

CARACTERIZAÇÃO DE ATUADOR ELETROMAGNÉTICO APLICADO NO CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÕES EM MÁQUINAS ROTATIVAS

Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹

Lucas Altamirando de Andrade da Rocha, lucasaarocha@doutorado.ufu.br²

Valder Steffen Jr, vsteffen@mecanica.ufu.br²

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Cornélio Procópio, Av Alberto Carazzai 1640, Cornélio Procópio, MG, Brasil, CEP 86300-000

² Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – Faculdade de Engenharia Mecânica - Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila 2121, Bloco 1M, Uberlândia, MG, Brazil, CEP 38400-902

Resumo: Uma das principais etapas no projeto de um sistema mecânico consiste na obtenção de seu modelo matemático. Este deve ser o mais representativo possível, i.e, deve contemplar o comportamento do sistema em estudo o mais próximo possível da realidade. Diante disto, o presente trabalho tem por objetivo a modelagem e caracterização de atuadores eletromagnéticos utilizados para o controle ativo de vibrações em máquinas rotativas. O atuador eletromagnético é modelado de acordo com seus parâmetros geométricos e com as propriedades do material que compõe o seu núcleo. Normalmente, o núcleo de um atuador eletromagnético é composto de material ferromagnético cuja permeabilidade relativa pode variar de acordo com a composição deste material, assim como a estrutura do atuador utilizado. Assim, este parâmetro deve ser determinado por meio de processos de identificação. Neste trabalho, a identificação foi feita pelo processo de otimização com o objetivo de minimizar a diferença entre os dados experimentais e os simulados computacionalmente. A técnica de otimização utilizada foi a Otimização por Enxame de Partículas. Obtido o modelo dos atuadores eletromagnéticos, estes foram utilizados no controle ativo de um rotor flexível, sendo a eficiência do controle analisada tanto numérico como experimentalmente. Os resultados obtidos apontam para o sucesso da metodologia proposta.

Palavras-chave: Atuador Eletromagnético, Controle Ativo de Vibrações, Máquinas Rotativas, Otimização por Enxame de Partículas.

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 (2007), 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 levar o sistema 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.

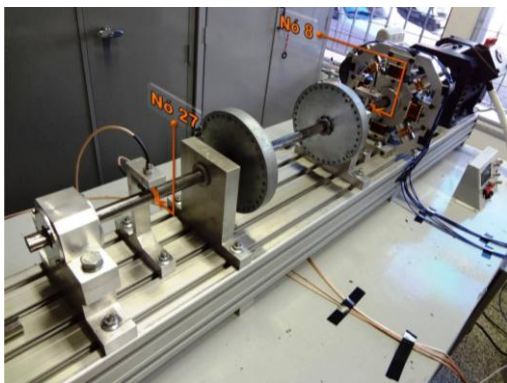
Atualmente, observa-se um aumento nas pesquisas em engenharia relacionadas ao desenvolvimento de novas técnicas de controle ativo de vibrações (AVC – do inglês *Active Vibration Control*). Estas pesquisas são impulsionadas pela necessidade de se dispor de estruturas leves associadas a um alto desempenho 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), Fuller *et al* (1996), e Juang *et al* (2001).

2. ROTOR FLEXÍVEL

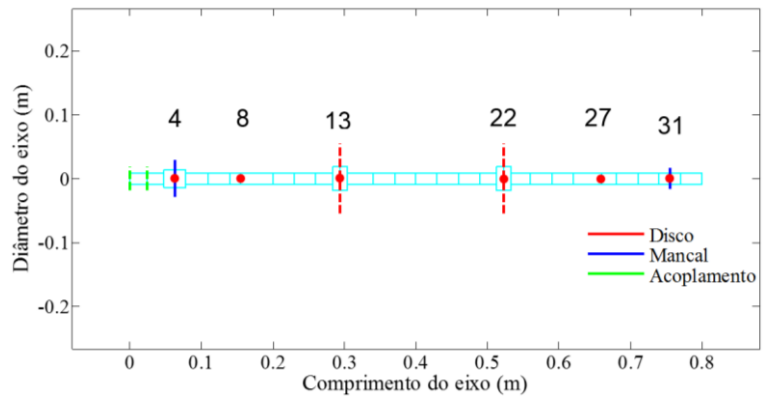
A Fig. (1a) apresenta a bancada experimental com o rotor flexível estudado (Koroishi, 2013). O modelo do rotor apresentado foi obtido utilizando 32 elementos de viga de Timoshenko, sendo este modelo discretizado mostrado na Fig. (1b). Os discos D_1 e D_2 estão localizados nos nós 13 e 22, os mancais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

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



(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		

O mancal híbrido é composto de 4 atuadores eletromagnéticos, dois para cada direção de controle (x e z). Os AEMs aplicam somente força de atração e cada atuador age separadamente. A Fig. (2a) apresenta o modelo do mancal híbrido (mancal contendo os quatro AEMs).

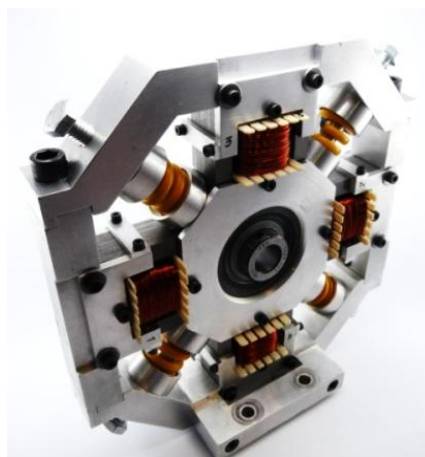


Figura 2. Mancal híbrido (Koroishi *et al*, 2014).

3. ATUADOR ELETROMAGNÉTICO

Morais *et al* (2013) apresentaram uma metodologia para a obtenção do modelo matemático do atuador eletromagnético (AEM). Segundo os autores, a força gerada pelo AEM pode ser escrita em função de seus parâmetros

geométricos, propriedades físicas do núcleo, entreferro e corrente elétrica. Desta forma, a força eletromagnética é da forma:

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

na qual, a, b, c, d, f são parâmetros geométricos, N é o número de espiras, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, δ é o deslocamento, I é a corrente elétrica e μ_r é a permeabilidade relativa do material ferromagnético.

A Fig. (3) apresenta o AEM e o modelo deste tipo de atuador através do qual é possível visualizar os parâmetros geométricos.

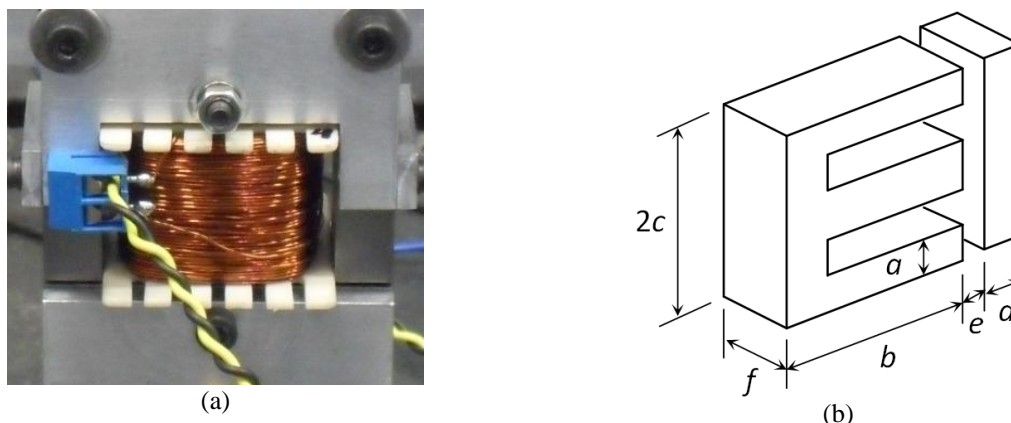


Figura 3. Atuador Eletromagnético: (a) Real e (b) Modelo esquemático.

A Tab. (2) apresenta os parâmetros físicos e geométricos do AEM.

Tabela 2. Parâmetros do núcleo e da bobina.

μ_0 (H/m)	$4\pi 10^{-7}$
N (espiras)	250
a (mm)	9,5
b (mm)	38
c (mm)	28,5
d (mm)	9,5
f (mm)	22,5

Observando os dados da Tab. (1) e a equação da força eletromagnética, observa-se que falta determinar a corrente elétrica (I), o gap (e) e a permeabilidade relativa (μ_r).

A corrente elétrica é determinada pela planta de controle e, desta forma, ela é obtida de acordo com a solicitação do sistema; o gap, por sua vez, é um parâmetro mensurável diretamente na bancada de testes.

A permeabilidade relativa é uma propriedade intrínseca do material ferromagnético utilizado no núcleo do atuador. No entanto, seu valor pode variar devido à sua composição e, diante disto, este valor deve ser determinado (Morais *et al*, 2013). Diferentemente de contribuições anteriores, no presente trabalho a permeabilidade relativa foi determinada utilizando uma técnica de otimização, a saber, a heurística denominada como otimização por Enxame de Partículas. Este procedimento foi o adotado primeiramente na análise estática apresentada na seção 3.1. Por fim foi realizada uma análise dinâmica, sendo esta apresentada na seção 3.2.

3.1. Análise Estática

A Fig. (4) apresenta o aparato experimental utilizado nesta análise estática.

Neste experimento, a fonte de alimentação foi utilizada para alimentar o atuador. A força gerada pelo atuador foi medida pela célula de carga estática a qual fornecia o valor na forma de tensão. Desta forma, um multímetro foi usado para medir a corrente elétrica que entrava no atuador, e o outro multímetro era usado para medir a tensão observada pela célula de carga. Daí, conhecendo-se a sensibilidade da célula, foi possível determinar a força gerada.

Utilizando essa força determinada experimentalmente, foi resolvido um problema inverso usando um processo de otimização no qual a técnica escolhida foi a Otimização por Enxame de Partículas (PSO – do inglês *Particle Swam*

Optimization), sendo o algoritmo avaliado 100 vezes, para verificar inclusive a sensibilidade do otimizador neste processo.

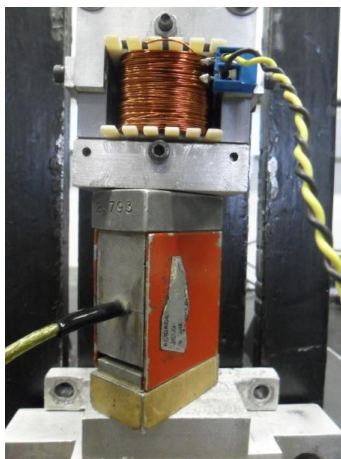


Figura 4. Arranjo experimental utilizado na análise estática.

A Tab (3) apresenta os parâmetros utilizados na otimização.

Tabela 3. Espaço de projeto e função objetivo utilizados.

Atuador	Espaço de Projeto	Função Objetivo
1	$300 \leq \mu_r \leq 1500$	$FO = \ F_{exp} - F_{num}\ $
2		
3		
4		

A Fig. (5) apresenta os *boxplots* correspondentes para os resultados obtidos.

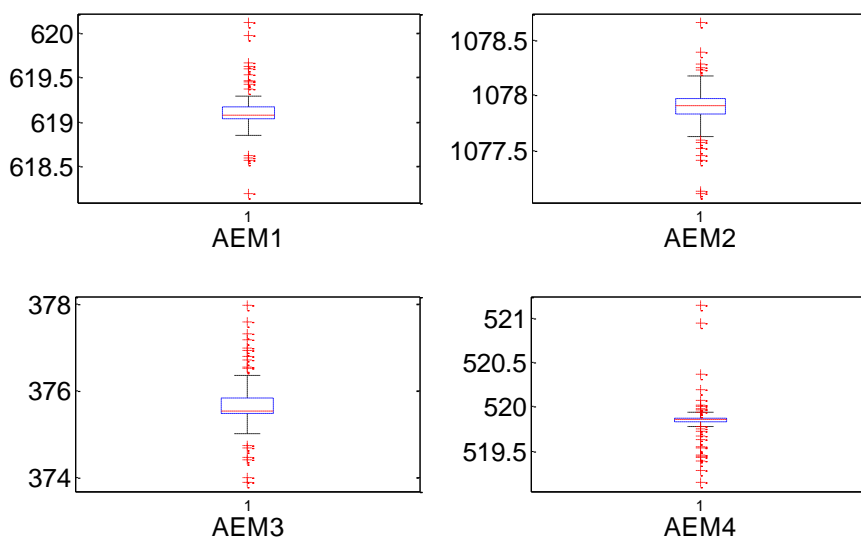


Figura 5. Distribuição dos valores encontrados para a permeabilidade para cada atuador.

Analisando o gráfico apresentado pela Fig. (5), observa-se que no processo de otimização realizado para encontrar os valores da permeabilidade relativa, os valores encontrados apresentaram pequena dispersão, considerando que a otimização foi feita 100 vezes para cada atuador. A partir destes resultados, foram adotados os seguintes valores para μ_r (Tab. (4)):

Tabela 4. Permeabilidade relativa.

Atuador	μ_r
1	619,03
2	1078,20
3	375,56
4	519,28

As forças eletromagnéticas obtidas numérica e experimentalmente são apresentadas na Fig. (6).

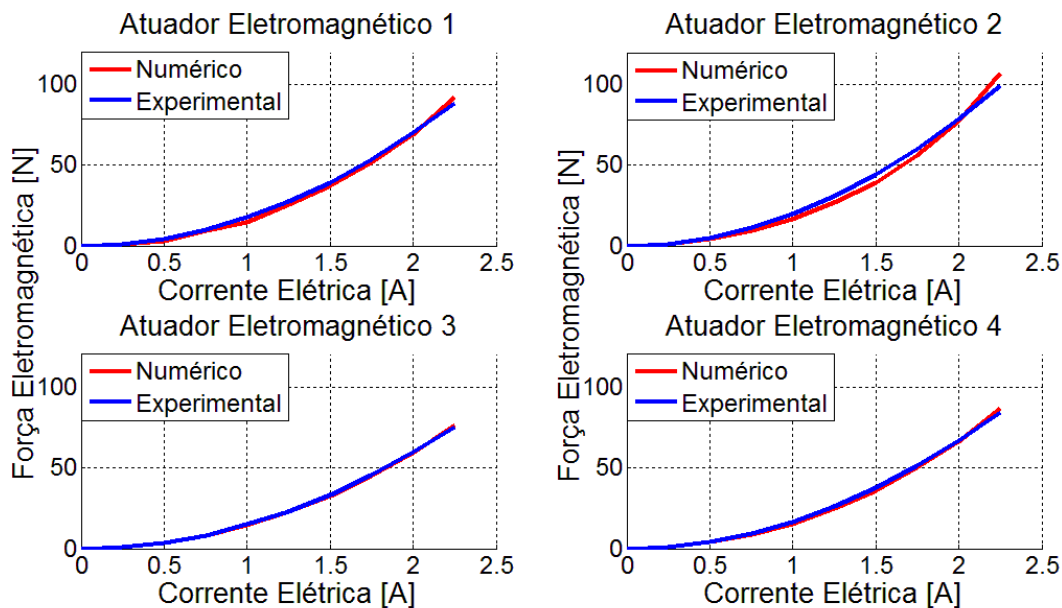


Figura 6. Comparação das forças eletromagnéticas: Numérica e Experimental.

Analisando os gráficos da Fig. (6) observa-se a proximidade das forças obtidas numérica e experimentalmente, revelando a validade do modelo utilizado para o atuador eletromagnético.

3.2. Análise Dinâmica

Como os atuadores eletromagnéticos projetados serão utilizados para atender a carregamentos dinâmicos, foi realizada uma análise dinâmica dos AEMs e, para isto, foi construído um aparato experimental conforme apresentado na Fig. (7).

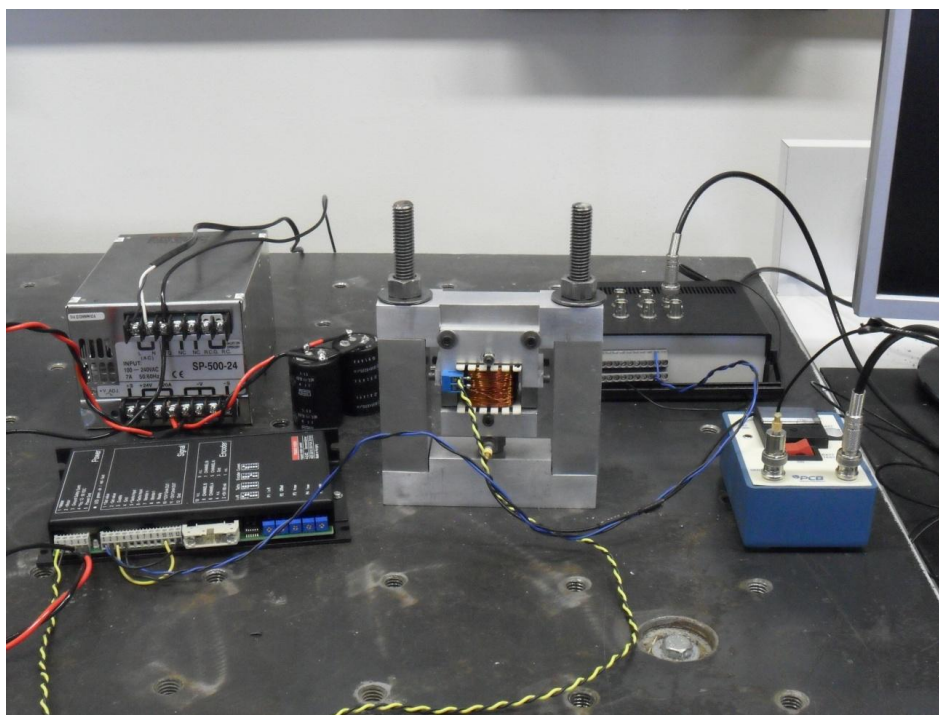


Figura 7. Estrutura contendo o atuador eletromagnético.

Nesta etapa foram consideradas duas situações: (a) Entrada tipo dente de serra (com amplitude de 0 a 3,2A em 0,1s) e (b) Entrada tipo meia onda (com amplitude 3,2A e frequência de 20Hz). A Fig. (8) apresenta os dois casos analisados.

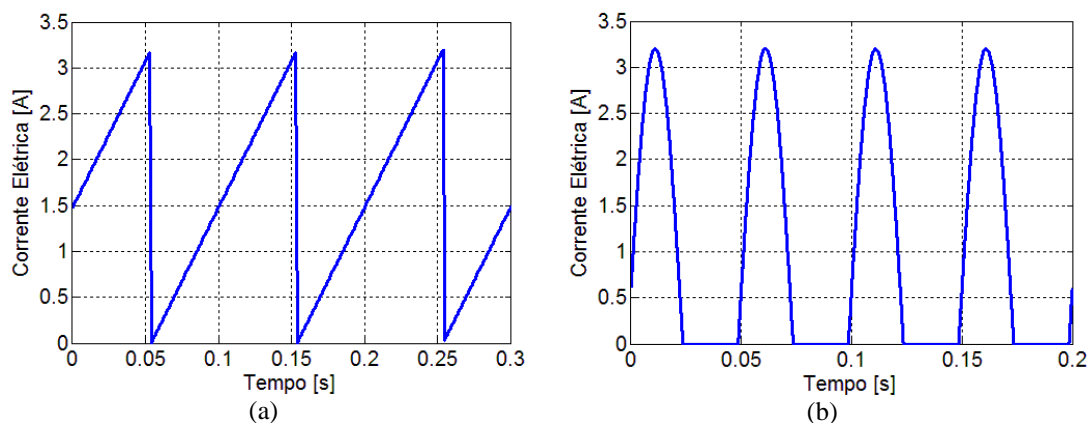


Figura 8. Corrente elétrica utilizada na análise dinâmica: (a) Dente de serra e (b) Meia onda.

As Figs. (9) e (10) apresentam os resultados obtidos considerando, respectivamente, as entradas tipo dente de serra e tipo meia onda.

Analisando os gráficos das Figs. (9) e (10) é possível observar a boa correspondência entre as forças obtidas numérica e experimentalmente. Devido à proximidade apresentada pelas curvas, pode-se dizer que o modelo ajustado dos atuadores eletromagnéticos mostra-se bastante representativo.

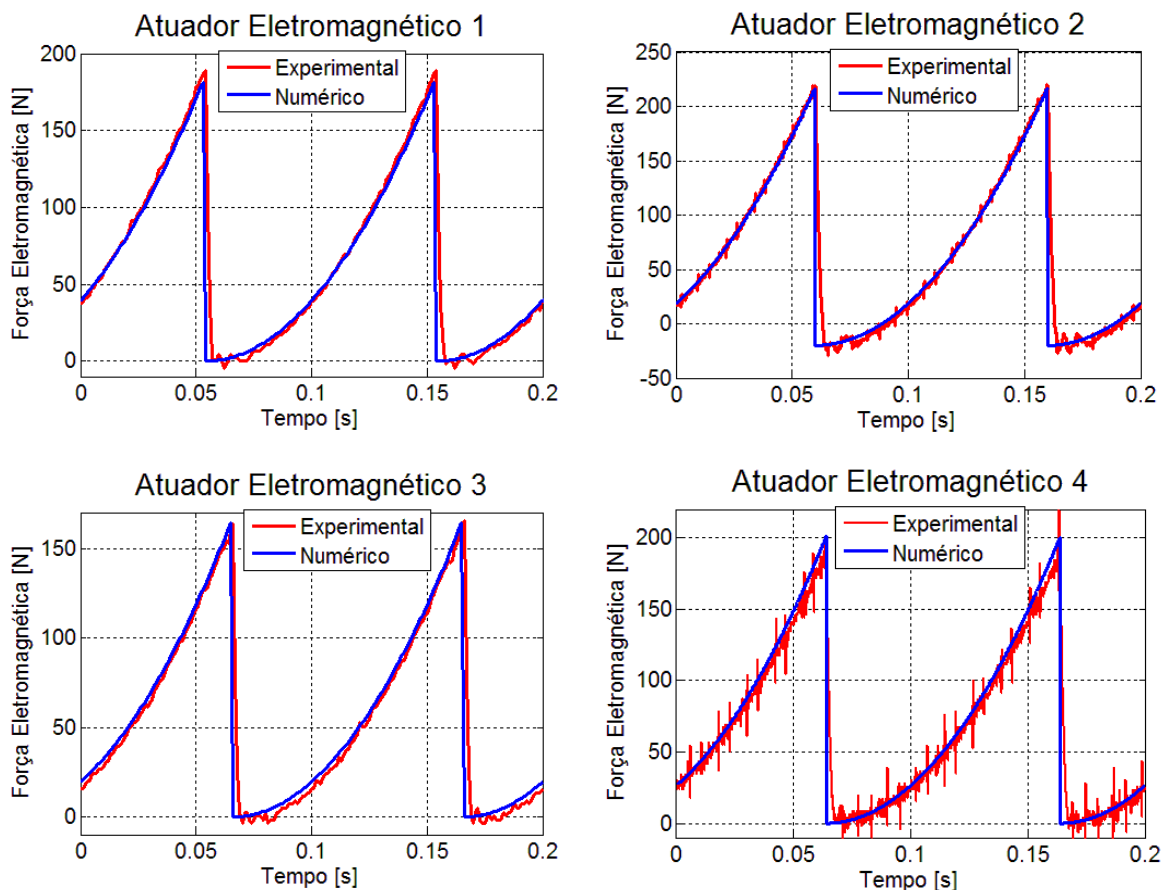


Figura 9. Comparação das forças eletromagnéticas: Numérica e Experimental – Entrada tipo Dente de Serra.

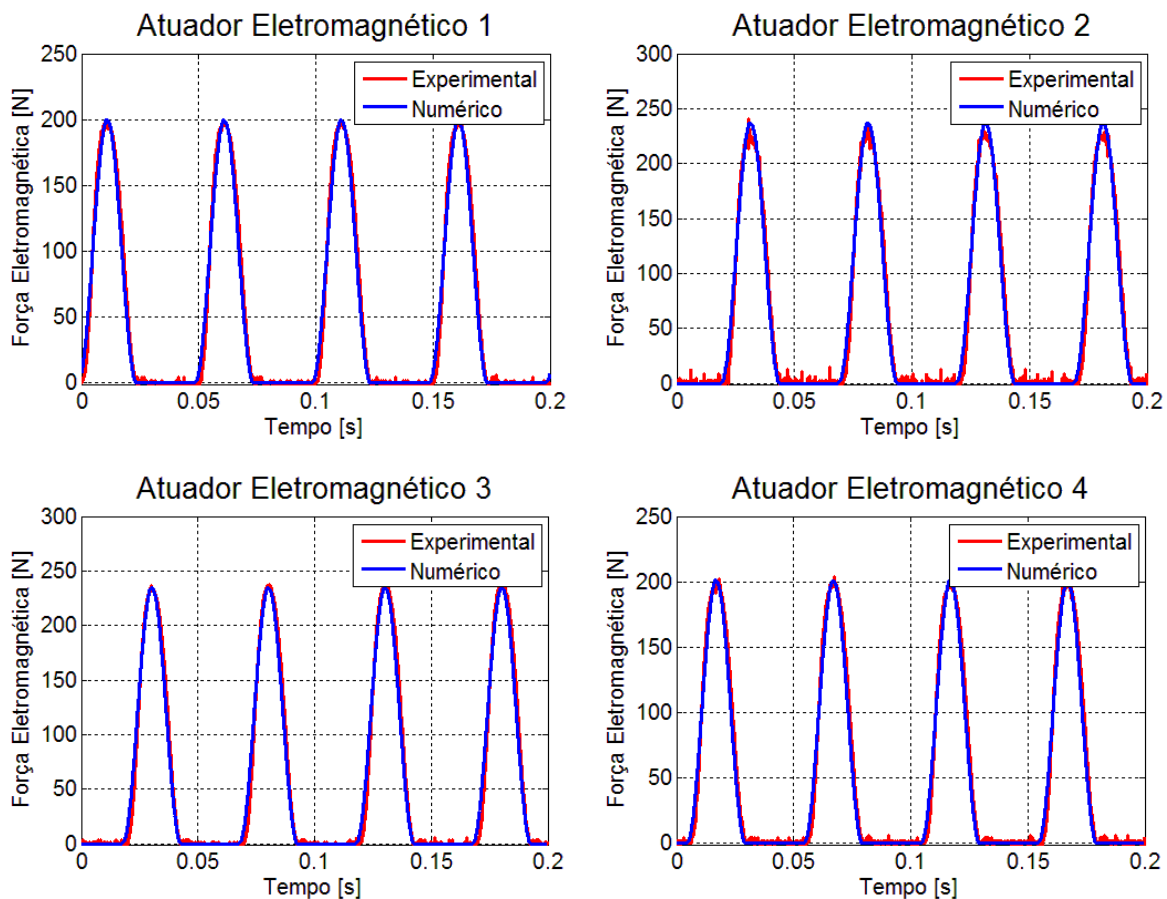


Figura 10. Comparação das forças eletromagnéticas: Numérica e Experimental – Entrada tipo Meia Onda.

4. SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle utilizado é apresentado na Fig. (11). 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.

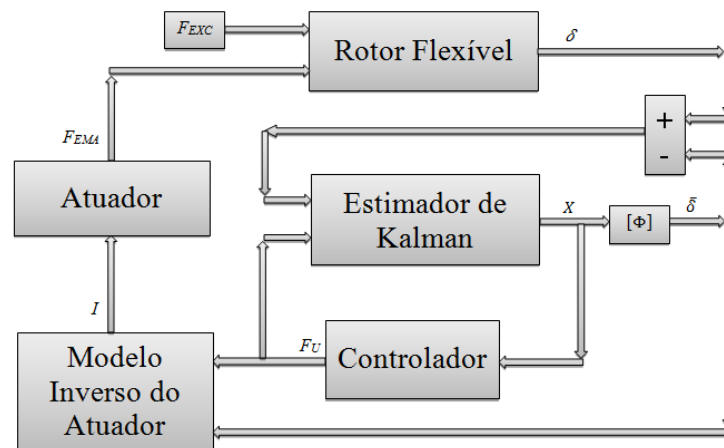


Figura 11. Sistema de Controle (adaptado de Mahfoud *et al*, 2011).

5. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Os resultados apresentados pelas Figs. (12) e (13) ilustram a resposta do sistema (numérica e experimental) para o rotor em regime permanente a uma rotação de 1600rpm. Vale ressaltar que as primeiras velocidades críticas eram da ordem de 1620rpm, daí a escolha do valor de 1600rpm (Koroishi *et al*, 2014).

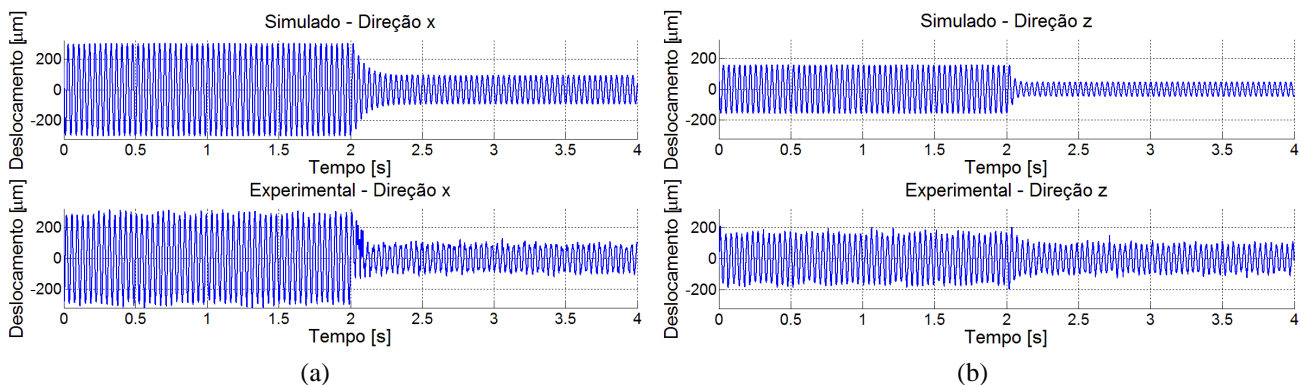


Figura 12. Resposta ao desbalanceamento no nó 27 (Controle Ótimo): (a) Direção x. (b) Direção z.

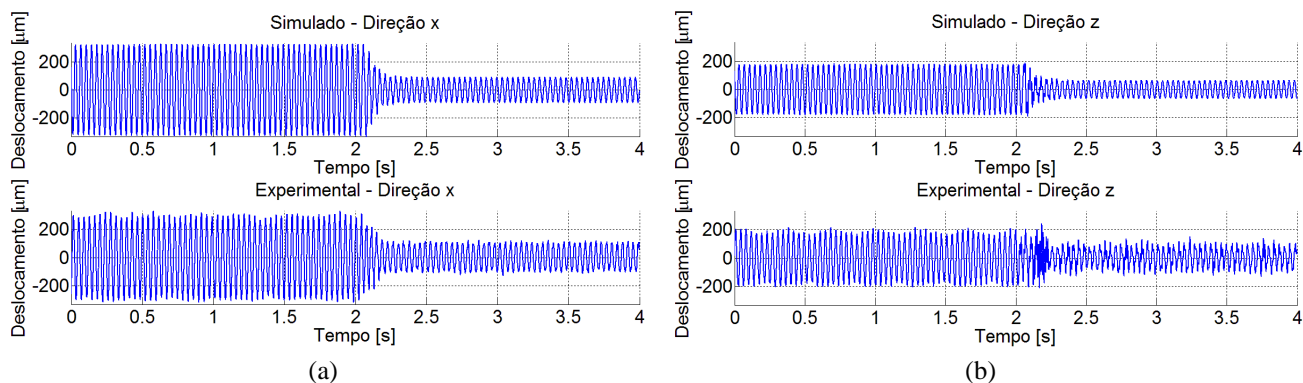


Figura 13. Resposta ao desbalanceamento no nó 27 (Lógica Fuzzy): (a) Direção x. (b) Direção z.

Das Figs. (12) e (13) 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. (5). Através desta tabela é possível observar que os melhores resultados foram obtidos utilizando o Controle Ótimo.

Tabela 5. Redução da Resposta - Resposta ao desbalanceamento (Regime Permanente).

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

As Figs. (14) e (15) mostram as órbitas do rotor utilizando, respectivamente, Controle Ótimo e Controladores Fuzzy.

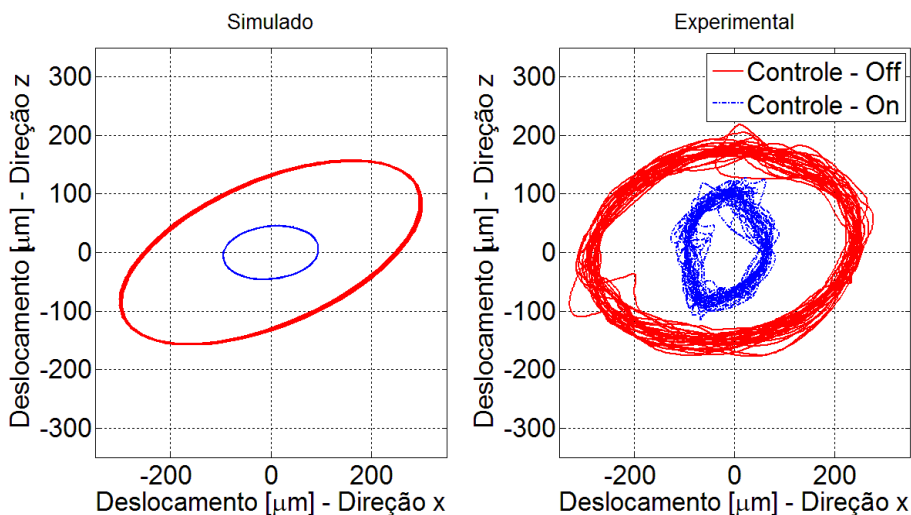


Figura 14. Órbita do rotor no nó 27(Controle Ótimo).

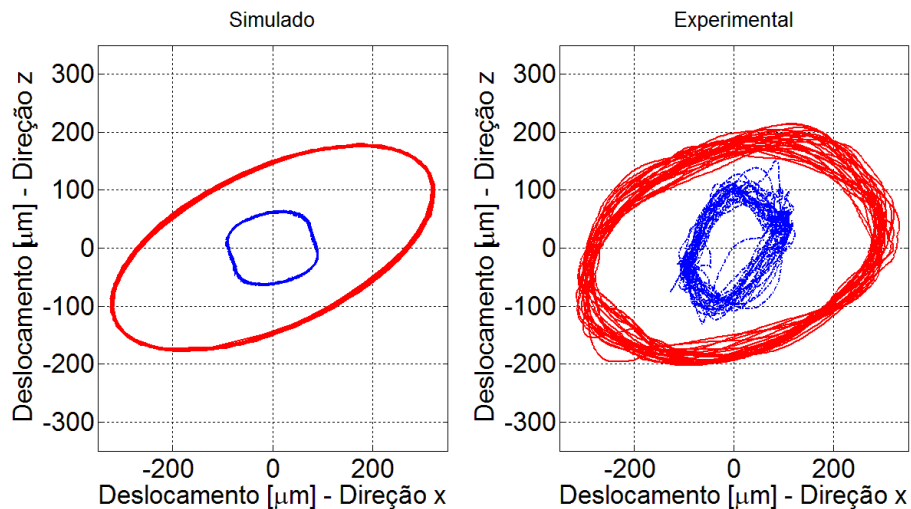


Figura 15. Órbita do rotor no nó 27(Lógica Fuzzy).

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve o propósito de caracterizar atuadores eletromagnéticos utilizados no controle ativo de vibrações em máquinas rotativas.

Dentre as propriedades do núcleo, a permeabilidade relativa é considerada como uma propriedade intrínseca do material ferromagnético, sendo que seu valor pode variar devido à sua composição e deve ser determinado. Na presente contribuição, a permeabilidade relativa foi determinada utilizando a técnica de otimização heurística denominada como otimização por Enxame de Partículas. Nesta etapa, a função objetivo foi escrita de forma a minimizar a norma da diferença da força medida e calculada numericamente. O algoritmo de otimização foi avaliado 100 vezes para cada atuador e, através do gráfico *boxplot*, verificou-se que os valores encontrados apresentaram pouca dispersão.

Com os valores encontrados para as permeabilidades relativas, foi realizada tanto uma análise estática como uma análise dinâmica para verificar a validade do modelo do atuador eletromagnético. Em ambas as análises as curvas das forças obtidas numericamente ficaram muito próximas dos valores experimentais correspondentes, demonstrando a validade do modelo do atuador.

Por fim, os atuadores eletromagnéticos desenvolvidos foram utilizados para o controle ativo de vibrações em máquinas rotativas. Foram realizados testes numéricos e experimentais, através dos quais foi possível observar o bom funcionamento do sistema de controle desenvolvido. No projeto dos controladores, foram utilizadas duas abordagens, a saber, Controle Ótimo e Lógica Nebulosa (*Fuzzy*). Em ambos os casos, a resposta do sistema foi atenuada de forma significativa, o que revela o sucesso da metodologia proposta.

De uma forma geral, os resultados obtidos através deste trabalho foram bastante expressivos. 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 automaticamente seu comportamento dinâmico e impor forças de controle para manter seu funcionamento suave e seguro sempre que necessário. Os AEMs são fáceis de serem integrados ao sistema rotativo (pouco invasivos) e podem aplicar forças de controle elevadas. Tais características reforçam a possibilidade concreta de aplicação industrial da metodologia aqui desenvolvida.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da FAPEMIG, CNPq e CAPES para este trabalho através do INCT-EIE. Os autores também agradecem ao suporte da 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.
- Mahfoud, J., Der Hagopian, J., "Fuzzy Active Control of Flexible Structures by Using Electromagnetic Actuators", *Journal of Aerospace Engineering*, pp. 329-337, 2011.
- Fuller, C. R., Elliot, S. J., Nelson, P. A., "Active Control of Vibration", Academic Press, 1996.
- 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.
- Koroishi, E. H., Borges, A. S., Cavalini Jr, A. A., Steffen Jr, V., "Numerical and Experimental Modal Control of Flexible Rotor Using Electromagnetic Actuator", Mathematical Problems in Engineering (Print), pp. 1-14, 2014.
- Morais, T. S., Steffen Jr, V., Mahfoud, J., “Modeling and Identification of Electromagnetic Actuator for the Control of Rotating Machinery”, Shock and Vibration, 171-179, 2013.
- 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.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

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

CHARACTERIZATION OF ELECTROMAGNETIC ACTUADOR APPLIED IN ACTIVE VIBRATION CONTROL IN ROTOR MACHINE

Edson Hideki Koroishi, koroishi@mecanica.ufu.br¹

Lucas Altamirando de Andrade da Rocha, lucasaarocho@doutorado.ufu.br²

Valder Steffen Jr, vsteffen@mecanica.ufu.br²

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Cornélio Procópio, Av Alberto Carazzai 1640, Cornélio Procópio, MG, Brasil, CEP 86300-000

² Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – Faculdade de Engenharia Mecânica - Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila 2121, Bloco 1M, Uberlândia, MG, Brazil, CEP 38400-902

Abstract: *One of the principal steps in the mechanical system design consists to obtain the mathematical model. This model should be as representative as possible, ie, results in a dynamical behavior closer than the reality. Hence, the aim of the present work is modelling and characterization of electromagnetic actuators used for the active vibration control in rotor machines. The electromagnetic actuator is modeled according to geometrical parameters and the properties of the core. Normally, the core of the electromagnetic actuator is composed by ferromagnetic material whose relative permeability can vary according to the composition of this material and the structure of the used actuator. Thus, this parameter should be determined by identification process. In this work, the identification was done by optimization process with the aim of minimize the difference between numerical and experimental data. The optimization technique used was the Particle Swarm Optimization. With the obtained actuators' model, these were used in the active vibration control of flexible rotor, the efficiency was analyzed both numerical and experimental tests. The obtained results showed the validity of the proposed methodology.*

Keywords: *Electromagnetic Actuator, Active Vibration Control, Rotor Machine, Particle Swarm Optimization*