

**DINCON 2017**CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES
30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

Controle *Fuzzy* aplicado em uma Viga de Material Compósito visando Atenuação de Vibrações

Camila Albertin Xavier da Silva¹Daniel Almeida Colombo²Fabian Andres Lara Molina³Edson Hideki Koroishi⁴

Departamento de Engenharia Mecânica, UTFPR, Cornélio Procopio, PR

Albert Willian Faria⁵

Departamento de Engenharia Civil, UFTM, Uberaba, MG

Resumo. O presente trabalho propõe o controle ativo de vibrações em uma viga de material compósito, utilizando atuadores eletromagnéticos, com intuito de obter uma redução na resposta do deslocamento do sistema. A teoria de controle utilizada foi o Controle *Fuzzy*, no qual é bem adequado para controlar estruturas com comportamento não-linear. O atuador eletromagnético foi linearizado utilizando uma metodologia similar a utilizadas em mancais magnéticos. Nas simulações numéricas obteve-se a resposta do deslocamento do sistema no domínio do tempo, e a função resposta em frequência, nas quais a vibração da viga e os dois primeiros modos de vibrar foram atenuados, demonstrando assim, a eficiência da metodologia proposta.

Palavras-chave. Controle Ativo de Vibrações, Lógica *Fuzzy*, Atuadores Eletromagnéticos, Material Compósito

1 Introdução

O controle tem se tornado de grande importância nos processos industriais e de produção, onde estas áreas vêm buscando meios de otimizar o desempenho de sistemas mecânicos. Dentre as técnicas presentes no controle moderno, tem-se o controle ativo de vibrações (AVC – do inglês

¹ camilaalbertin@hotmail.com

² danielcolombo@alunos.utfpr.edu.br

³ fabianmolina@utfpr.edu.br

⁴ edsonh@utfpr.edu.br

⁵ albert@icte.uftm.edu.br

Active Vibration Control), que nas últimas décadas tem apresentado grandes avanços e novas metodologias de controle. As pesquisas em engenharia visando o desenvolvimento destas novas metodologias, como novas técnicas de controle ativo de vibração, 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 [3].

Entre as técnicas conhecidas de controle ativo de vibrações, o Controle *Fuzzy* é adequado para controlar estruturas com comportamento não-linear, em que as características mudam consideravelmente ao longo do tempo. Este controle apresenta grande eficiência na atenuação de vibração e também vem apresentando aplicações bem-sucedidas em diversas áreas. E uma das áreas de grande interesse atualmente, é o estudo de materiais compósitos, materiais os quais possuem um arranjo inovador, caracterizados por sua leveza, resistência mecânica, e a possibilidade de otimização de condições de funcionamento específico. Tais materiais são formados por lâminas fibrosas em diferentes orientações, o que permite a adequação para aplicações particulares [8].

2 Propósito

No contexto destes sistemas mecânicos com ótimo desempenho, este trabalho propõe o uso do controle ativo modal de vibrações em uma viga de material compósito, utilizando atuadores eletromagnéticos por meio da aplicação da Lógica *Fuzzy*, com o objetivo de analisar o comportamento da resposta dinâmica, visando a atenuação de vibrações.

2.1 Lógica *Fuzzy*

A Lógica *Fuzzy* tem por finalidade o estudo dos princípios formais de raciocínio aproximado. Ela propõe o uso de valores intermediários na faixa de zero até um, ao invés de usar apenas esses dois valores com preposições de verdadeiro ou falso. Essa variação de zero até um, representa a variação entre a completa falsidade e a verdade absoluta [1].

A lógica *fuzzy* é frequentemente aplicada nos sistemas de controle. Assim como um sistema de controle, que consiste na realimentação da planta do sistema para obtenção da resposta desejada, a lógica *fuzzy* é semelhante, no entanto ela requer o processo de “fuzzificação” e “defuzzificação”. A fuzzificação tem a finalidade da conversão dos valores absolutos do processo para um conjunto de valores nebulosos, usando um gerador de entradas para um mecanismo de inferência. A defuzzificação é necessária para a transformação do valor *fuzzy* em um valor real, para assim obter a resposta desejada nos sistemas reais.

3 Métodos

No presente trabalho, o controle ativo modal é usado para o controle da estrutura compósita. Na Figura 1 é ilustrado a forma esquemática da qual o controle ativo modal é utilizado, onde δ corresponde ao deslocamento, X ao estado modal, F_{exc} a força externa e i a corrente elétrica. A Figura 1 mostra que no estado modal a realimentação necessita de um número de controladores. O esquema requer deslocamentos e velocidades modais para determinar o esforço de controle dos controladores.

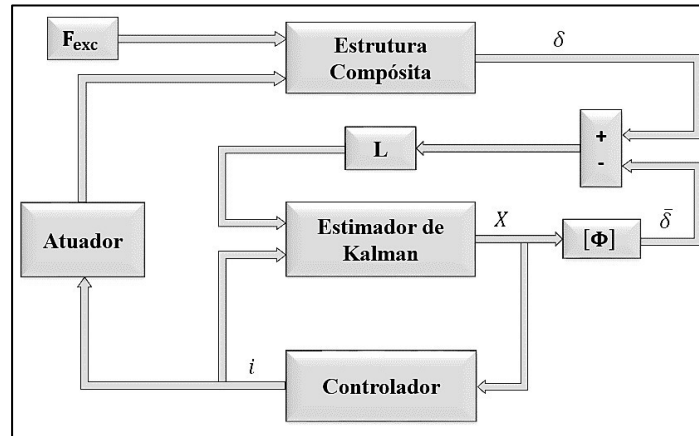


Figura 1: Controle ativo modal baseado na realimentação do controle no estado modal (adaptado de [5]).

A viga de material compósito estudada no presente trabalho é ilustrada na Figura 2. A viga tem 306 mm de comprimento, 25.5 [mm] de largura e 1 [mm] de espessura, e é formada por 5 camadas de grafite/epóxi de espessura de 0.2 [mm]. As camadas possuem as orientações de $[45^\circ / 0^\circ / 45^\circ / 0^\circ / 45^\circ]$, em que as de orientação de 0° são paralelas ao eixo x.

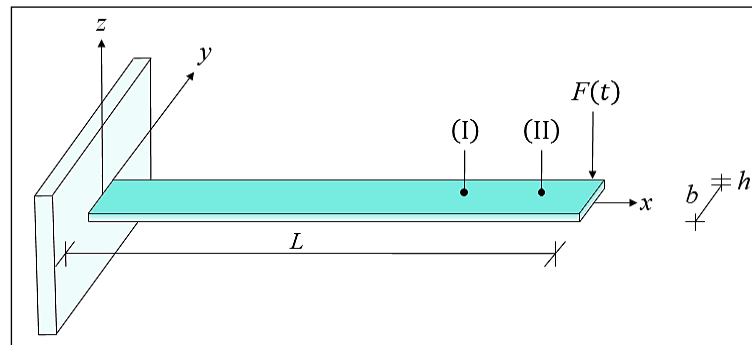


Figura 2: Viga de material compósito em engaste-livre (adaptado de [4]).

As constantes de rigidez elástica da viga em material compósito, feita de grafite/epóxi (AS4/3501) dada em [GPa], são, respectivamente: $C_{11} = 173.6$; $C_{22} = C_{33} = 7.61$; $C_{12} = C_{13} = 2.48$; $C_{23} = 2.31$; $C_{44} = 1.38$; $C_{55} = C_{66} = 3.45$. Dos pzt's são: $C_{11} = C_{22} = C_{33} = 102.23$; $C_{12} = C_{13} = C_{23} = 5.035$; $C_{44} = C_{55} = C_{66} = 2.594$. A densidade de massa da viga de material compósito é $1578 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ [2].

Na Figura 3 é representado um esquema do atuador eletromagnético utilizado no presente trabalho, em seguida a Tabela 1 apresenta os parâmetros deste atuador.

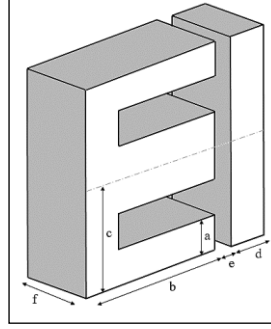


Figura 3: Modelo do atuador eletromagnético [4].

Tabela 1: Parâmetros do núcleo e da bobina [4].

μ_0 (H/m)	μ_r	N (espiras)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	i_b (A)
$4\pi 10^{-7}$	700	250	9,5	38	28,5	9,5	0,5	22,5	0,1

A corrente elétrica é determinada pela planta de controle e, desta forma, ela é determinada de acordo com a solicitação do sistema. A permeabilidade relativa μ_r 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, seu valor deve ser determinado [9]. Para isso, um dos meios adotados é, por exemplo, utilizar técnicas de otimização.

A bobina é composta de 250 espiras, de fio de cobre do padrão AWG24. As características do fio, segundo o padrão, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Fio de cobre AWG24 [4].

Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Resistência a 20°C (Ohm/m)	Corrente Máxima (A)
0,511	0,205	0,0842	3,5

A força de atração entre os dois elementos do núcleo ferromagnético é representada pela equação (1).

$$F_{AEM} = \frac{\partial W_{cmag}}{\partial x_m} = \frac{N^2 I^2 \mu_0 a f}{2 \left((e \pm \delta) + \frac{b + c + d - 2a}{\mu_r} \right)^2} \quad (1)$$

Sendo I a corrente elétrica, δ a variável que se acrescenta ao entreferro para representar a vibração da viga na posição do AEM. Vale ressaltar que o AEM aplica apenas força de atração e, desta forma, o sinal “ $\pm$ ” deve ser assim entendido: o valor “+” para $\delta > 0$; e “-” para $\delta < 0$.

Nota-se pela equação (1) que a amplitude da força F_{AEM} , depende do deslocamento no interior do atuador, tal fato caracteriza uma não linearidade. Diante disto, o modelo do atuador foi linearizado segundo o procedimento apresentado por [6, 7], no qual tem-se a linearização do atuador eletromagnético utilizando uma metodologia similar à aplicada aos mancais magnéticos. A força eletromagnética na forma linearizada, é apresentada pela equação (2), onde tem-se uma aproximação linear da relação verdadeira, e precisa apenas da proximidade do ponto de operação.

$$F_{AEM} = k_i i - k_x x \quad (2)$$

Sendo k_i o ganho do atuador, i a corrente elétrica, k_x a rigidez e x o deslocamento.

Neste trabalho é utilizado dois atuadores eletromagnéticos (AEM1 e AEM2), ambos atuando na direção z .

Os atuadores eletromagnéticos foram posicionados na extremidade livre da viga, onde se encontram os maiores deslocamentos. Cada atuador age separadamente, aplicando apenas força de atração.

Na simulação numérica, a força de excitação de carga 1 [N] é aplicada no ponto (II) ilustrado na Figura 2 e as respostas no domínio do tempo são capturadas no ponto (I). O atuador eletromagnético é conectado com um sistema de controle ativo, assim as amplitudes de vibração são minimizadas com o tempo. Para uma melhor semelhança possível com o comportamento real, é sobreposto ruídos brancos nos cálculos dos deslocamentos.

4 Resultados

Para análise da eficiência desta metodologia considerando a técnica de controle *fuzzy*, em termos de atenuação de vibração, foram confrontados graficamente a redução da resposta do deslocamento do sistema, a função resposta em frequência e a corrente utilizada pelos atuadores eletromagnéticos. A Figura 4 apresenta a resposta do deslocamento do sistema no domínio do tempo nas situações: sem controle e com controle *fuzzy*, em seguida a Figura 5 apresenta a função resposta em frequência também para as duas situações.

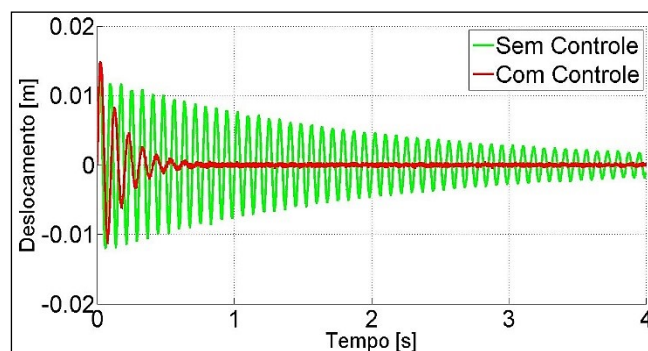


Figura 4: Resposta do deslocamento no domínio do tempo.

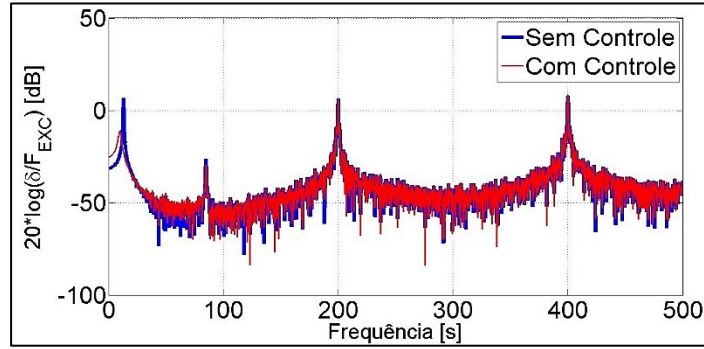


Figura 5: Função Resposta em Frequência.

A Figura 6 apresenta a corrente elétrica utilizada pelos atuadores eletromagnéticos.

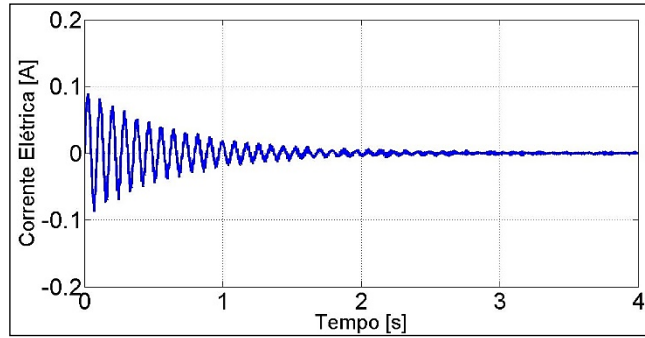


Figura 6: Corrente elétrica com a aplicação do controle *fuzzy*.

5 Discussões

Pela análise da Figura 4, pode-se observar que o controle *fuzzy* estabilizou o deslocamento do sistema num tempo de 0.7 [s], mostrando assim, que o controle *fuzzy* é eficiente na redução da resposta do deslocamento no domínio do tempo. Nota-se na Figura 5, a diminuição dos picos de frequência, sendo o primeiro modo atenuado cerca de 19.6 [dB], o segundo modo cerca de 3.4 [dB]. Os modos mais elevados não apresentaram excedentes com o uso do controle.

Analizando a Figura 6, a corrente elétrica utilizada nos atuadores eletromagnéticos apresenta maiores picos quando a resposta da Figura 4 apresenta os maiores deslocamentos.

6 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo a atenuação de vibrações em uma viga de

material compósito utilizando atuadores eletromagnéticos por meio da aplicação do controle *fuzzy*. Os resultados se mostraram satisfatórios, na qual a resposta do sistema foi atenuada num tempo de 0.7 [s], mostrando assim, que a metodologia proposta foi eficiente na atenuação da resposta do deslocamento e ainda os dois primeiros modos foram atenuados cerca de 19.6 [dB] para o primeiro modo, e 3.4 [dB] para o segundo modo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Araucária pelo suporte financeiro para a realização do trabalho.

Referências

- [1] A.O. Artero, Inteligência Artificial: teórica e prática, Ed. Livraria da Física, São Paulo, Brasil, (2009).
- [2] A. W. Faria, Modelagem por Elementos Finitos de Placas Compostas Dotadas de Sensores e Atuadores Piezolétricos: Implementação Computacional e Avaliação Numérica. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia - MG, 152 f, (2006).
- [3] D. D. Bueno, Controle Ativo de Vibrações e Localização Ótima de Sensores e Atuadores Piezelétricos, Dissertação de Mestrado, Ilha Solteira, (2007).
- [4] E. H. Koroishi, Controle de Vibrações em Máquinas Rotativas utilizando Atuadores Eletromagnéticos, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 225f, (2013).
- [5] E.H. Koroishi, F. A. Lara-Molina, A. W. Faria and V. Steffen Jr, Robust Control Applied to a Composite Laminated Beam, J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.7, No 1, pp.70-80, Jan.-Mar., 2015, doi: 10.5028/jatm.v7i1.389, (2015).
- [6] E. H. Koroishi and V. Steffen Jr, Active Vibration Control Using Electromagnetic Actuator: A simple Model Approach. 10^a DINCON (2011).
- [7] E. Maslen, Magnetic Bearings, University of Virginia, Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, Charlottesville, Virginia, 233 p, (2000).
- [8] J.N. Reddy, Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis, Second Edition, CRC Press, London, UK, (1997).
- [9] T. F. Edgar, D. M. Himmelblau and L. S. Lasdon, Optimization of Chemical Process, Second edition, New York: McGraw-Hill Chemical Engineering Series, (2001).