



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

PROJETO DE CONTROLADORES $\mathcal{H}_\infty$ APLICADOS A UM ROTOR FLEXÍVEL PARA ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Daniel Almeida Colombo, danielcolombo@alunos.utfpr.edu.br¹

Renan Franco Corrêa, renancorrea@alunos.utfpr.edu.br¹

Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹

Fabian Andres Lara-Molina, fabianmolina@utfpr.edu.br¹

Erik Taketa, eriktaketa@alunos.utfpr.edu.br¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Avenida Alberto Carazzai, 1640 CEP: 86300-000 - Cornélio Procopio/PR,

Resumo: O presente trabalho desenvolve e aplica uma técnica de controle que realiza uma combinação da teoria de Lógica Fuzzy e Controle $\mathcal{H}_\infty$ a fim de controlar o comportamento dinâmico de um rotor flexível. Foram utilizados atuadores eletromagnéticos, os quais apresentam comportamento não-linear, dada a dependência com a corrente e com a distância do entreferro. Para resolver o problema da não-linearidade, foi utilizada a Compensação Paralela Distribuída (CPD), na qual a Lógica Fuzzy realiza uma combinação linear baseada em modelos locais para resolver sistemas não-lineares. Para cada modelo local, foi desenvolvido um controlador linear utilizando desigualdades matriciais lineares (LMIs - do inglês Linear Matrix Inequalities), na sequência, o conjunto dos controladores locais são combinados em um controlador global obtido por meio do modelo Fuzzy Takagi-Sugeno. Ressalta-se que no projeto dos controladores foi associado a minimização da norma $\mathcal{H}_\infty$ para garantir a estabilidade do sistema. Os resultados das simulações demonstraram a eficiência destes controladores dado que o controle reduziu significativamente a resposta dinâmica do sistema rotativo.

Palavras-chave: rotor flexível, lógica fuzzy, norma $\mathcal{H}_\infty$, atenuação de vibrações

1. INTRODUÇÃO

O controle tem se tornado de grande importância e parte integrante dos modernos processos industriais e de produção, além de ser de extrema importância em vários tipos de sistemas. Como os avanços no controle vêm produzindo meios para otimizar o desempenho dos sistemas dinâmicos, é de suma importância que a maioria dos engenheiros e dos cientistas tenham bons conhecimentos nessa área (Ogata, 2003). Diante disto, nota-se atualmente um aumento expressivo de trabalhos de pesquisa em engenharia dedicados ao desenvolvimento de 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). No contexto da dinâmica de rotores, Saldarriaga (2007) classifica as técnicas de AVC em duas categorias principais: o controle de vibração ativo, que consiste na aplicação de forças laterais que se oponham às forças provocadas pela vibração; e o equilíbrio ativo que consiste na redistribuição da massa ao longo do rotor, com a contribuição de atuadores, de modo que o rotor possa ser equilibrado.

Neste trabalho, foi usado um atuador eletromagnético para controlar o comportamento dinâmico de um rotor flexível. Para este tipo de atuador a dificuldade se encontra em sua não-linearidade, ou seja, o esforço de controle do atuador não age segundo uma trajetória linear. Vários autores têm proposto alternativas diferentes para lidar com tal situação. Der Hagopian et al. (2010) utilizaram o modelo inverso do atuador para controlar um sistema de rotor. Para tal propósito, usaram a técnica de controle de gabarito utilizando a força de controle para determinar a corrente elétrica que foi usada para acionar o atuador eletromagnético.

Gaino (2009) e Cardim (2009) utilizaram a lógica fuzzy baseado em modelos locais para resolver sistemas não-lineares. Nestes trabalhos, os autores usaram as desigualdades matriciais lineares (LMIs) para resolver a lógica fuzzy, considerando um modelo de Takagi-Sugeno. Esta metodologia é utilizada, no presente trabalho, para resolver o problema de não-linearidade do atuador eletromagnético usado para controlar o sistema de rotor.

2. MODELO DO ROTOR

Modelos de rotores flexíveis são compostos a partir de vários elementos como discos, mancais, eixos flexíveis e selos. Para descrever o movimento do rotor utiliza-se a equação de Lagrange às expressões que fornecem as energias para os elementos do rotor. Um maior aprofundamento sobre as equações do movimento do rotor pode ser encontrado em (Lalanne e Ferraris, 1998).

No presente trabalho é considerado que o elemento de disco é rígido e, desta forma considera-se apenas a energia cinética. Enquanto que os elementos de eixo têm energia de deformação e energia cinética. O modelo do eixo é obtido utilizando o conceito de elemento de viga de Timoshenko, o mesmo que em sua formulação considera que as secções planas se mantêm planas, contudo, supõe-se que uma secção normal ao eixo da viga não mantém esse atributo após a deformação, e tem as seguintes características: o elemento tem 2 nós, sendo que cada nó possui 4 graus de liberdade, ou seja, dois graus para o deslocamento e dois graus para a rotação.

A equação que descreve o movimento do rotor tema deste trabalho, na forma matricial, é representada pela equação diferencial expressa na Eq. (1).

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

onde, $\{x(t)\}$ é o vetor de deslocamento generalizado; $[M]$, $[K]$, $[K_g]$, $[C_b]$ e $[C_g]$ são as matrizes de inércia, rigidez e rigidez associada ao movimento transiente, amortecimento viscoso do mancal, a matriz do efeito giroscópico (com respeito a velocidade de rotação) respectivamente; $\dot{\phi}$ é a velocidade angular, e $\{F_u(t)\}$ e $\{F_{AEM}(t)\}$ são as forças de desequilíbrio e ação do atuador eletromagnético, respectivamente. As matrizes envolvidas na Eq. (1) possuem grandes dimensões, logo o método pseudo-modal é utilizado para reduzir a dimensão do modelo. Com efeito, deve-se transformar as coordenadas físicas em coordenadas modais.

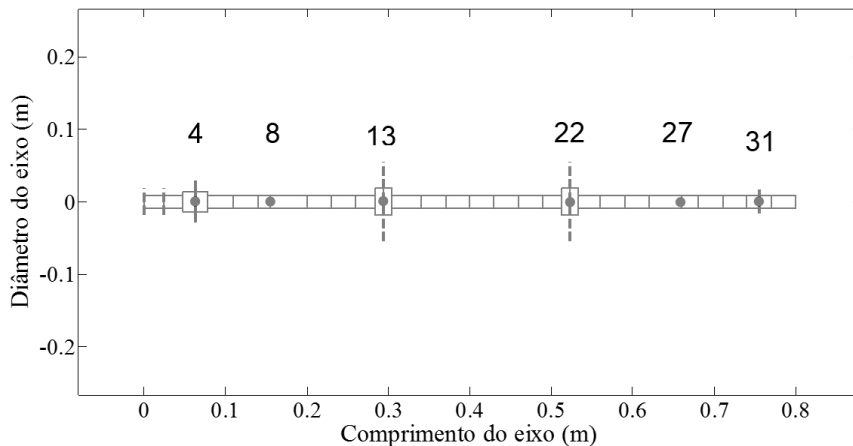


Figura 1 - Modelo discretizado do rotor flexível

Os nós 13 e 22 correspondem à posição dos discos, os nós 8 e 27 aos sensores e os nós 4 e 31 aos mancais, sendo que o mancal do nó 4 corresponde à posição dos atuadores eletromagnéticos.

A Tabela 1 abaixo apresenta as propriedades físicas da estrutura.

Tabela 1 – Características físicas do sistema rotor/rolamento (Koroishi, 2014)

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
Coeficiente de Poisson	0,3	-	-

3. LÓGICA FUZZY

Em rotores flexíveis, a utilização da lógica fuzzy no projeto do sistema de controle também tem sido evidenciado. Malhis (2002) realizou o controle ativo tanto de uma viga como de um rotor com a utilização de atuadores piezoelétricos. Em ambos os casos os controladores foram projetados utilizando controladores fuzzy do tipo Mamdani. Em termos de mancais magnéticos ativos, a literatura tem apresentado diversas aplicações de lógica fuzzy. Chen et al. (2009) projetaram um controlador fuzzy do tipo PID para o controle de vibração devido ao desbalanceamento. Neste trabalho foi utilizado um modelo de observação para avaliar o deslocamento do eixo e as forças de desbalanceamento. Entretanto, as incertezas no modelo do rotor assim como as não-linearidades presentes em mancais magnéticos ativos podem afetar o desempenho dos observadores em certas velocidades de operação e, assim, utiliza-se um ganho fuzzy para o ajuste dos sinais.

Neste trabalho foi utilizado o modelo fuzzy Takagi-Sugeno (TS), ou modelo Takagi-Sugeno-Kang (TSK) como também é conhecido, este modelo permite descrever um sistema não-linear como uma combinação linear de certo número de modelos lineares invariantes no tempo locais que descrevem o comportamento deste sistema em diferentes pontos do seu espaço de estados. Assim, pode-se interpretar a técnica tradicional de linearização em apenas um ponto de operação como um caso particular dos modelos fuzzy TS, consistindo apenas de um modelo local. Esta classe de modelos de projeto permite que o engenheiro ou pesquisador utilize os seus conhecimentos sobre o sistema que vai ser controlado, na definição do número dos modelos locais e dos pontos ou regiões nas quais estes modelos locais serão definidos. O modelo global do sistema é obtido através da combinação destes modelos lineares locais (Koroishi, 2011).

No projeto de controladores fuzzy é comum a utilização do conceito de compensação paralela distribuída (do inglês, *Parallel Distributed Compensation (PDC)*) para estabilizar sistemas não-lineares descritos por modelos fuzzy TS (Tanaka et. al, 1998), (Cardim, 2009), (Gaino, 2009). A *PDC* consiste em desenvolver um controlador para cada modelo local do sistema fuzzy TS, obtendo a partir da combinação linear dos controladores locais, um controlador global. Geralmente é usado o critério de estabilidade de Lyapunov para constatar a existência de ganhos de estabilidade.

Dentro deste contexto, no presente trabalho a Lógica fuzzy foi utilizada para se fazer uma combinação linear dos controladores locais obtidos através da norma $\mathcal{H}_\infty$.

3.1. Norma $\mathcal{H}_\infty$

Um sistema dinâmico é “pequeno” caso sua função de transferência $G(\omega)$ possua pequenas magnitudes em todos os seus modos. Uma norma que quantifica esta medida para sistemas com uma única entrada e uma única saída (SISO) é a chamada norma $\mathcal{H}_\infty$ de $\mathcal{H}(\omega)$ (Bueno, 2007).

Considerando o sistema estável, a norma $\mathcal{H}_\infty$ é definida como:

$$\|\mathcal{H}\|_\infty = \max_{\omega} \sigma_{\max}(\mathcal{H}(\omega)) \quad (2)$$

sendo $\sigma_{\max}(\mathcal{H}(\omega))$ o maior valor singular de $\mathcal{H}(\omega)$. A norma do sistema SISO é a magnitude do maior pico da função de transferência $\mathcal{H}(\omega)$ em termos de valores singulares.

A norma $\mathcal{H}_\infty$ do i-ésimo modo natural (A_i, B_i, C_i) ou $(\omega_i, \xi_i, b_i, c_i)$ pode ser estimada através da seguinte equação (Gawronski, 1998):

$$\|\mathcal{H}_i\|_\infty \cong \frac{\|B_i\|_2 \|C_i\|_2}{2\omega_i \xi_i} \cong \frac{\|b_i\|_2 \|c_i\|_2}{2\omega_i \xi_i} \quad (3)$$

A norma $\mathcal{H}_\infty$ do sistema todo corresponde a maior norma de todos os modos:

$$\|\mathcal{H}\|_\infty \cong \max_i \|\mathcal{H}_i\|_\infty, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

na qual n é o número de modos.

Outra maneira de se calcular a norma $\mathcal{H}_\infty$ é via LMI. Neste sentido, Boyd et al. (1994) apresentam uma maneira de calcular a norma $\mathcal{H}_\infty$ utilizando LMIs. A norma $\mathcal{H}_\infty$ pode ser resolvida a partir do seguinte problema de otimização convexa:

$$\begin{aligned} & \|\mathcal{H}\|_\infty = \min \mu \\ \text{sujeito à } & \begin{bmatrix} [A]^T [P] + [P] [A] + [C]^T [C] & [P] [B] \\ [B]^T [P] & -\mu \end{bmatrix} < 0 \\ & [P] > 0, \mu > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

no qual μ é escalar. Em (Assunção e Teixeira, 2001) há uma sub-rotina para computar esta norma com o auxílio do LMI toolbox do Matlab®.

A norma $\mathcal{H}_\infty$ do i-ésimo modo de uma estrutura com um conjunto s de atuadores é a soma RMS das normas dos modos para cada atuador separadamente, ou seja:

$$\|G_i\|_\infty = \sqrt{\sum_{j=0}^s \|G_{ij}\|_\infty^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Da mesma forma, a norma $\mathcal{H}_\infty$ do i -ésimo modo de uma estrutura com um conjunto r de sensores é a soma RMS das normas dos modos para cada sensor separadamente, ou seja:

$$\|G_i\|_\infty = \sqrt{\sum_{j=0}^r \|G_{ij}\|_\infty^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Como já mencionado, o modelo do sistema utilizado foi obtido através da utilização do Método de Elementos Finitos baseado na teoria de elementos de viga de Timoshenko, devido ao elevado número de graus de liberdade utilizou-se o método pseudo-modal, sendo realizado o controle considerando os quatros primeiros modos de vibração do sistema.

O circuito ferromagnético que compõe o atuador eletromagnético está representado na Fig. 2 abaixo.

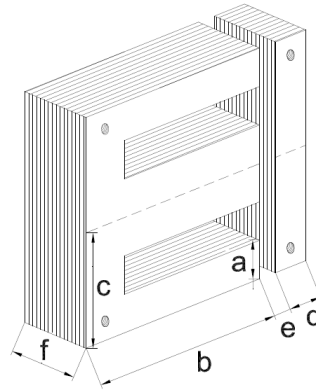


Figura 2 - Circuito Ferromagnético

Os parâmetros que definem a geometria das bobinas (a , b , c , d , e e f), mostrados na Fig. 2, são apresentados na Tab. 2 a seguir.

Tabela 2 – Parâmetros da bobina (Koroishi, 2014)

μ_0 (H/m)	$1,26 \times 10^{-6}$
μ_r	700
N (espiras)	250
a (mm)	9,50
b (mm)	38,00
c (mm)	28,50
d (mm)	9,50
f (mm)	22,50
e (mm)	0,5

Estes parâmetros são fundamentais na determinação da força eletromagnética de controle dada pela Eq. 8 a seguir.

$$F_{AEM} = \frac{N^2 I^2 \mu_0 a f}{2 \left((e \pm \delta) + \frac{b+c+d-2a}{\mu_r} \right)^2} \quad (8)$$

onde μ_r é a permeabilidade relativa do material ferromagnético do núcleo e δ a variável que se acrescenta ao entreferro para representar a vibração do rotor na posição do AEM.

A força de controle é dependente da corrente I que é determinada pela estrutura de controle apresentada pela Fig 3.

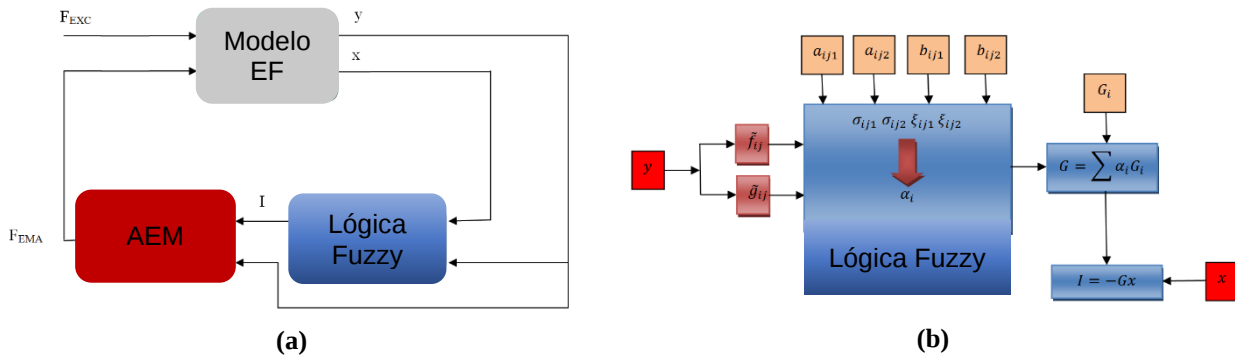


Figura 3 – (a) Sistema de Controle / (b) Estrutura do Controlador Fuzzy

Para determinar as funções auxiliares $\tilde{f}_{ij}$ e $\tilde{g}_{ij}$, o controlador fuzzy utiliza os deslocamentos nas direções x e z , respectivamente. Os ganhos G_i 's, nesta estrutura de controle, são determinados pelas técnicas de controle linear via minimização da norma $\mathcal{H}^\infty$.

Foram realizadas análises e simulações computacionais através dos softwares Matlab® e Simulink® a fim de validar o modelo em estudo.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS

Foram analisadas a controlabilidade e a observabilidade do sistema para efeito de planejamento dos controladores e do estimador de estado, destacando que, para os 4 primeiros modos (2 modos correspondentes a direção x , e os outros 2, correspondem a direção z), o sistema era tanto controlável como observável.

Para avaliação do sistema foram simuladas três situações distintas. Num primeiro momento, a entrada foi impulsiva, onde foi aplicada uma força de excitação de 100 [N] com tempo de aquisição de 2,5 [s] no disco 1 (D_1) e avaliado o comportamento quanto ao controle. A Figura 4 mostra o deslocamento do sistema analisado.

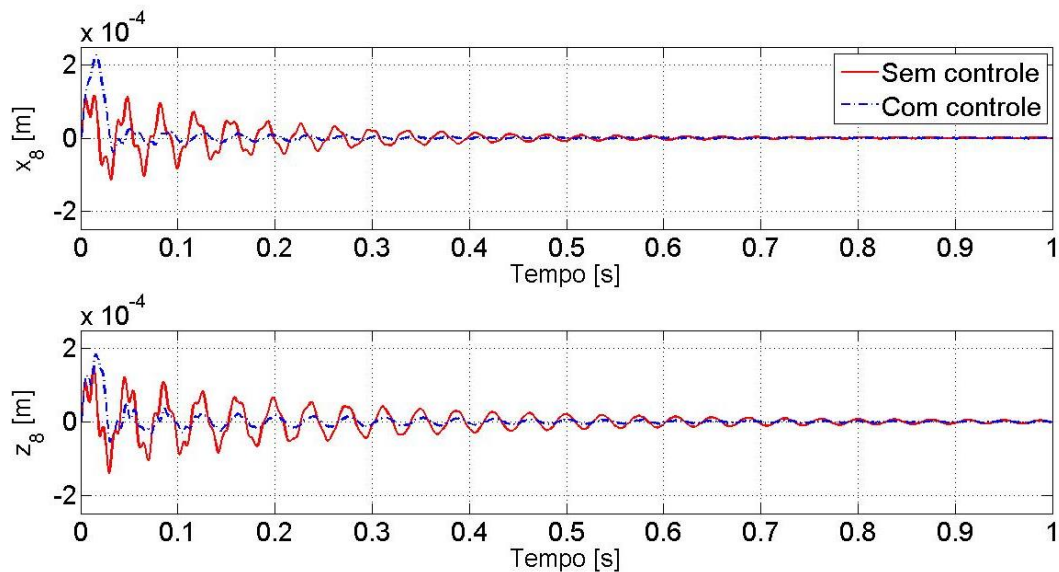


Figura 4 - Resposta do deslocamento do sistema

Pela análise da Fig. 4 pode-se notar que em um instante de tempo de aproximadamente 0,05s, a amplitude na direção x foi reduzida de $8,95 \times 10^{-5}$ [m] para uma amplitude de $2,48 \times 10^{-5}$ [m], o que representa uma redução de 72,3%, e na direção z a amplitude foi reduzida de $5,27 \times 10^{-5}$ [m], para $1,37 \times 10^{-5}$ [m], representando 74,0% de redução.

Em seguida, foi analisada a resposta do sistema no domínio da frequência, para esta finalidade, foi obtida a Função Resposta em Frequência (FRF). A Figura 5 apresenta as FRFs obtidas.

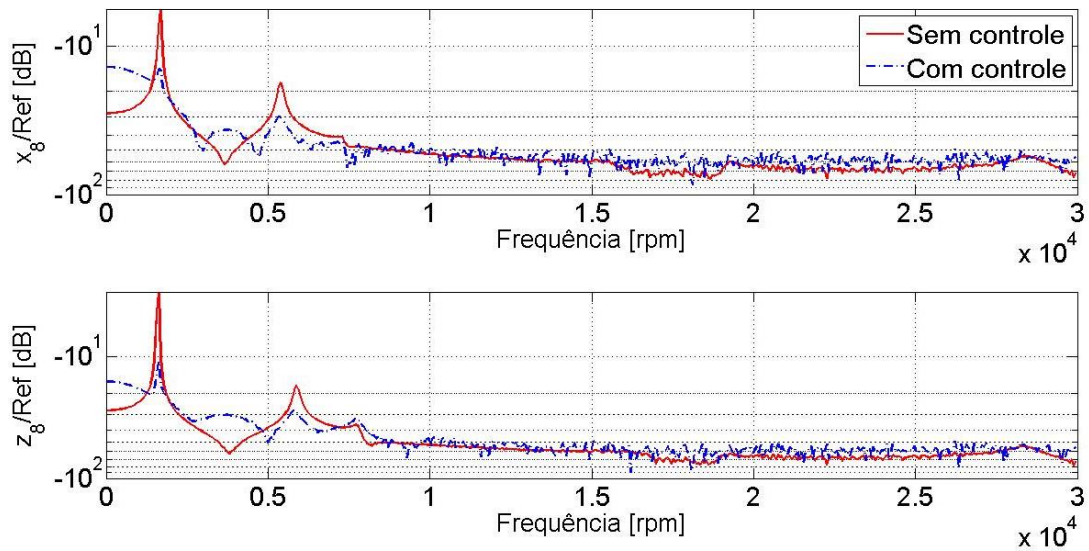


Figura 5 - Função Resposta em Frequência (FRF)

Analisando precisamente o gráfico da Fig. 5 é possível observar a atenuação da amplitude através dos picos da FRF. Avaliando primeiramente na direção x , pode-se observar que houve uma redução na amplitude de 8,59 dB no primeiro modo e de 11,8 dB no segundo modo. Na direção z houve uma redução de 8,05 dB e 10,3 dB para o primeiro e segundo modo, respectivamente.

A Figura 6 apresenta os níveis de corrente elétrica nos atuadores eletromagnéticos durante o teste de entrada impulsiva.

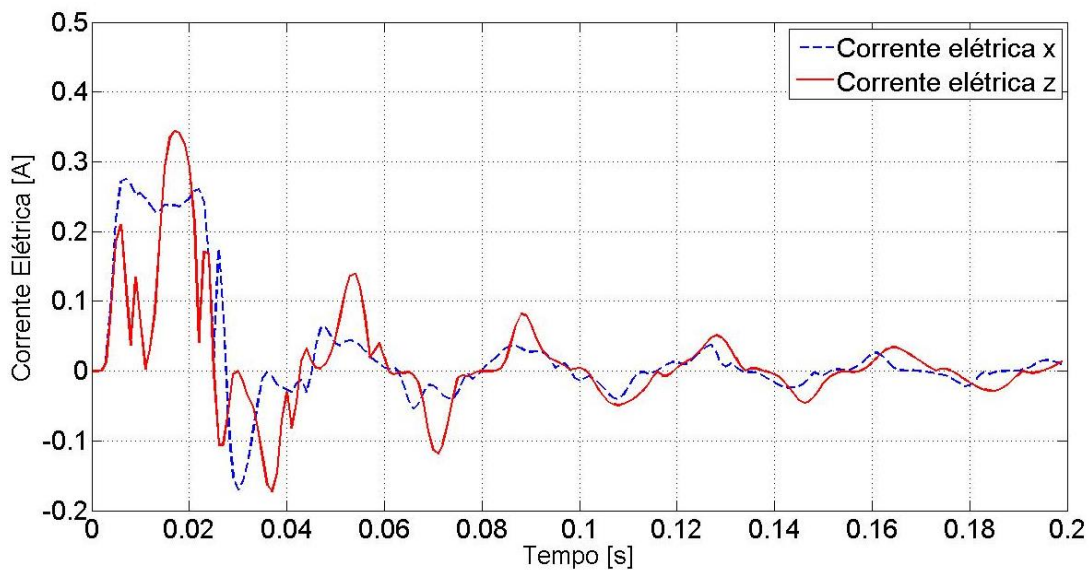


Figura 6 - Corrente elétrica (Entrada impulsiva)

Analisando a Fig. 6 nota-se que a corrente elétrica de controle nos atuadores eletromagnéticos acompanha a perturbação provocada pela entrada impulsiva, agindo de forma a controlar o sistema. Fato evidenciado pela diminuição da resposta ao longo do tempo.

Sabe-se que as duas velocidades críticas do rotor estão próximas de 1640 [rpm] e 1680 [rpm]. Diante disso, a velocidade de rotação escolhida para o segundo caso foi 1660 [rpm], tendo em vista que esta velocidade está entre as duas primeiras velocidades críticas do rotor.

Considerando o segundo caso, no qual a velocidade de rotação é constante, a Fig. 7 mostra o deslocamento nas direções x e z .

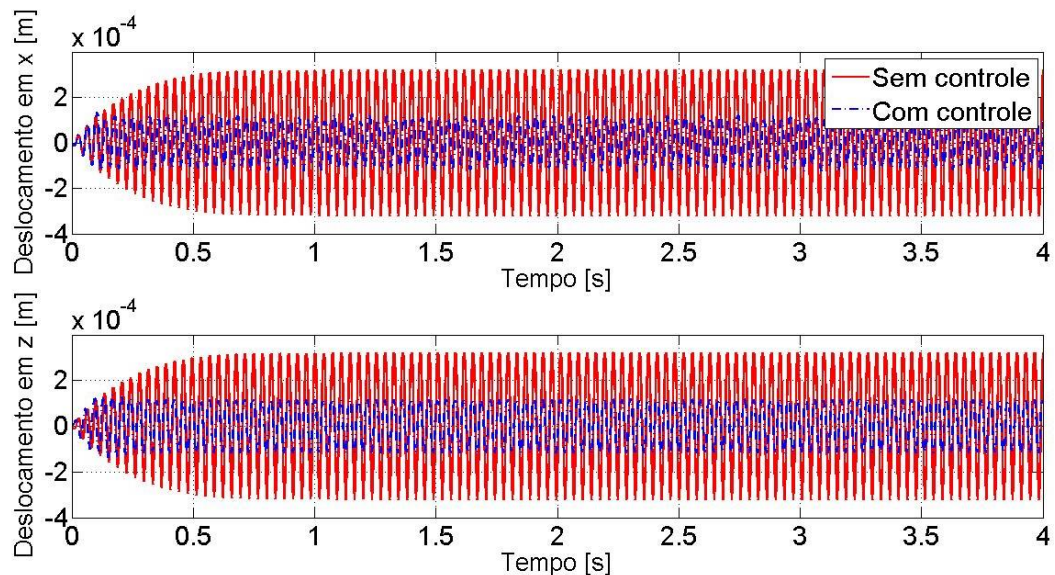


Figura 7 - Deslocamentos para velocidade constante de 1660 [rpm]

Pela observação do gráfico apresentado na Fig. 7 é evidente a redução dos níveis de deslocamento do sistema utilizando o controle ativo. Na direção x a amplitude de pico a pico teve uma redução de $3,19 \times 10^{-4}$ [m] para $1,20 \times 10^{-4}$ [m] e na direção z a redução é de $3,16 \times 10^{-4}$ [m] para $1,16 \times 10^{-4}$ [m]. Estes valores representam aproximadamente 62,38% e 63,29%, para as direções x e z , respectivamente.

A Figura 8 apresenta os níveis de corrente elétrica utilizado pelos atuadores eletromagnéticos durante o teste de velocidade constante.

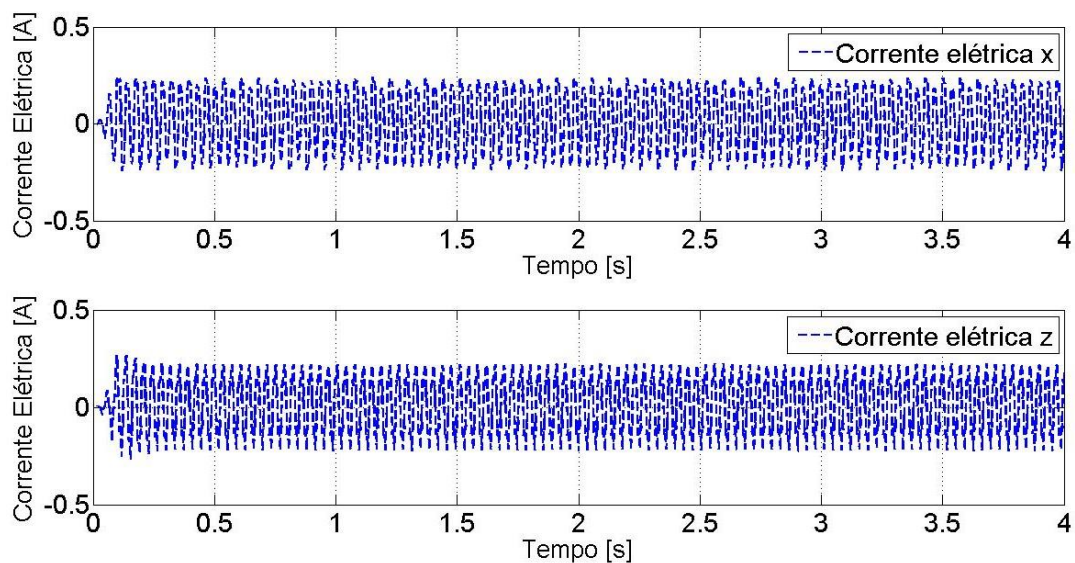


Figura 8 - Corrente elétrica (velocidade constante 1660 rpm)

Em outra situação foi feito o teste *run-up*, onde a velocidade de rotação é acelerada de 1000 [rpm] até 2500 [rpm] em 8 [s], desta forma passando pelas velocidades críticas do rotor, sendo assim a Fig. 9 mostra a atenuação da resposta do sistema quando a velocidade de rotação passa pelas velocidades críticas.

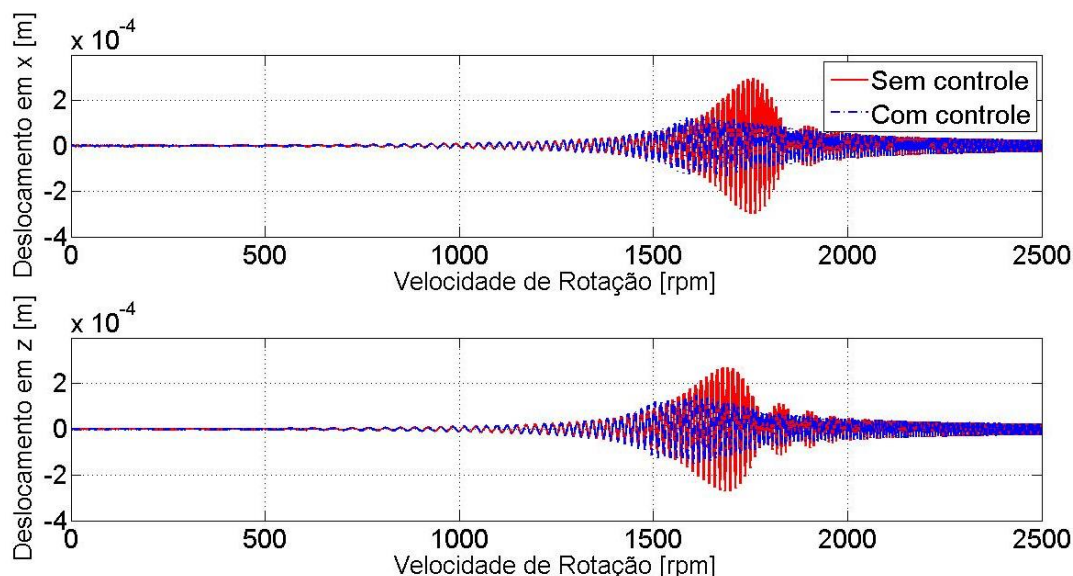


Figura 9 - Níveis de deslocamento para o teste *run-up*

Na Figura 9, verifica-se a redução da amplitude de pico-a-pico de $2,97 \times 10^{-4}$ [m] para $1,00 \times 10^{-4}$ [m] na direção x, e ao longo da direção z uma redução de $2,69 \times 10^{-4}$ [m] para $1,12 \times 10^{-4}$ [m]. Estas reduções representam aproximadamente 66,32% e 58,36% para direções x e z respectivamente.

A corrente elétrica utilizada pelos atuadores eletromagnéticos é apresentada na Fig. 10.

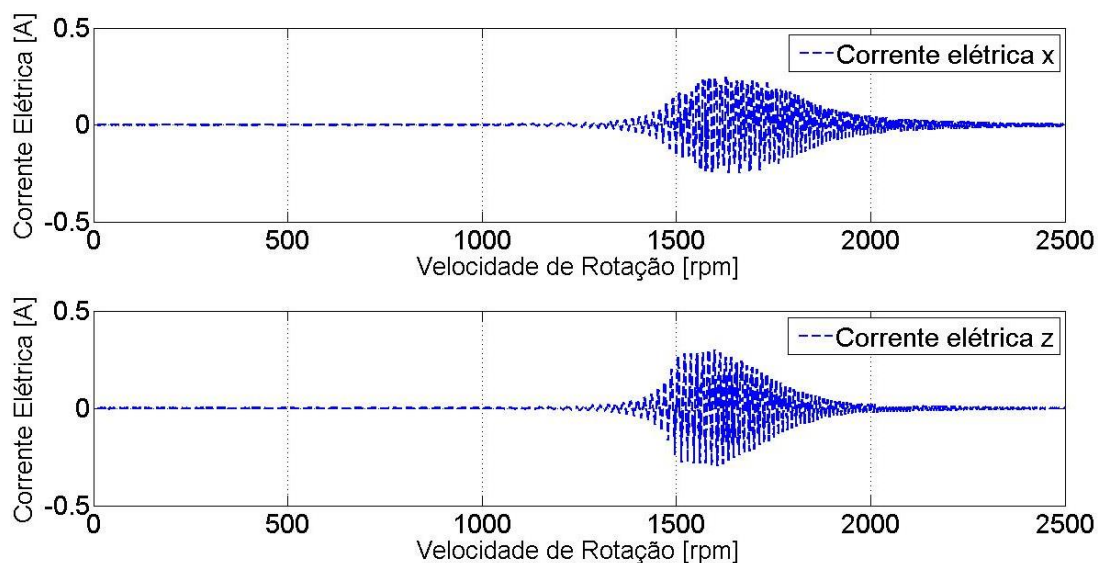


Figura 10 - Corrente elétrica para o teste *run-up*

Observa-se que as correntes elétricas estão separadas apenas em direções de x e z, sendo que as correntes positivas em x são atribuídas ao AEM 1 e as correntes negativas ao AEM 2. De forma análoga é feito para a direção z, onde a corrente controla os AEMs 3 e 4. Este resultado demonstra que quanto maior a diminuição da resposta do sistema utilizando controle ativo de vibrações por meio de atuadores eletromagnéticos maior o aumento no consumo de energia, demonstrado pela corrente elétrica utilizada por estes atuadores conforme mostrado na Fig. 10.

Vale ressaltar que todas as medidas foram coletadas no nó 8 da estrutura.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar uma técnica de controle que realiza uma combinação da teoria de Lógica Fuzzy e Controle $\mathcal{H}_\infty$ para controlar o comportamento dinâmico de um rotor flexível em ambiente computacional, através do software MatLab®. Com este propósito a controlabilidade e a observabilidade foram verificadas, onde constatou-se que, o sistema era tanto controlável como observável considerando apenas os quatro primeiros modos, sendo este modelo reduzido utilizado para o projeto do estimador e dos controladores locais.

Os conceitos de lógica fuzzy baseada no modelo de Takagi-Sugeno foram imprescindíveis para solução dos problemas de não-linearidade. Utilizou-se controladores baseados na minimização da norma $\mathcal{H}^\infty$ para determinar o ganho dos controladores dos modelos locais.

Para avaliação da eficiência do método, foram realizados três diferentes testes, o primeiro uma entrada impulsiva, o segundo com velocidade constante e o terceiro aplicando aceleração rotacional ao sistema de forma a passar pelas primeiras velocidades críticas.

Os resultados obtidos, demonstram a eficiência da utilização da lógica fuzzy para o controle de sistemas rotativos, visto expressiva atenuação dos níveis de vibração em todos os testes. O modelo Takagi-Sugeno, vinculado com a compensação paralela, permitiu a solução da não-linearidade do AEM através da solução por meio de modelos locais via síntese de controle $\mathcal{H}^\infty$, controlando assim, o sistema global. De um modo geral, pode-se concluir que a metodologia proposta e as ferramentas utilizadas foram válidas, tornando possível sua utilização para melhorar o desempenho do controle ativo de vibrações em rotores flexíveis utilizando atuadores eletromagnéticos. O bom funcionamento da técnica adotada determina aplicações mais complexas em estudos futuro.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do presente trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- Assunção, E., Marchesi, H.F., Teixeira, M.C.M. and Peres, P.L.D., 2002, “Otimização Global Rápida para o Problema de Redução H^∞ de Modelos”, XIV Congresso Brasileiro de Automática, in CD-Rom, Natal, Brasil.
- Bueno, D. D., 2007, “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, Brasil.
- Cardim, R., 2009, “Projeto de Controladores Baseados em LMIs: Realimentação Derivativa e Sistemas Chaveados Utilizando Estrutura Variável”. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- Chen, K. Y., Tung, P. C., Tsai, M. T. and Fan, Y. H., 2009, “A Self-Tuning Fuzzy PID-Type Controller Design for Unbalance Compensation in an Active Magnetic Bearing”, *Expert Systems with Applications*, v. 36, pp. 8560–8570.
- Der Hagopian, J. and Mahfoud, J., 2010, “Electromagnetic actuator design for the control of light structures”, *Smart Structures and Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 29-38.
- Gaino, R., 2009, “Controle de Movimentos de Pacientes Paraplégicos Utilizando Modelos Fuzzy T-S”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil, 178p.
- Gawronski, W., 1998, “Dynamics and Control of Structures: A Modal Approach”. 1.ed., Springer Verlag, New York, USA. 231p.
- Koroishi, E. H. and Steffen Jr, V., 2011, “Using Fuzzy Logic in the Active Vibration Control of a Rotor System Containing an Electromagnetic Actuator”, In: 32th Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), Proceedings of 32th Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), Ouro Preto, Brazil.
- Koroishi, E. H., Borges, A. S., Cavalini, A. AP. and Steffen Jr, V. 2014, “Numerical and Experimental Modal Control of Flexible Rotor Using Electromagnetic Actuator”. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2014, p. 1-14.
- Lalanne, M. and Ferraris, G., 1997, “Rotordynamics Prediction in Engineering”, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York, USA.
- Malhis, M., 2002, “Controle Actif Modal Flou des Rotors Flexibles par Plan D’Action Piezoelectrique”. Tese de Doutorado, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (Insa), Lyon, France, 124p.
- Ogata, K. 2003, “Engenharia de Controle Moderno”, 4 ed., Prentice Hall, São Paulo, Brasil.
- Saldarriaga, M. V., 2007, “Atenuação de Vibrações em Máquinas Rotativas Flexíveis Usando Materiais Viscoelásticos nos Suportes”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 111p.
- Tanaka, K. and Wang, H. O., 2001, “Fuzzy Control Systems Design and Analysis. 1st. ed. Canada: John Wiley Professional, 432 p.

9. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DESIGN OF $\mathcal{H}_\infty$ CONTROLLERS APPLIED TO A FLEXIBLE ROTOR FOR VIBRATION REDUCTION

Daniel Almeida Colombo, danielcolombo@alunos.utfpr.edu.br¹

Renan Franco Corrêa, renancorrea@alunos.utfpr.edu.br¹

Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹

Fabian Andres Lara-Molina, fabianmolina@utfpr.edu.br¹

Erik Taketa, eriktaketa@alunos.utfpr.edu.br¹

¹Federal University of Technology, Avenue Alberto Carazzai, 1640 CEP: 86300-000 - Cornélio Procópio/PR

Abstract. *The present work develops and applies a control technique that performs a combination of Logic Fuzzy theory and $\mathcal{H}_\infty$ norm to control the dynamical behavior of a flexible rotor. Electromagnetic actuators were used, they present a non-linear behavior given that its force is current and armature position-dependent. In order to solve the non-linearity problem, it was used the parallel distributed compensation in which the Fuzzy Logic performs a linear combination based in local models to solve non-linear systems. For each local model, a linear controller was developed using Linear Matrix Inequalities (LMI), then the set of local controllers are combined in a global controller by the Takagi-Sugeno Fuzzy model. It is worth comment that in the controllers design it was associated the minimization of $\mathcal{H}_\infty$ norm to ensure the system stability. The simulation results had shown the efficacy of these controllers given that the control proposed had reduced significantly the dynamical response of the system.*

Keywords: flexible rotor, fuzzy logic, $\mathcal{H}_\infty$ norm, vibration attenuation