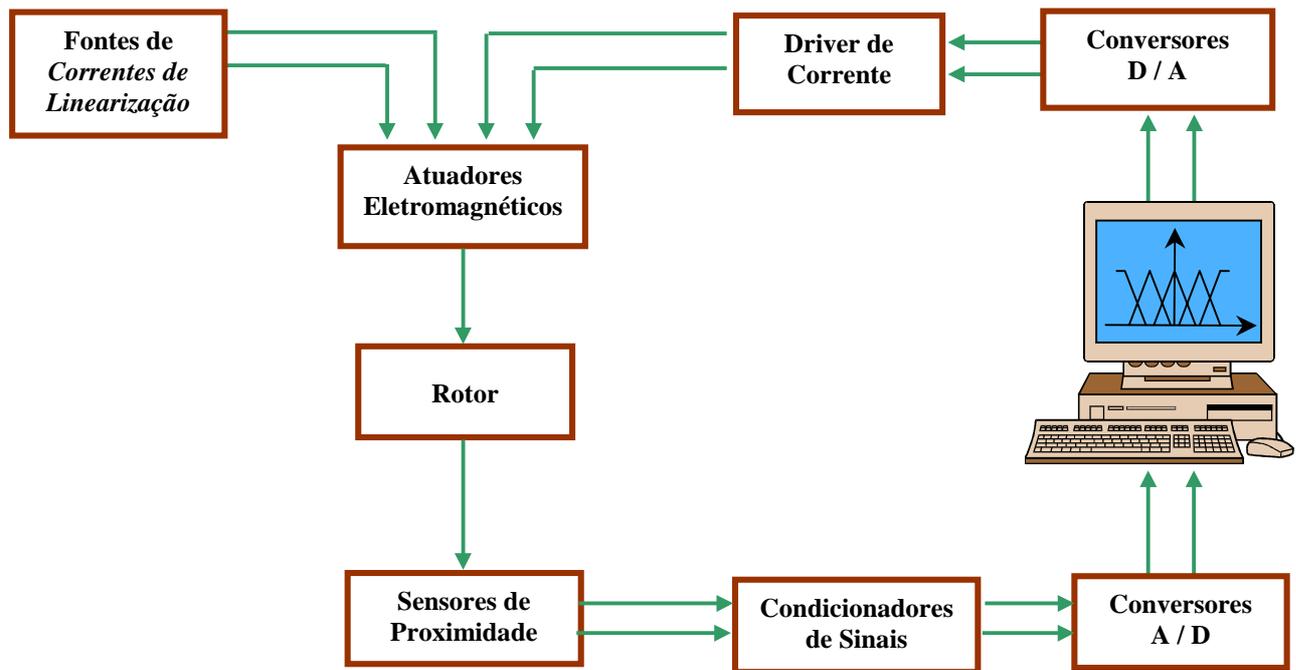


Figura 2: Diagrama esquemático do Rotor e seus componentes instrumentais.

O rotor é instrumentado com dois sensores de proximidade que geram informações dos deslocamentos do disco inferior nas duas direções. Estas informações são adquiridas, em tempo real, por uma placa de aquisição e usadas pelo controlador digital, implementado num microcomputador em linguagem C, para gerar as ações de comando. Após conversão D/A, os sinais de comando são enviados para um driver de corrente, de dois canais, que alimenta dois transdutores eletromagnéticos, cada qual numa das direções ortogonais x e y , conforme ilustra a Fig.(2).

Um dos grandes problemas em utilizar atuadores eletromagnéticos é a característica não linear que possuem (Lépore Neto e Steffen Jr., 1994). Para solucionar este problema, foi adotada uma configuração do enrolamento das espiras, de forma a evitar o efeito de não linearidade quando se trabalha com deslocamentos suficientemente pequenos (Abreu, 1998). Essa abordagem permitiu caracterizar o atuador como um transdutor de corrente elétrica em força mecânica cujo ganho é de 4,5 N/A.

O sensor de proximidade (DYMAC) detecta as posições do rotor e está posicionado no disco inferior. Trata-se de um transdutor linear do tipo deslocamento tensão e sua função de transferência é de 2 V/mm.

O driver de corrente foi projetado para apresentar, em baixas frequências [0-100 Hz], um ganho unitário: 1V/A.

Os mancais de rolamentos são apoiados em suportes de tecnil, axialmente simétricos, buscando uma configuração de mesma rigidez e amortecimentos pequenos nas duas direções.

3. ALGORITMO DE CONTROLE *FUZZY*

Em oposição à lógica clássica, onde as proposições assumem somente dois valores: falso (0) ou verdadeiro (1), a lógica *fuzzy* trata as proposições com diferentes graus de valores verdadeiros ou falsos. Em (Teixeira, 2001) é feito um apanhado da teoria dos conjuntos *fuzzy*.

A questão central dos controladores *fuzzy* é o método de inferência, que é construído e formulado por meio dos princípios da teoria dos conjuntos *fuzzy*. O método de inferência é baseado em um conjunto de regras se-então e de funções de pertinência que descrevem as variáveis do sistema. Para ilustrar, suponha o problema de controle de um rotor, conforme esquematizado na

Fig.(3), onde D é o deslocamento; V é a velocidade e F é a força magnética. O controlador *fuzzy* para esse caso é formulado considerando o deslocamento e a velocidade como entradas e a força resultante como saída. Para cada uma das entradas e saídas são definidas três variáveis linguísticas: Negativo (N), Zero (Z) e Positivo (P). Cada uma destas variáveis é representada por um conjunto *fuzzy* com função de pertinência triangular.

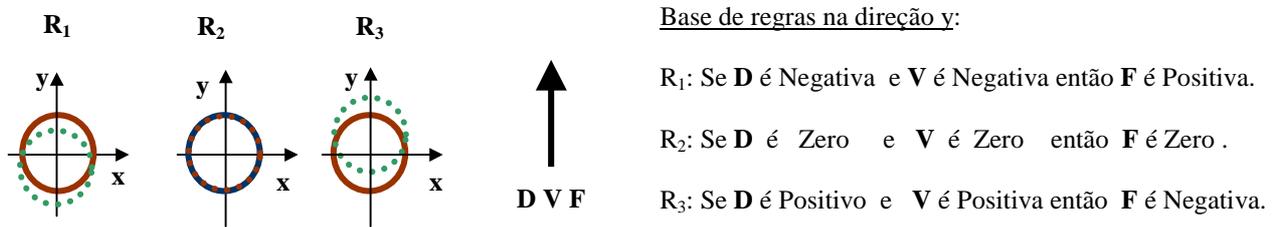


Figura 3 Desenho esquemático do movimento do rotor na direção y e base de regras.

A partir das três regras anunciadas é possível, graficamente, mostrar como o algoritmo *fuzzy* funciona quando o método de inferência usa o mínimo valor de pertinência (μ) e o cálculo da saída de controle (u) se faz pelo método Sugeno, conforme Takagi e Sugeno (1983).

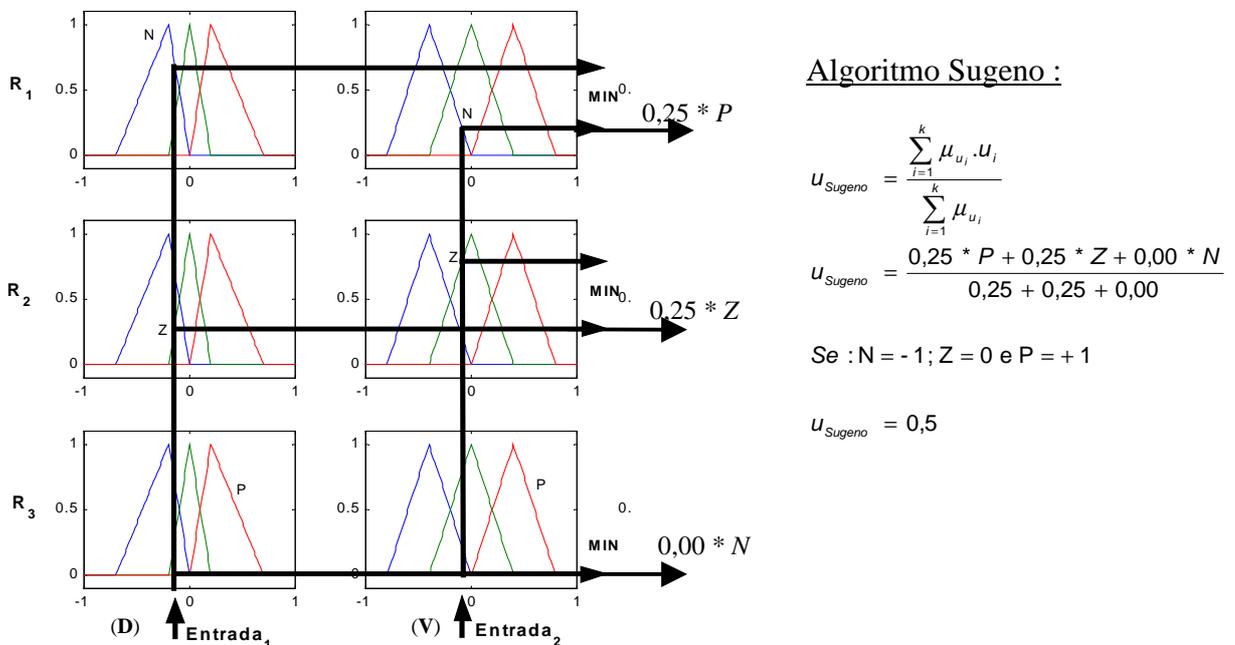


Figura 4. Exemplo representativo do algoritmo *fuzzy* para três regras.

Para entendimento, considere a primeira regra. Nela, as entradas são truncadas nas curvas N resultando em dois valores de pertinência. O menor desses (no caso $\mu_1=0,25$) é o valor de pertinência que irá multiplicar a saída constante da primeira regra, o valor de P. Este processo é repetido para todas as regras envolvidas. Após esta fase é aplicado o método de Sugeno correspondente ao cálculo do valor de controle da saída, conforme mostra a Fig.(4).

4. O CONTROLADOR FUZZY PROJETADO

No primeiro passo da construção do controlador *fuzzy* definiu-se as variáveis físicas de entrada e saída. Como variáveis de entrada adotou-se o erro: $E = X - X_{ref}$ e a sua derivada, e, para a saída do controlador, uma tensão que alimenta o driver de corrente do atuador eletromagnético. O mesmo controlador foi utilizado em ambas as direções, já que o rotor é simétrico. Uma vez escolhidas as variáveis de entrada e saída, definiu-se o universo do discurso de variação das mesmas, observando o comportamento das variáveis envolvidas durante ensaios experimentais. Em seguida, particionou-

se os universos do discurso das entradas e saídas em funções de pertinência gaussianas, conforme mostrado na Fig.(5). A base de regras, descrita na Fig.(6), é considerada como a última etapa de construção do controlador *fuzzy* e foi obtida a partir da intuição do projetista, após uma série de ensaios experimentais.

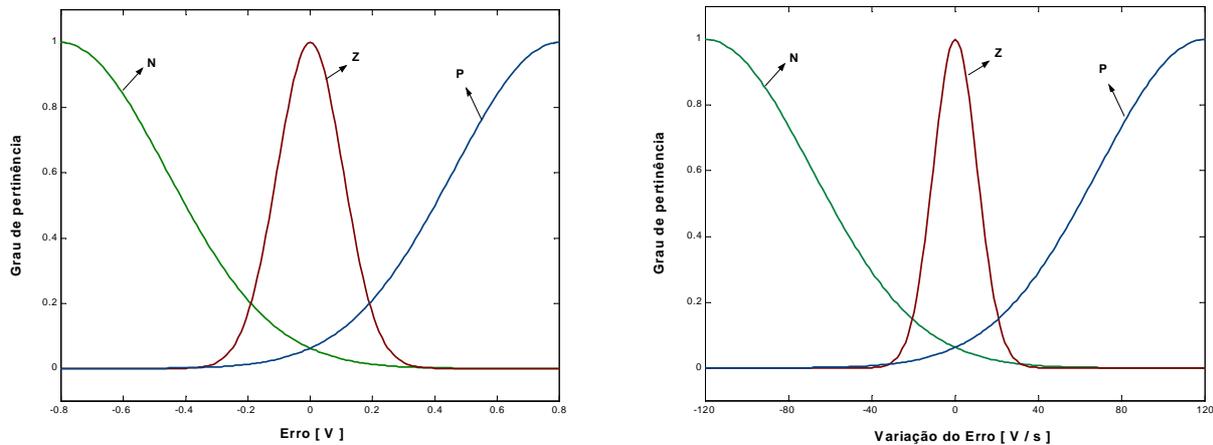


Figura 5. Partição *fuzzy* e universo do discurso das entradas e saídas.

erro Δ erro	N	Z	P
N	P { 1 }	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	N

▪ **Exemplo da Regra { 1 } :**

Se o erro é N e a Variação do erro é N

então $u = \mu * P$;

▪ **Valores Adotados :**

P= 1,346 ; Z= 0,0 e N = -1,346

Figura 6: Base de regras do controlador *fuzzy* proposto e alguns dos valores adotados.

5. RESULTADOS DO CONTROLADOR FUZZY NO DOMÍNIO DO TEMPO

Este ensaio consiste em elevar o rotor até sua primeira velocidade crítica, ou seja, 21,5 Hz (1290 rpm). Os sinais foram amostrados a 500 Hz.

A duração do ensaio foi de 20 segundos, conforme mostra a Fig.(7). Iniciou-se com o rotor sem ativação do controle e, aos 5 segundos, ativou-se o controlador *fuzzy*. É feita uma análise de 4,5 a 6,5 segundos, observando tanto os deslocamentos nas direções x e y, como os esforços de controle. Os deslocamentos reduziram em aproximadamente 90 % e também se percebe que o controle satura no início do transitório.

Outro gráfico clássico, quando se trata com rotores, é o da órbita do rotor, ou seja, o *locus* da resposta experimental durante esse ensaio com o controlador *fuzzy*, o que está retratado na Fig.(8).

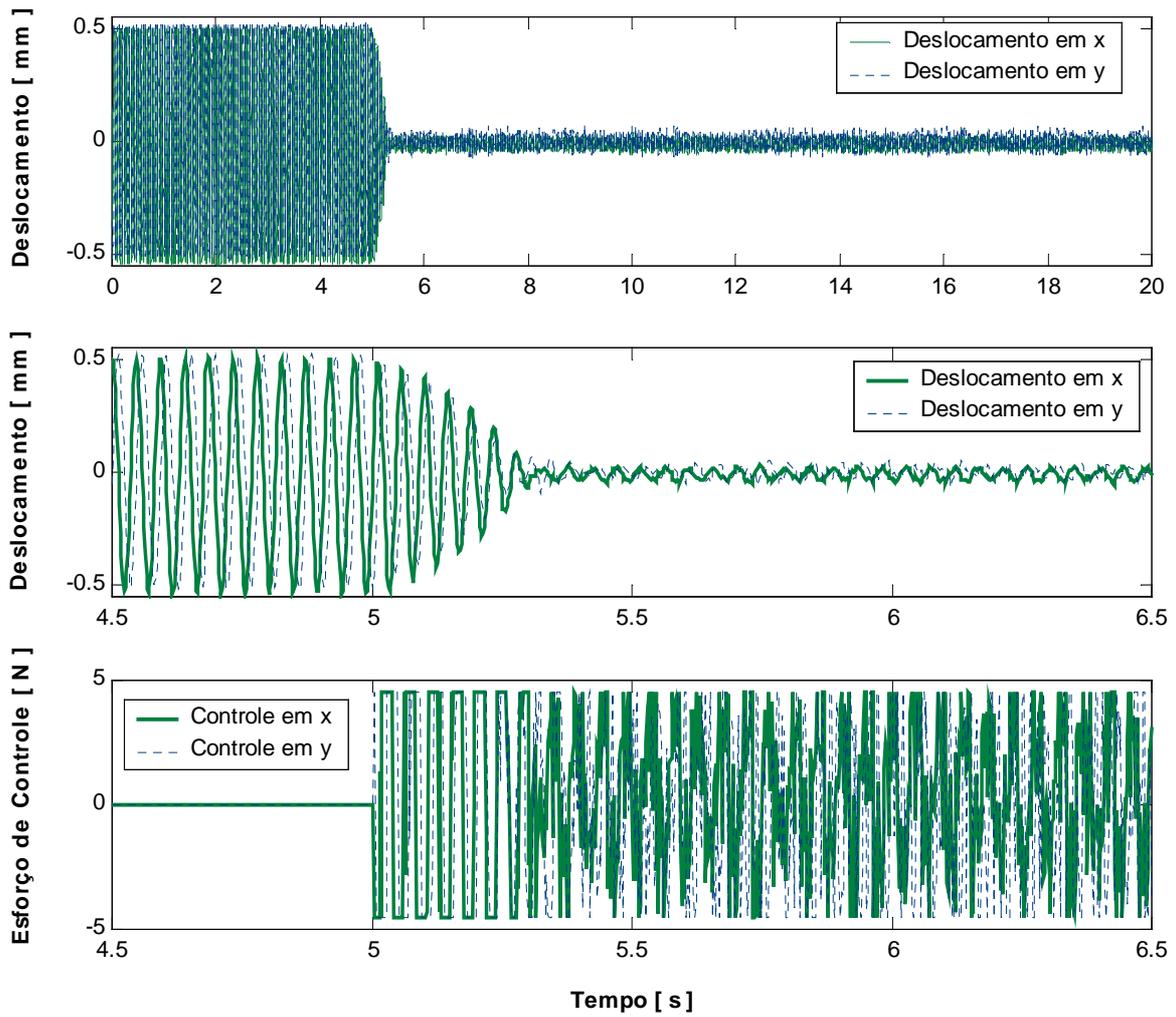


Figura 7. Resposta do deslocamento e do esforço de controle nas duas direções.

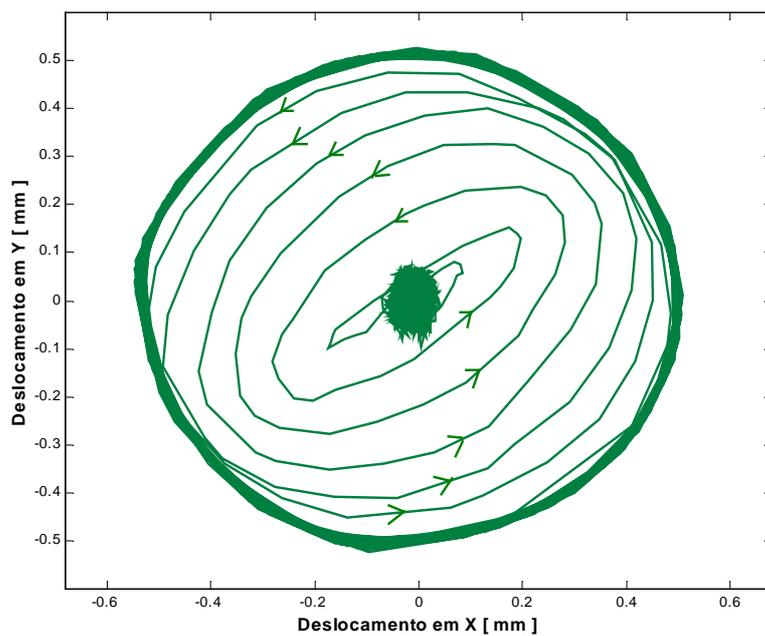


Figura 8. Órbita do Rotor.

6. CARACTERIZAÇÃO DOS CONTROLADORES NO DOMÍNIO FREQUÊNCIA

Este ensaio, de 35 segundos, buscou caracterizar o controlador durante a passagem pela 1ª velocidade crítica. Para tanto, o rotor foi acelerado até a rotação de 30 Hz (1800 rpm). Desligou-se a alimentação do rotor e adquiriram-se os dados até a rotação de 10 Hz (600 rpm) para três situações distintas: sistema livre, sistema com controlador *fuzzy* e, finalmente, com controlador PD, conforme ilustra Fig. (9).

Abreu (1998) projetou e construiu analogicamente um controlador PD para este sistema e, após transformação para o domínio discreto, pelo método do segurador de ordem zero, foram obtidas as equações correspondentes, Eq.(1).

$$D(z) = \frac{100 \cdot z - 97,41}{z - 0,1353} \quad \text{ou} \quad u(k) = 100 \cdot e(k) - 97,41 \cdot e(k-1) + 0,1353 \cdot u(k-1) \quad (1)$$

Esse controlador PD digital foi implementado em linguagem C e também avaliado experimentalmente. Para apresentação dos resultados, optou-se pelo gráfico em cascata (*waterfall*), ou seja, a cada banda de rotação de descida do rotor, calculou-se a densidade espectral de potência. Diferentemente da resposta ao desbalanceamento, esses resultados abrangem um universo maior de análise, ou seja, é possível avaliar o desempenho dos controladores na 2ª frequência crítica, em 75 Hz. Salienta-se que o comportamento em frequência do sistema em malha aberta, mostrado na Fig.(10), é diferente do comportamento em malha fechada, Fig.(11) e Fig.(12), pois a introdução dos controladores modificam as frequências críticas do sistema. Observa-se, ainda nas Fig.(11) e Fig.(12), que a excitação da 2ª frequência crítica é muito menor no controlador *fuzzy* que no controlador PD.

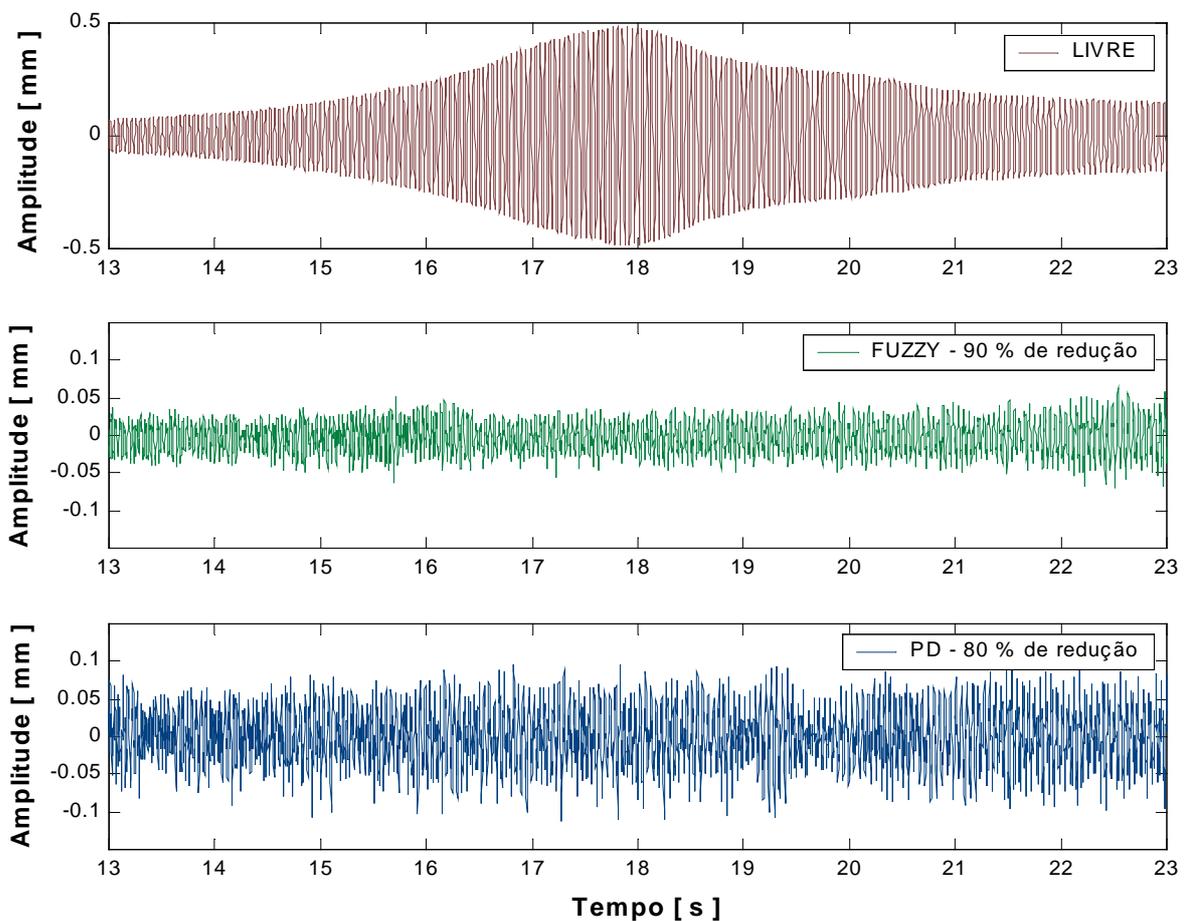


Figura 9. Resposta temporal do ensaio de desaceleração do rotor para o deslocamento em x, em 10s.

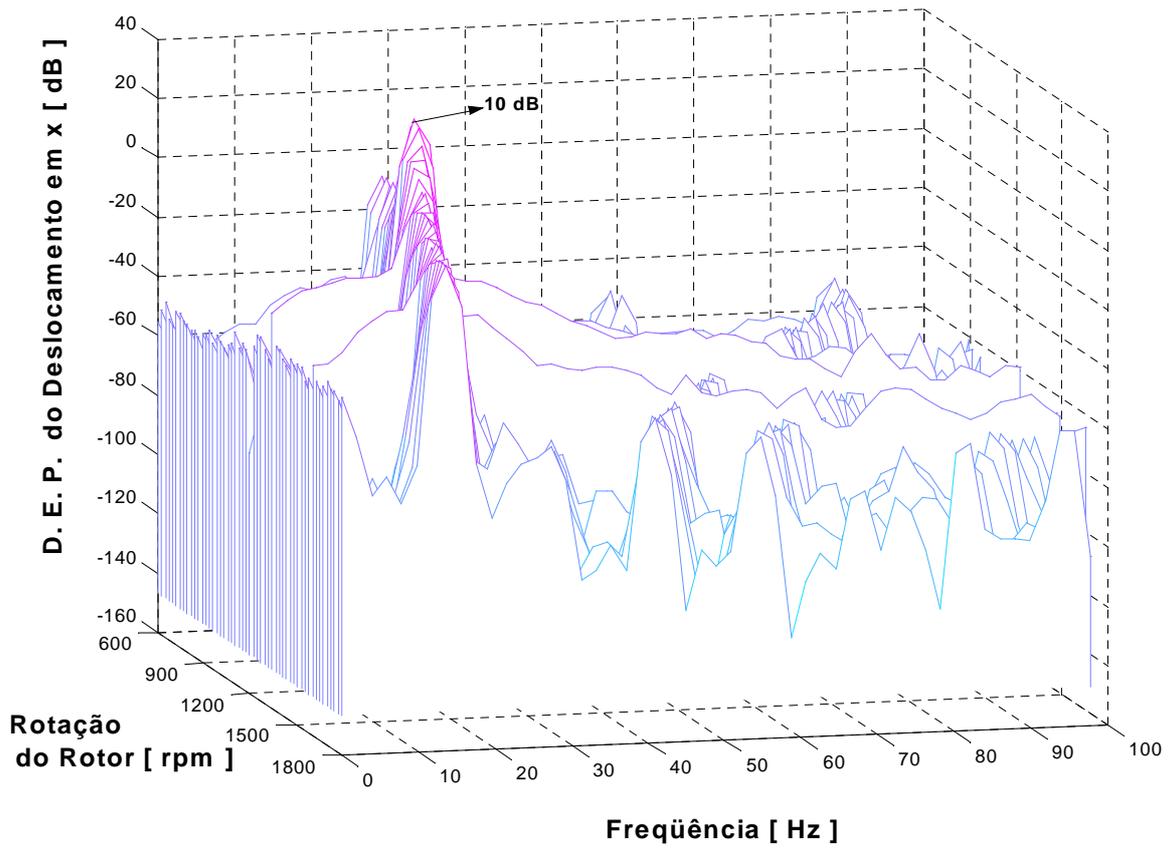


Figura 10. Resposta em frequência do sistema com controlador desativado (*waterfall*).

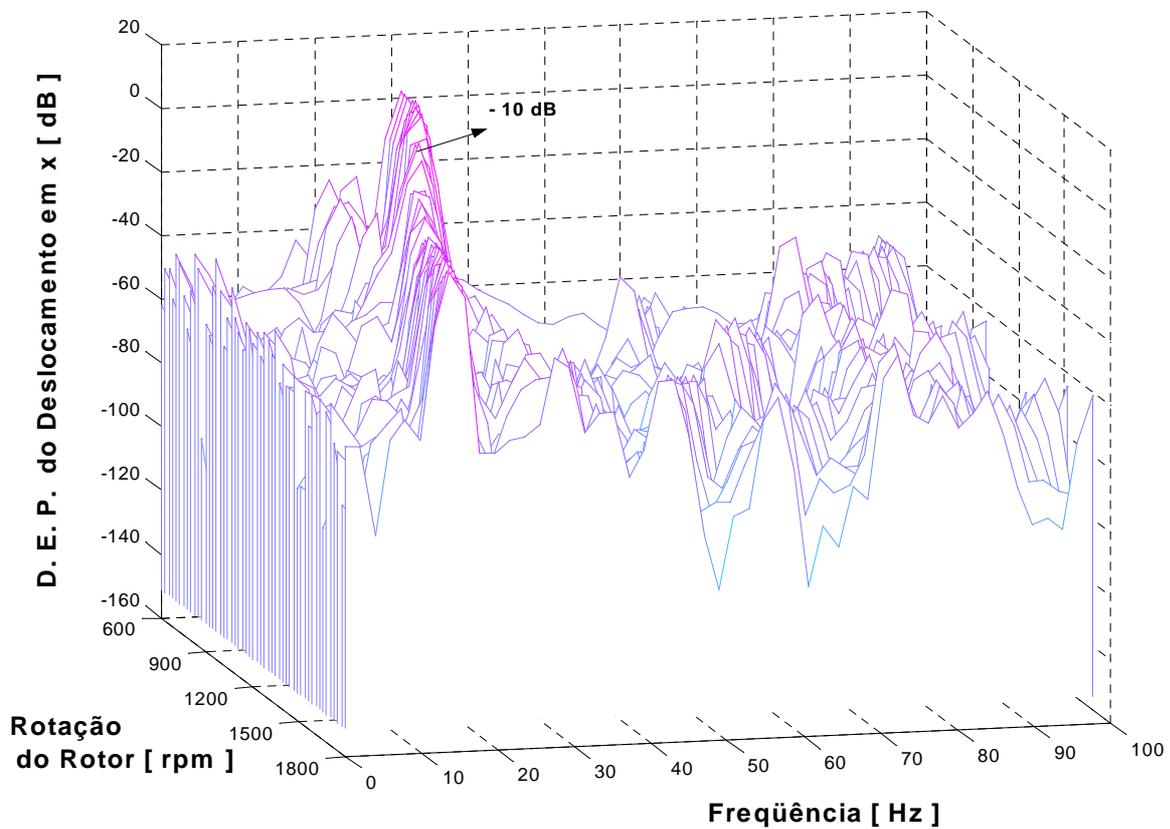


Figura 11. Resposta em frequência do sistema com controlador *fuzzy* (*waterfall*).

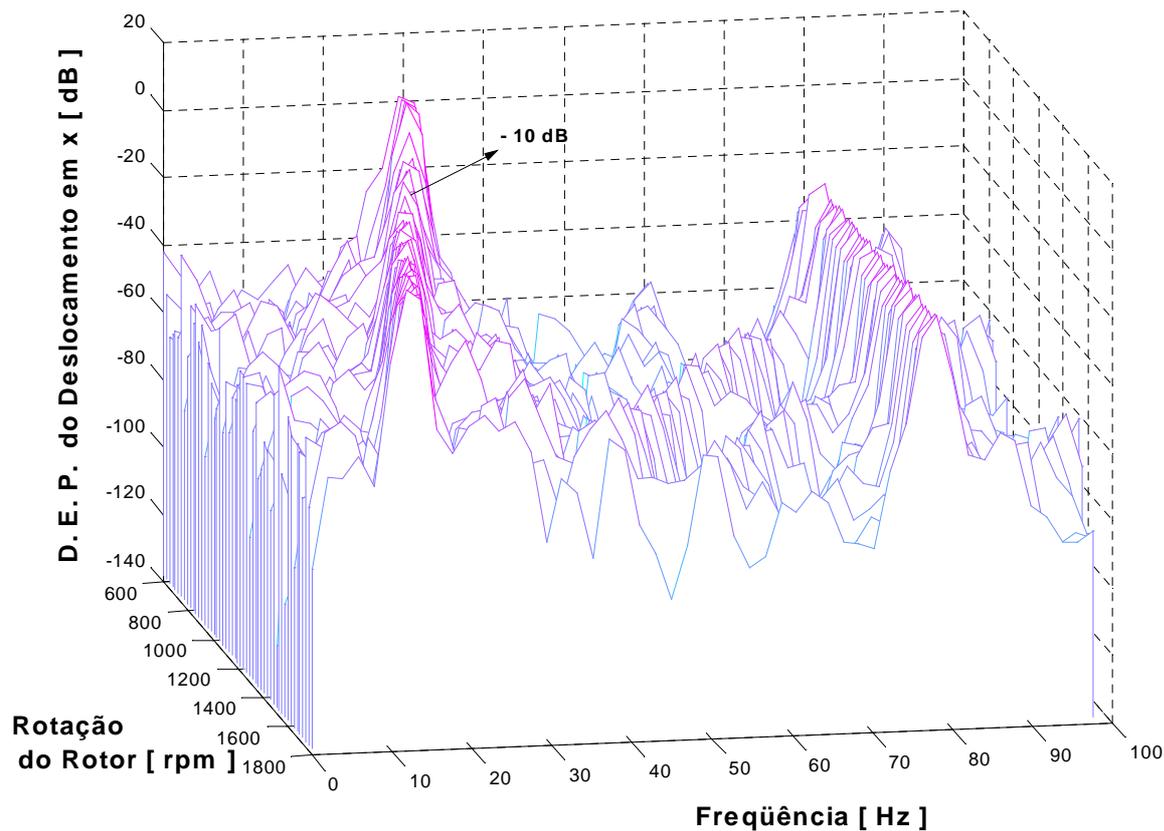


Figura 12. Resposta em frequência do sistema com controlador PD (*waterfall*).

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de projeto de controladores *fuzzy* voltados para o controle de vibrações mecânicas de um rotor flexível, tanto operando na 1ª velocidade crítica quanto passando por ela. Baseado em lógica *fuzzy*, o controlador proposto apresentou resultados promissores comprovados por ensaios realizados. A característica intuitiva inerente ao projeto *fuzzy* permitiu que se encontrasse um controlador *fuzzy* eficiente num tempo de desenvolvimento acentuadamente inferior quando comparado ao tempo envolvido no projeto do controlador PD.

Os resultados no domínio do tempo (seção 5) mostram que o controlador *fuzzy* permitiu ao rotor operar, continuamente, na sua 1ª velocidade crítica, com pouca saturação do esforço de controle e com uma redução de aproximadamente 90 % dos níveis de vibrações. Já para o controlador PD, a redução foi de 80 %. No ensaio de desaceleração do rotor (seção 6), o controlador *fuzzy* reduziu o pico em 20 dB. A mesma atenuação é percebida no controlador PD, porém o mesmo introduz uma excitação na 2ª frequência crítica. Isto somente foi possível detectar devido ao posicionamento dos sensores no disco inferior, ou seja, livre dos nós dos dois primeiros modos. Caso essa posição fosse no disco central (posição do atuador eletromagnético), ela funcionaria como um filtro natural da 2ª frequência crítica sendo um nó da estrutura em vibração.

Assim, a razão da escolha de um controlador *fuzzy* envolve vários aspectos, tais como a facilidade e rapidez de projeto, desde o início, em que se definem as variáveis e parâmetros do controlador *fuzzy*, até a sua implementação. Outro aspecto atraente é a independência de modelos matemáticos do sistema a ser controlado.

Como perspectiva futura, já em estudo, trabalha-se na otimização dos parâmetros do controlador *fuzzy* para atender um determinado índice de desempenho, através da teoria dos algoritmos genéticos. Uma análise a ser feita também é a da robustez dos controladores, frente à variações paramétricas na planta. Espera-se que um controlador *fuzzy*, devidamente projetado, seja mais eficiente do que um controlador clássico convencional.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio financeiro oferecido pelos órgãos de fomento CAPES e CNPq.

9. REFERÊNCIAS

- Abreu, G.L.C.M., 1998, “Controle Ativo de Vibrações Laterais em Rotores Flexíveis usando Atuadores Magnéticos ” . Dissertação de Mestrado – UFU.
- Burrows e Sahinkaya, 1983, “An adaptative Squeeze-Film Bearing”, ASME Journal of Tribology, Vol. 106, pp.145-151.
- Burrows e Sahinkaya, 1984, “ Vibration Control of Multimode Rotor-bearing System”, Proc. R. Soc. Lond., A 386, pp 77-94.
- Heinzman, J. D., 1980, “ The Implementation of Automatic vibration control in a High Speed Rotating Test Facility ”, Thesis, University of Virginia.
- Lépure, F.P., Steffen Jr., V., 1994, “A control force to reduce magnetically excited rotor vibration”, Materiaux Mecanique Electricite, vol. 404, pp. 90-93.
- Ribeiro, J. F., 1995, “Controle Robusto aplicado ao Problema de Vibrações em Rotores Flexíveis”, Tese de Doutorado, São José dos Campos.
- Schweitzer, G. e Ulbrich, H., 1980, “ Magnetic Bearing – a Novel Type of Suspension”, Second Intl. Conf. Vibration in Rotating Machinery I. Mech. E. Paper C237/80, pp 151-156.
- Takagi, T. and Sugeno, M. , 1983, “Derivation of fuzzy control rules from human operator’s control actions”, in proceeding of IFAC Symposium on Fuzzy Information, Knowledge, Representation and Decision Analysis, pages 55-60, Marseilles, France.
- Teixeira, R.L., 2001, “Uma Metodologia de Projeto de Controladores Híbridos Inteligentes com aplicações no Controle Ativo de Vibrações Mecânicas ”. Dissertação de Mestrado – UFU.
- Uhrig, R.E. and Tsoukalas, L.H. , 1997, “Fuzzy and Neural Approaches in Engineering”. John Wiley & Sons, New York, USA.

ACTIVE VIBRATION CONTROL OF A FLEXIBLE ROTOR USING FUZZY CONTROLLERS

Rafael Luís Teixeira

rafael@mecanica.ufu.br

Valder Steffen Jr.

vsteffen@mecanica.ufu.br

José Francisco Ribeiro

jribeiro@mecanica.ufu.br

Patrick Magalhães Cardoso

patrick@mecanica.ufu.br

***Abstract.** This work presents a fuzzy controller applied to the active vibration control of a flexible rotor. The designed controller is based on fuzzy logic, that is a modern control technique that allows to work with complex non-linear and time variant systems. This type of control does not need the precise mathematical model of the system to be controlled. The rotor is composed by a flexible shaft carrying, four rigid discs, supported in the ends by two bearings. The vibrations control is provided by electromagnetic actuators. Experimental tests were conducted with the rotor operating at its first critical speed and crossing it. A comparison was made with the case in which a PD controller was used. The results presented show the high potential of fuzzy controllers in rotordynamic applications, in real world rotating machinery.*

***Keywords.** Active Control of Vibration, Flexible Rotors and Fuzzy Logic.*