

MODELAGEM DE ATUADORES MAGNÉTICOS DE UMA BANCADA COM ROTOR FLEXÍVEL SUSPENSO POR MANCAIS MAGNÉTICOS ATIVOS

Marcus Vinicius Fernandes de Oliveira, marcusfernandess@doutorado.ufu.br⁽¹⁾

Adriano Silva Borges, adrianoborges@utfpr.edu.br⁽¹⁾

Julio Almeida Borges, julioalmeidaborges@gmail.com⁽¹⁾

Felipe Carmo Carvalho, felipecarmocarvalho@gmail.com⁽¹⁾

Valder Steffen Jr, vsteffen@mecanica.ufu.br⁽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. Neste artigo apresenta-se a modelagem numérica dos atuadores eletromagnéticos que compõe um par de mancais magnéticos. Para tanto, será empregada uma bancada experimental composta por um Rotor Flexível suspenso por dois Mancais Magnéticos Ativos radiais. Para elaborar um modelo-computacional representativo da bancada é necessário conhecer o comportamento físico dos atuadores eletromagnéticos, para isso foram construídos modelos utilizando softwares de elementos finitos englobando cada um dos seus componentes com base nas especificações de projeto, fornecidas pelo fabricante. Em seguida, os parâmetros de interesse foram calculados analiticamente utilizando métodos propostos na bibliografia. A validação experimental dos parâmetros obtidos via elementos finitos e analiticamente ocorrerá em uma etapa seguinte deste trabalho. Os dados da modelagem numérica serão utilizados no modelo numérico computacional completo a ser empregado na análise e implementação de novas metodologias de Controle Ativo.

Palavras chave: Mancais Magnéticos, Rotor Flexível, Caracterização

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de equipamentos cada vez mais eficientes e mais confiáveis em diversos setores da indústria tais como geração de energia, exploração de petróleo, automotivo e aeroespacial, tem impulsionado o aprimoramento de tecnologias como as que se relacionam aos MMAs (Mancais Magnéticos Ativos), AEMs (Atuadores Eletromagnéticos) e MHR (Mancais Hidrodinâmicos Radiais). Tais tecnologias possibilitam o controle ativo de vibrações e permitem que máquinas rotativas operem próximas a suas velocidades críticas. Koroishi (2013) aplicou técnicas de controle ativo de vibrações utilizando atuadores eletromagnéticos em rotores flexíveis para atenuar os níveis de vibração durante passagens pelas velocidades críticas.

Um assunto que vêm despertando grande interesse na comunidade acadêmica é a aplicação de MMAs em turbomáquinas, pois esta tecnologia permite levar o rotor sobre os mancais, evitando perdas por atrito. Outros dois aspectos importantes são que este tipo de mancal dispensa lubrificação e opera sem necessidade de manutenção frequente (Yoon *et al.*, 2013). De acordo com Schweitzer & Maslen (2009), a capacidade de sensoriamento, processamento de dados e atuação dos mancais magnéticos ativos lhes conferem grande potencial para se tornarem elementos-chave no projeto de máquinas inteligentes. Isto porque, além de permitirem o controle ativo do comportamento dinâmico destes sistemas, também podem ser empregados no monitoramento *online* da sua integridade estrutural (SHM – “*Structural Health Monitoring*”). Como exemplos de aplicações dos MMA's em engenharia, pode-se citar o controle de ativo de vibrações em ultras centrífugas, máquinas ferramentas e turbo compressores (Yoon, 2013).

Este trabalho corresponde à segunda etapa de uma pesquisa onde o principal objetivo é o estudo de metodologias de Controle Ativo Robusto de máquinas rotativas suportadas por MMA's. Nesta fase, são obtidos por meio de software de elementos finitos os parâmetros necessários para a elaboração de um modelo numérico-computacional que será empregado no estudo de diversas estratégias de controle ativo de vibrações em máquinas rotativas.

2. MANCAIS MAGNÉTICOS

Os princípios que regem o funcionamento dos MMA's estão fundamentados nos conceitos básicos do eletromagnetismo. Desta forma, o seu estudo é essencial ao desenvolvimento de máquinas rotativas com atuadores magnéticos ativos. O principal objetivo ao se analisar o comportamento dinâmico de um atuador magnético é relacionar as forças geradas por estes dispositivos, devidas à aplicação de uma tensão elétrica nas suas bobinas, ao movimento do

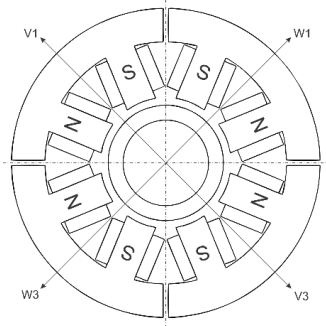
sistema em estudo. Como esta metodologia de análise está bem consolidada na literatura, pode ser empregada no dimensionamento do sistema como um todo (Schweitzer & Maslen, 2009), pois permite investigar a influência de diversos parâmetros de projeto.

Uma análise simplificada da bobina/geometria (forças relacionadas e propriedades elétricas) pode ser realizada através de uma representação unidimensional da estrutura magnética do atuador. Sabe-se que o fluxo magnético é gerado em cada pólo do atuador pelas bobinas, com N espiras e uma dada corrente elétrica passando por elas. Deve-se mencionar que alguns efeitos que surgem no mancal magnético, tais como a corrente de flutuação, não são levados em consideração na equação da força eletromagnética. Desta forma, a partir dos princípios físicos do magnetismo, pode-se obter a equação da força gerada pelo AMB (Schweitzer & Maslen, 2009), como mostra a Eq. (1):

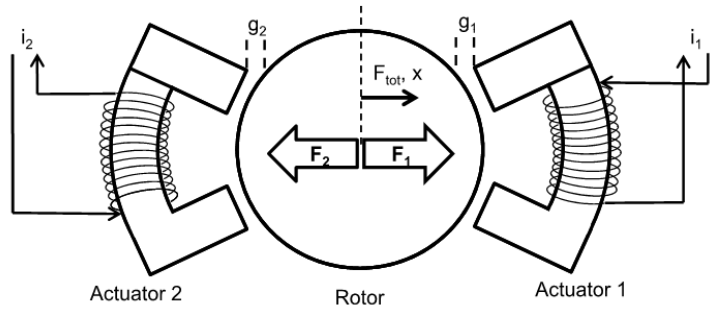
$$F = \varepsilon \frac{\mu_0 N^2 i^2 A_g}{4g^2} \quad (1)$$

onde μ é a permeabilidade do ar ($4\pi 10^{-7}$ H/m); g é a distância entre o rotor e o estator (*entreferro*); A_g é a área da face de cada pólo; ε é o fator de correção geométrica (0.9 para mancais axiais e 0.8 para mancais radiais) e i é a corrente de saturação.

Como as forças eletromagnéticas só podem ser de atração, o atuador deve ser colocado em ambos os lados do rotor, e em direções diametralmente opostas, conforme apresentado na Figura 1a). Uma representação das forças em um rotor sob a ação de dois atuadores magnéticos pode ser vista na Fig. (1b), onde F_1 e F_2 são as forças de atração que agem no controle radial; F_{tot} é a resultante atuando no rotor; g_1 e g_2 representam o entreferro e i_1 e i_2 representam as correntes elétricas em cada um dos atuadores.



(a) Configuração de eixos e polos de um MMA



(b) Rotor suportado por MMAs (Yoon, 2013)

Figura 1. Princípio de Funcionamento dos MMA's

3. METODOLOGIA

A bancada de testes utilizada é apresentada na Fig. (2), que consiste de um eixo flexível suportado por dois MMA's idênticos. Este sistema foi fornecido pela SKF e possui uma arquitetura de controle baseada em um controlador PID descentralizado, associado a um banco de filtros.

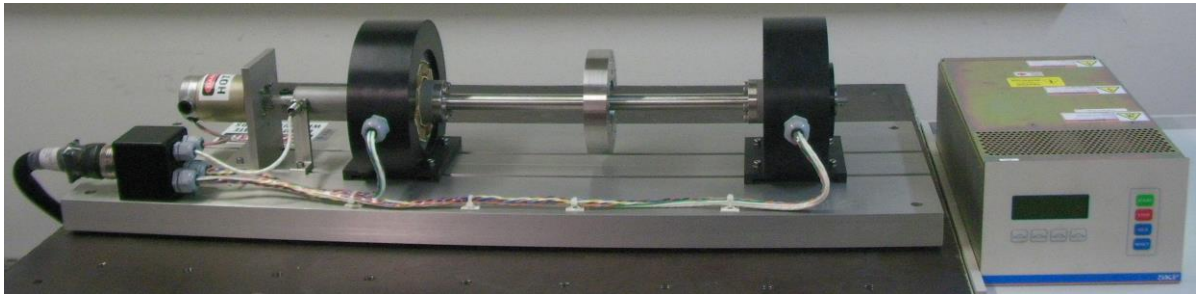


Figura 2. Bancada experimental

3.1. Modelagem em software de elementos finitos

O primeiro passo foi o de desenvolver o modelo do subsistema do MMA usando o software comercial de elementos finitos ANSYS®. O modelo foi elaborado com base nos seus dados geométricos e nas especificações fornecidas pelo fabricante, apresentados na Tab. (1). Na Fig. (3a) apresenta-se o modelo de elementos finitos utilizado, para minimizar os gastos computacionais a simulação foi feita em metade o subsistema devido à simetria no plano X-Y. Na Fig. (3b) é mostrada a distribuição da densidade de fluxo do campo magnético no estator, onde é possível observar as regiões de concentração do fluxo na região em vermelho, esta concentração ocorre devido à geometria do estator.

Tabela 1. Parâmetros do Sistema

Parâmetro		Unidade
Número de voltas de corrente elétrica, N	276	--
Entreferro, g_0	0.364	mm
Área projetada do pólo, A_g	430.74	mm ²
Tensão de operação	10	V
Corrente de bias, i_b	1	A
Capacidade de carga estática	283	N
Comprimento do eixo	645	mm
Massa do rotor com o Disco	5.89	kg
Potência do motor	500	W
Faixa de operação	0-12000	rpm

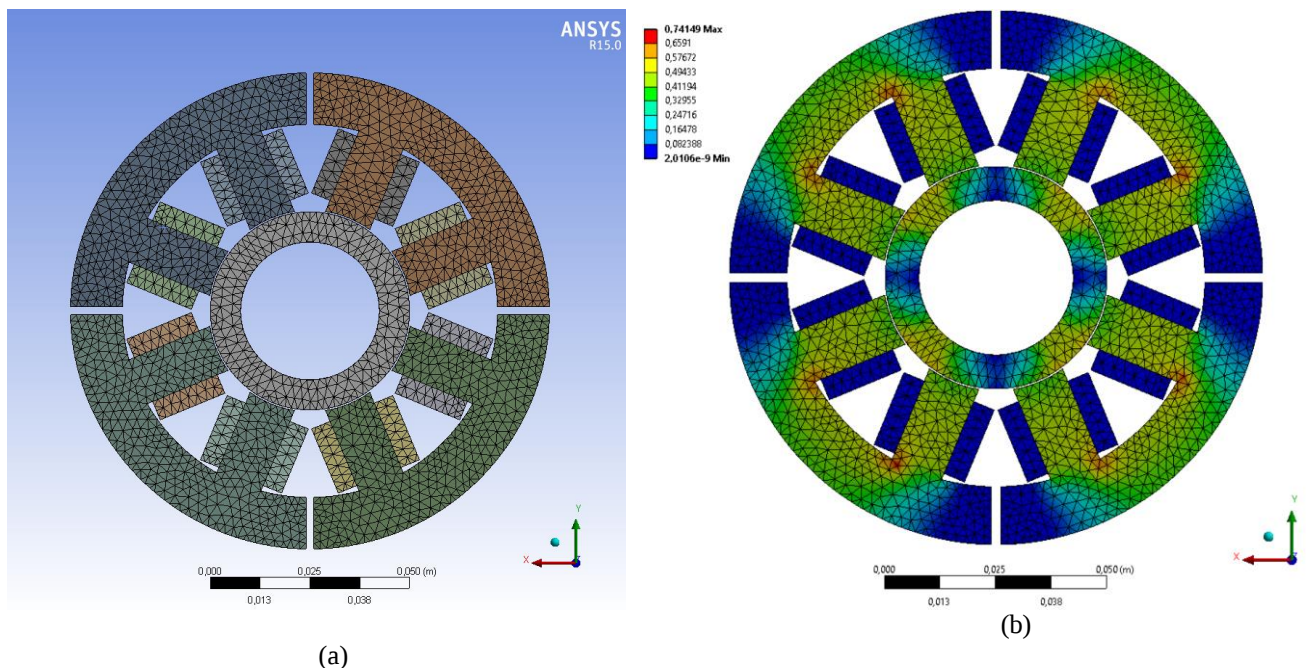


Figura 3. Modelos de Elementos Finitos do MMA, (a) malha utilizada na simulação (b) distribuição da densidade de fluxo do campo magnético.

Para obter a rigidez de corrente k_i o rotor foi mantido centralizado e variou-se a corrente nos atuadores axissimétricos para obter o ganho de corrente k_i [N/A]. A corrente de bias, $i_0 = 1$ A, foi mantida constante e, para simular a corrente de controle do sistema, utilizou-se uma corrente auxiliar, i_x , que foi inserida como uma perturbação no sistema. Esta corrente varreu toda a faixa de operação dos atuadores, ou seja, até um valor máximo de 3 A ($-2 \leq i_x \leq 2$). Utilizando as mesmas condições na simulação foi possível obter a densidade de fluxo B e a capacidade máxima do atuador [N].

Para determinar a rigidez de posição k_s foi utilizada uma metodologia similar à utilizada na determinação da rigidez de corrente k_i ; nesta simulação a corrente nos atuadores foi mantida constante deslocando-se apenas o rotor. A faixa deslocamento do rotor na simulação foi de $-300 \leq x \leq 300$ [μm].

Os parâmetros k_i e k_s foram obtidos através de um ajuste de curva como são apresentados nas Fig. (4) e (5), respectivamente.

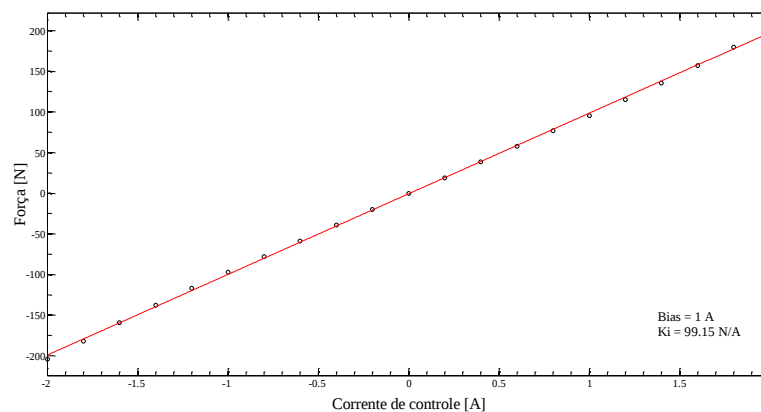


Figura 4. Gráfico Força x Corrente utilizado para determinar a rigidez de corrente k_i .

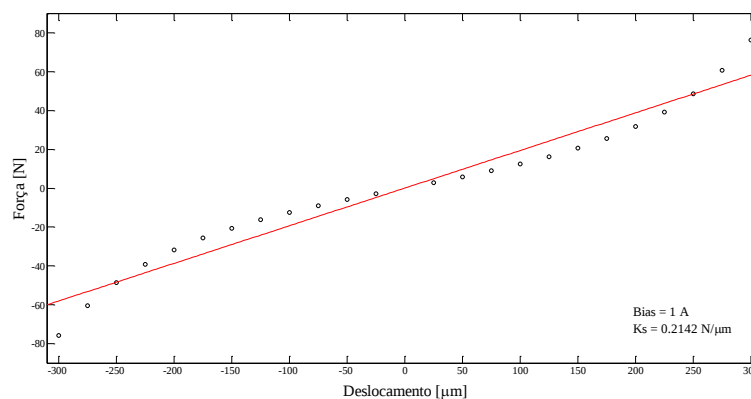


Figura 5. Gráfico Força x Deslocamento utilizado para determinar a rigidez de posição k_s .

4. CONCLUSÃO

Analisando-se os resultados alcançados nesta etapa preliminar, pode-se afirmar que o objetivo de conceber um modelo da bancada de testes foi cumprido de forma satisfatória. Na etapa seguinte será realizada a validação do modelo numérico-computacional com base em dados experimentais colhidos diretamente da bancada.

5. REFERÊNCIAS

- Koroishi, E. H., 2013, Controle de Vibrações em Máquinas Rotativas utilizando Atuadores Eletromagnéticos. 193f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Schweitzer, G., Maslen, E. H., 2009, “Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery”, Springer-Verlag, Berlin.
- Yoon, S. Y. et al., 2013, “Control of Surge in Centrifugal Compressors by Active Magnetic Bearings”, Advances in Industrial Control, Springer-Verlag, Londres.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da FAPEMIG, CNPq e CAPES para este trabalho, através do INCT-EIE.

7. ABSTRACT

This paper presents the numerical modeling of electromagnetic actuators that make up a couple of magnetic bearings. To this end, it employed an experimental bench consists of a Flexible Rotor suspended for two radial magnetic bearings. To draw up a representative computational model-countertop is necessary to know the physical behavior of electromagnetic actuators, for it was built models using finite element software encompassing each of its components based on design specifications provided by the manufacturer. Then, the parameters of interest were calculated analytically using methods proposed in the literature. The experimental validation of the parameters obtained

via finite element and analytically occur in a next step of this work. The data of numerical modeling will be used in a complete numerical model to be used in the analysis and implementation of new methods of active management.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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