

CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÕES EM ROTORES FLEXÍVEIS UTILIZANDO ATUADORES ELETROMAGNÉTICOS

Edson Hideki Koroishi, koroishi@mecanica@ufu.br⁽¹⁾

Adriano Silva Borges, adrianosborges@uol.com.br⁽¹⁾

Valder Steffen Jr, vsteffen@mecanica.ufu.br⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) - Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC)- Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Av. João Naves de Ávila, 2121 - CAMPUS SANTA MÔNICA, Bloco 1M, UBERLÂNDIA - MG, CEP 38400-902

Resumo. O presente trabalho é dedicado ao controle ativo de vibrações de um rotor flexível utilizando atuadores eletromagnéticos. A eficiência da metodologia proposta foi estudada através de análises numéricas e experimentais. O projeto dos controladores foi realizado utilizando duas diferentes abordagens. A primeira abordagem envolve controladores projetados via Controle Ótimo, sendo que este foi desenvolvido utilizando desigualdades matriciais, técnica que facilita a inclusão de incertezas no projeto do controlador. Na segunda abordagem, os controladores foram desenvolvidos utilizando a Lógica Nebulosa (Fuzzy). Nestas duas abordagens os controladores foram projetados no domínio modal. A vantagem de se utilizar a metodologia de controle modal é que os controladores são projetados com base apenas em poucos modos de vibração do sistema, aspecto que, dentre suas vantagens, contribui para a redução do custo computacional. Neste tipo de controle, nem sempre os estados modais são acessíveis experimentalmente, exigindo, portanto, sua estimação. Com este propósito foram utilizados estimadores de Kalman (Filtro de Kalman), os quais apresentam como ponto positivo sua capacidade de estimação a partir de um sinal contendo ruído. Os resultados obtidos, numérico e experimentalmente, mostraram a eficiência da metodologia proposta.

Palavras chave: Controle Ativo de Vibrações, Atuador Eletromagnético, Rotor Flexível, Filtro de Kalman

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, uma das maiores preocupações na indústria tem sido o aumento da eficiência de seus equipamentos. Em termos de máquinas rotativas, a eficiência está diretamente relacionada com a sua velocidade de operação. Um dos métodos existentes para o aumento da velocidade de operação consiste na redução do peso, resultando rotores mais flexíveis. Segundo Simões (2006), o aumento da flexibilidade leva ao aumento do nível de vibração da máquina rotativa quando o sistema opera em uma velocidade perto de uma de suas velocidades críticas. O excesso de vibração em uma máquina rotativa compromete o seu rendimento, desgasta prematuramente os mancais e pode o levar até a uma falha catastrófica do equipamento. Diante de tal problema, técnicas de controle de vibração vêm sendo desenvolvidas a fim de garantir o funcionamento seguro e eficiente das máquinas rotativas. Tais técnicas de controle podem ser divididas em três categorias principais: Passivo, Semi-Ativo e Ativo.

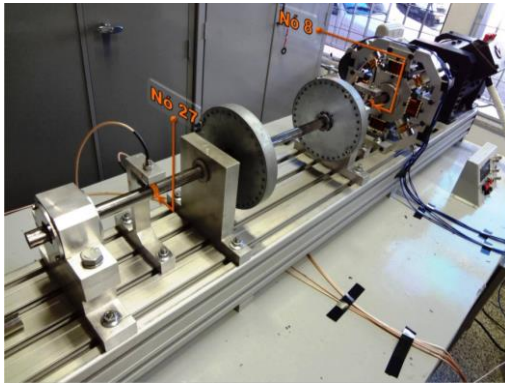
Atualmente, observa-se um aumento nas pesquisas em engenharia no desenvolvimento de novas técnicas de controle ativo de vibrações (AVC – do inglês Active Vibration Control). Estas pesquisas são impulsionadas pela necessidade de se dispor de estruturas leves associadas a um alto desempenho de operação, gerando menores custos operacionais e aumentando a competitividade (Bueno, 2007). Nas últimas décadas, as metodologias de AVC têm recebido contribuições significativas, sobretudo devido aos avanços no processamento digital de sinais, ao aparecimento de novos tipos de atuadores e novas metodologias de controle. O assunto é amplamente investigado em Der Hagopian et al (2010) e Juang et al (2001).

2. ROTOR FLEXÍVEL

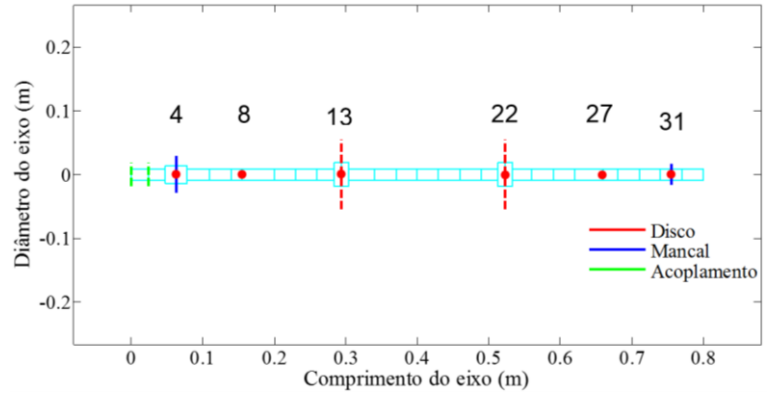
A Fig. (1a) apresenta a bancada experimental com o rotor flexível estudado (Koroishi, 2013). O modelo do rotor apresentado foi obtido utilizando 32 elementos de viga de Timoshenko, sendo este modelo discretizado apresentado pela Fig. (1b). Os discos D_1 e D_2 estão localizados nos nós 13 e 22, os mancais M_1 (Mancal Híbrido) e M_2 nos nós 4 e 31 e dois planos de medição (nós 8 e 27).

A equação do movimento de um rotor flexível foi determinada utilizando o Método dos Elementos Finitos e é escrita na forma matricial dada pela Eq. (1).

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C_b]\dot{\{x(t)\}} + [C_g]\{\dot{x}(t)\} + [K] + \phi[K_{st}]\{x(t)\} = \{F_w(t)\} + \{F_{AEM}(t)\} \quad (1)$$



(a)



(b)

Figura 1. Rotor flexível: (a) Bancada experimental. (b) Modelo discretizado.

As propriedades do rotor são apresentadas na Tab. (1).

Tabela 1. Propriedades físicas do sistema rotor-mancal.

Rotor		Mancal	
Propriedade	Valor	Propriedade	Valor
Massa do eixo (kg)	4,1481	k_{x1} (N/m)	$7,73 \times 10^5$
Massa do disco D_1 (kg)	2,6495	k_{z1} (N/m)	$1,13 \times 10^5$
Massa do disco D_2 (kg)	2,6495	k_{x2} (N/m)	$5,51 \times 10^8$
Espessura do disco D_1 (m)	0,1000	k_{z2} (N/m)	$7,34 \times 10^8$
Espessura do disco D_2 (m)	0,1000	C_{x1} (N.s/m)	5,7876
Diâmetro do eixo (m)	0,0290	C_{z1} (N.s/m)	12,6001
Módulo de Young (GN/m ²)	205	C_{x2} (N.s/m)	97,0231
Densidade (Kg/m ³)	7850	C_{z2} (N.s/m)	77,8510
Coefficiente de Poisson	0,3		

3. ATUADOR ELETROMAGNÉTICO

O atuador eletromagnético (AEM) é utilizado para aplicar força de controle sobre o rotor flexível, a qual é dada pela Eq. (2) (Morais et al, 2012).

$$F_{EMA} = \frac{N^2 I^2 \mu_0 a f}{2 \left((e + \delta) + \frac{b + c + d - 2a}{\mu_r} \right)^2} \quad (2)$$

Os parâmetros geométricos que definem o AEM (a , b , c , d e f) são apresentados na Fig (2). μ_0 e μ_r são a permeabilidade magnética no vácuo e a permeabilidade relativa do material. O entreferro é dado por e e δ é o entreferro devido a vibração do rotor na posição do AEM.

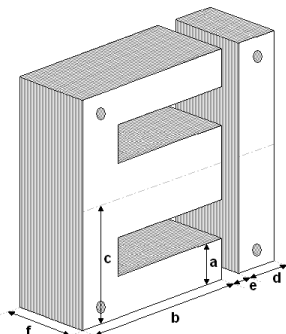


Figure 2. Circuito ferromagnético.

Tabela 2. Parâmetros do AEM.

μ_0 (H/m)	$1,26 \times 10^{-06}$
μ_r	700
N (espiras)	250
a (mm)	9,50
b (mm)	38,0
c (mm)	28,5
d (mm)	9,50
f (mm)	22,5
e (mm)	0,5

Quatro AEMs são usados no sistema, dois para cada direção de controle (x e z). Os AEMs aplicam somente força de atração e cada atuador age separadamente. A Fig. (3a) apresenta o modelo do mancal híbrido (mancal contendo os quatro AEMs) e a Fig. (3b) apresenta o esquema do arranjo do mancal híbrido.

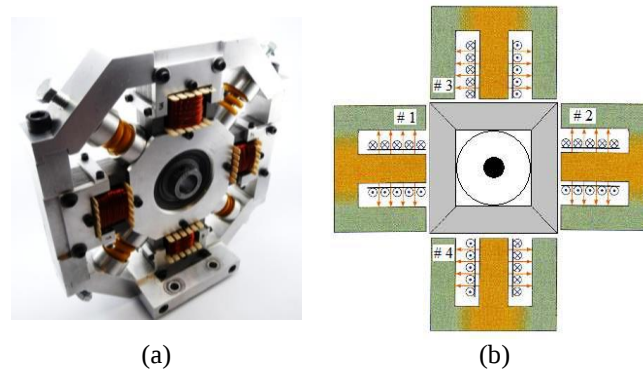


Figura 3. (a) Mancal híbrido. (b) Esquema dos AEMs.

4. SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle utilizado é apresentado na Fig. (4). A vantagem de utilizar controle ativo modal é que esta técnica é mais eficiente em aplicações de estruturas flexíveis, exigindo um número reduzido de sensores e atuadores. O estimador é responsável pela determinação dos estados modais utilizados pelos controladores. O Estimador de Kalman tem a vantagem de realizar a estimação dos estados utilizando sinais contaminados por ruídos.

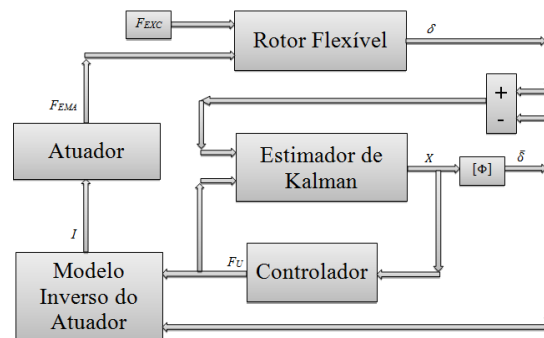


Figura 4. Sistema de Controle.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Os resultados apresentados pelas Figs. (5) e (6) ilustram a resposta do sistema (numérica e experimental) para o rotor em regime permanente, a uma rotação de 1600rpm.

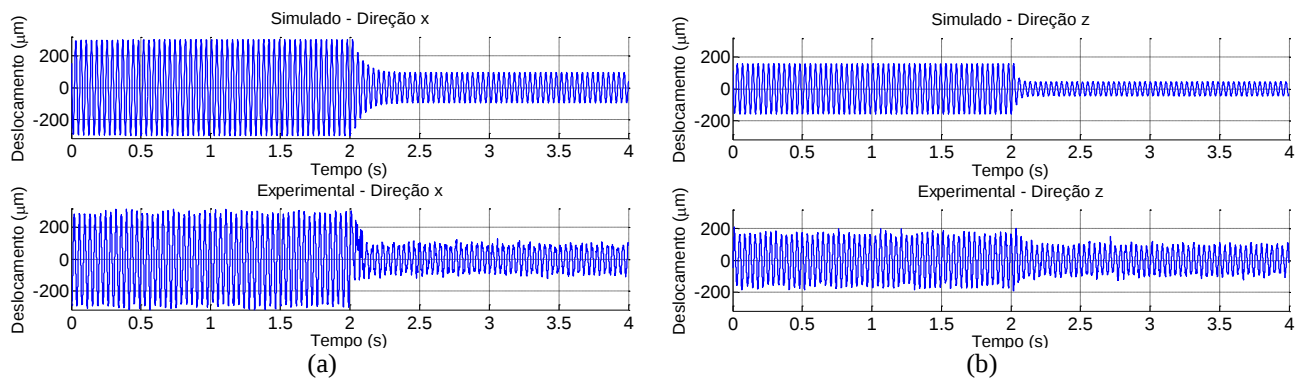


Figura 5. Resposta ao desbalanceamento no nó 27 (Controle Ótimo): (a) Direção x. (b) Direção z.

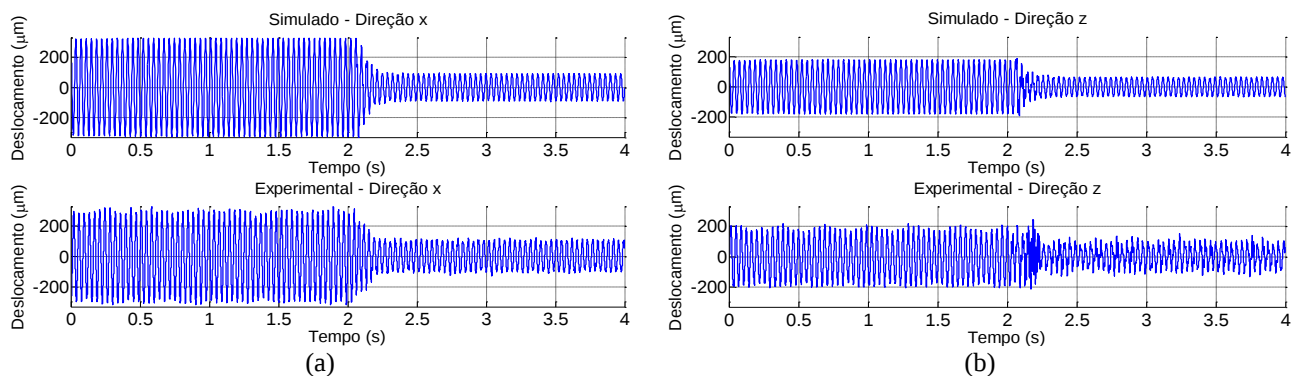


Figura 6. Resposta ao desbalanceamento no nó 27 (Lógica Fuzzy): (a) Direção x. (b) Direção z.

Das Figs. (5) e (6), observa-se que a resposta do sistema foi atenuada com o acionamento do sistema de controle tanto utilizando o Controle Ótimo como a Lógica Fuzzy. O grau de redução da resposta (pico a pico) do sistema é apresentado na Tab. (3). Através desta tabela é possível observar que melhores resultados foram obtidos utilizando o Controle Ótimo.

Tabela 3. Redução da Resposta - Resposta ao desbalanceamento (Regime Permanente).

	Pico a pico (μm)		Redução na Resposta (%)	
	Direção x	Direção z	Direção x	Direção z
A	609,80	395,90	-	-
Controle Ótimo	173,15	183,72	71,62	47,39
Fuzzy Modal	219,03	217,47	64,08	45,07

6. CONCLUSÕES

De uma forma geral, os resultados obtidos através deste trabalho foram bastante significativos. Considera-se que ficou demonstrado grande potencial para o uso de atuadores eletromagnéticos em máquinas rotativas, particularmente quando se considera os chamados rotores inteligentes, ou seja, aqueles que são capazes de avaliar seu comportamento dinâmico e impor forças de controle para manter seu funcionamento suave e seguro sempre que necessário, e tudo isso de maneira automática.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da FAPEMIG, CNPq and CAPES para este trabalho, através do INCT-EIE. Os autores também agradecem pelo apoio do acordo CAPES-COFECUB (Project Nb. 673/2010).

8. REFERÊNCIAS

- Bueno, D. D., “Controle Ativo de Vibrações e Localização Ótima de Sensores e Atuadores Piezelétricos”, Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.
- Der Hagopian, Mahfoud, J., “Electromagnetic actuator design for the control” of light structures. Smart Structures and Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 29-38, 2010.
- Juang, J., Phan, Q., “Identification and Control of Mechanical System”, Cambridge University Press, ISBN 0521783550, 2001.
- Koroishi, E. H., “Controle de Vibrações em Máquinas Rotativas utilizando Atuadores Eletromagnéticos”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 225p, 2013.
- Morais, T. S., Steffen Jr, V., Mahfoud, J., Control of the Breathing Mechanism of a cracked rotor by using electromagnetic actuator: numerical study. Latin American Journal of Solids and Structures (Impresso), v. 9, pp. 581-596, 2012.
- Simões, R. C., Der Hagopian, J., Mahfoud, J., Steffen Jr, V., Modal Active Vibration Control of a Rotor Using Piezoelectric Stack Actuators. Journal of Vibration and Control, v. 13, pp. 45-64, 2007.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.