

## CONTROLE NEURO-FUZZY APLICADO EM UMA VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO

Camila Albertin Xavier da Silva, camilaalbertin@hotmail.com<sup>1</sup>

Joana Pereira Repinaldo, joanarepinaldo@hotmail.com<sup>1</sup>

Willian Faria dos Santos, wfsantos92@hotmail.com<sup>1</sup>

Daniel Almeida Colombo, danielcolz28@gmail.com<sup>1</sup>

Fabian Andres Lara-Molina, fabianmolina@utfpr.edu.br<sup>1</sup>

Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br<sup>1</sup>

Albert Willian Faria, albert@icte.uftm.edu.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio, Avenida Alberto Carazzai 1640, 86300-000, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Avenida Guilherme Ferreira 1940, 38022-200, Uberaba, Minas Gerais, Brasil.

**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 no deslocamento do sistema. A teoria de controle utilizada foi a Neuro-Fuzzy, a qual consiste na combinação de redes neurais artificiais com a Lógica Fuzzy para o desenvolvimento de um sistema de controle ativo de vibrações. O atuador eletromagnético utilizado foi linearizado utilizando uma metodologia similar a utilizadas em mancais magnéticos. Nas simulações numéricas obteve-se o deslocamento do sistema no domínio do tempo e da frequência utilizando tanto controle Fuzzy como Neuro-Fuzzy, demonstrando assim, a eficiência da metodologia proposta. Também foram obtidas a resposta do sistema no domínio da frequência, assim como o gráfico das correntes utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos.

**Palavras-chave:** Controle Ativo de Vibrações, Neuro-Fuzzy, Atuadores Eletromagnéticos, Material Compósito

### 1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos são amplamente utilizados em áreas industriais, médicas e militares (Sheeraki *et al.*, 2017), e nos últimos anos o controle ativo de vibrações nestas estruturas vem atraindo o interesse de pesquisadores devido as limitações de peso, espaço e posicionamento em algumas aplicações industriais.

Métodos de controle ativo utilizando a lógica Fuzzy, diferente dos controles tradicionais, não necessitam do modelo matemático do sistema. Estes controladores trabalham com informações inexatas através de informações linguísticas de especialistas humanos (Chen, 2011), fornecendo assim uma estrutura de controle capaz de lidar com incertezas. Entretanto, a precisão do controle Fuzzy está associada as dificuldades na determinação efetiva dos parâmetros e regras linguísticas. Uma alternativa para solucionar este problema é o emprego de Redes Neurais Artificiais para otimização do controlador Fuzzy.

Na combinação de sistemas Fuzzy e Redes Neurais Artificiais surge o controle baseado em sistemas híbridos Neuro-Fuzzy, o qual incorpora as vantagens das redes neurais, como a habilidade de aprendizagem e otimização, com as vantagens da lógica nebulosa, dos sistemas Fuzzy (Sánchez *et al.*, 2012)

Neste contexto, este trabalho propõe a combinação de rede neurais artificiais com a lógica Fuzzy para o desenvolvimento de um sistema de controle ativo de vibrações Neuro-Fuzzy em estruturas de materiais compósitos, ajustando e otimizando, através da técnica de aprendizagem, os parâmetros do controle Fuzzy.

### 2. MODELO DE SISTEMA

A modelagem da viga estudada no presente trabalho foi apresentada por Faria (2006), na qual sua respectiva matriz global é mostrada na Eq. (1).

$$[M_g]\{\ddot{u}_g\} + [K_{uu}]\{u_g\} = \{F_g\} \quad (1)$$

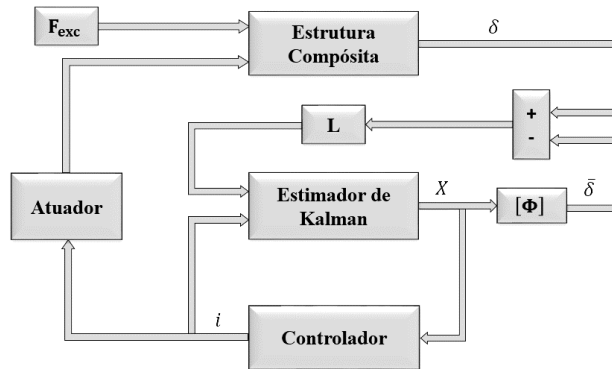
Onde  $[M_g]$  é a matriz de massa global,  $[K_{uu}]$  matriz de rigidez elástica global,  $[u_g]$  o vetor de deslocamento global,  $[\ddot{u}_g]$  a derivada segunda do deslocamento, ou seja a aceleração global, e  $[F_g]$  corresponde respectivamente a força de excitação global.

O sistema apresentado pela Eq. (1) possui um alto número de graus de liberdade, por isso, foi necessário aplicar uma técnica de redução de modelo, a fim de garantir a controlabilidade e a observabilidade do sistema. O modelo reduzido é obtido negligenciando os estados associados a pequenos valores singulares (Meirovitch, 1990).

A realização balanceada mínima do sistema é assintoticamente estável se os gramianos de controlabilidade e observabilidade forem iguais e diagonais (Zhou *et al.*, 1998).

### 3. ABORDAGEM DE CONTROLE

O controle ativo modal é utilizado para o controle da estrutura compósita no presente trabalho. Na Fig. 1 é ilustrado a forma esquemática da qual o controle ativo modal é utilizado, onde  $\delta$  corresponde ao deslocamento,  $X$  ao estado modal,  $F_{exc}$  a força externa e  $i$  a corrente elétrica.



**Figura 1. Controle ativo modal baseado na realimentação do controle no estado modal (adaptado de Mahfoud *et al.*, 2011)**

No esquema apresentado na Fig. 1, a estrutura compósita, representada pela Eq. (1), foi então descrita na forma de espaço de estados para as simulações numéricas, onde o estimador de Kalman determina os estados modais exigidos pelo controlador.

O estimador de Kalman é utilizado quando se deseja minimizar os efeitos de ruídos nos sinais de entrada e saída do sistema, e também para estimar os estados e saídas do sistema (Welch *et al.*, 1995). A Eq. (2) representa o filtro de Kalman:

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} + [L]\{\delta(t) - \bar{\delta}(t)\} \quad (2)$$

onde  $[L]$  é a matriz de ganho, determinada usando o comando `lqe.m` no *software* Matlab®,  $\delta(t)$  é o vetor de deslocamento e  $\bar{\delta}(t)$  o vetor de deslocamento estimado.

Na Fig. 1 é possível observar 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.

No presente trabalho foram utilizadas técnicas de controle utilizando a lógica *Fuzzy* e a combinação da lógica *Fuzzy* com redes neurais para determinar o ganho do controlador.

### 4. 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 (Artero, 2009).

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.

#### 4.1. Controle Fuzzy Modal

A fuzzificação dos modos do controlador, é a primeira etapa no presente sistema de controle. Considerando os modos do controlador como  $\{X_I(t)\}$ , a relevância de cada variável das funções “positiva” e “negativa” do software GBELL Matlab®, é dada pela Eq. (3).

$$\mu_A(X_I(t)) = \frac{1}{1 + \left| \frac{X_I(t) - c_f}{a_f} \right|^{b_f}} \quad (3)$$

Onde  $a_f$ ,  $b_f$  e  $c_f$  são parâmetros da função GBELL.

O mecanismo de inferência, etapa na qual as implicações *fuzzy* são utilizadas para simular tomadas de decisões humanas a partir das regras impostas, implementa a função “mínimo”  $w_j$ .

A Tab. 1 apresenta as regras aplicadas ao controlador *Fuzzy* em estruturas flexíveis (Koroishi *et al*, 2011).

**Tabela 1. Regras controlador Fuzzy.**

| Regras | Condição                                    | Decisão  |
|--------|---------------------------------------------|----------|
| 1      | Deslocamento positivo e velocidade positiva | Ação     |
| 2      | Deslocamento positivo e velocidade negativa | Sem ação |
| 3      | Deslocamento negativo e velocidade positiva | Sem ação |
| 4      | Deslocamento negativo e velocidade negativa | Ação     |

Após o mecanismo de inferência, o próximo passo é a defuzzificação. Para a defuzzificação é preciso obter conhecimento das variáveis *Fuzzy* correspondentes as regras impostas e ao conjunto dessas regras, e também sua função de saída.

No presente trabalho é utilizado o modelo Takagi-Sugeno por apresentar uma boa adaptação ao controle computacional em tempo real. As funções para as quatro condições referentes a Tab. 1 são representadas na Eq. (4), com  $z_1$  correspondendo a “sem ação” e  $z_2$  a “ação”.

$$z_1 = 0 \text{ e } z_2 = \alpha_i q_i + \beta_i \dot{q}_i \quad (4)$$

Onde  $\alpha_i$  corresponde respectivamente a cargas atribuídas ao deslocamento e  $\beta_i$  a cargas atribuídas a velocidade, ambas do modo  $i$ .

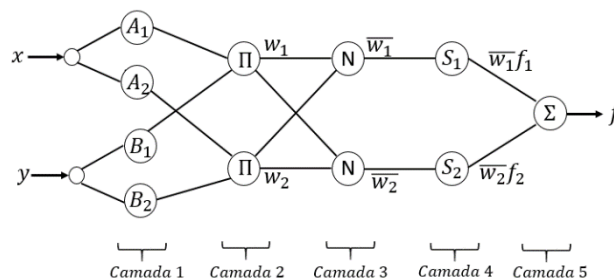
A força motriz do modo  $i$ , obtida na saída do controlador é representada na Eq. (5).

$$F_I = \frac{\sum_{j=1}^2 w_j z_j}{\sum_{j=1}^2 w_j} \quad (5)$$

#### 5. NEURO-FUZZY

O sistema Neuro-Fuzzy baseia-se na arquitetura denominada Sistema de Inferência Adaptativo Neuro-Difuso (ANFIS) desenvolvida por Jang (1995), a qual consiste na previsão e aproximação de funções a partir dos dados de entradas, do tipo e número das funções de pertinência e dos dados de saída, com isso otimizando os parâmetros da lógica *Fuzzy* para a planta representada.

A arquitetura ANFIS para este sistema possui cinco camadas de neurônios apresentada na Fig. 2, cada camada tem a finalidade descrita a seguir (Jang, 1995).



**Figura 2. Arquitetura ANFIS.**

Na camada 1 calcula-se o grau de pertinência das entradas  $x$  e  $y$ , deslocamento e velocidade respectivamente, baseada na função de pertinência escolhida. Neste trabalho foram utilizadas duas funções de pertinências *gbell* para cada entrada, conforme a Eq. (6).

$$\mu_{Ai}(x), \mu_{Bi}(x), \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

Cada neurônio da camada 2 executa a operação de interseção entre as funções de pertinência, conforme a Eq. (7), tendo como resultado o grau de aplicabilidade ( $w_i$ ) de uma regra.

$$w_i = \mu_{Ai}(x) \times \mu_{Bi}(x), \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

Na terceira camada são realizadas as normalizações das funções de pertinência. Calculada em cada nó a razão entre a aplicabilidade da  $i$ -ésima regra e o somatório das aplicabilidades de todo o sistema de regras. As saídas dos nós desta camada são dadas a partir da Eq. (8).

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

Na quarta camada estão os parâmetros consequentes da regra com função de ativação. Sendo que os valores  $f_1$  e  $f_2$  correspondem aos parâmetros a serem ajustados (combinações lineares das entradas), conforme a Eq. (9).

$$\begin{aligned} f_1 &= p_1x + q_1y + r_1 \\ f_2 &= p_2x + q_2y + r_2 \end{aligned} \quad (9)$$

O nó da última camada da arquitetura calcula a saída do sistema e, juntamente com os nós das camadas 3 e 4, promove a defuzzificação ou soma total de todos os sinais de entrada, conforme a Eq. (10).

$$\sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

Os parâmetros de cada camada de neurônios são atualizados de acordo com dados de treinamento e do procedimento de aprendizagem. A regra de aprendizagem híbrida, utilizada neste trabalho, combina o método de gradiente descendente nos parâmetros antecedentes e os mínimos quadrados para estimar ou identificar parâmetros consequentes.

A rede de neurônios tem como função o aprendizado com base no conjunto de entrada-saída desejado. No treinamento da ANFIS utilizada neste trabalho, utilizou-se duas funções de pertinência (*gbell*) para cada entrada, função de pertinência de saída Sugeno linear, erro zero, treinamento híbrido e 100 épocas para o treinamento da rede.

## 6. ATUADOR ELETROMAGNÉTICO

Na Fig. 3 é representado um esquema do atuador eletromagnético utilizado no presente trabalho, em seguida a Tab. 2 apresenta os parâmetros deste atuador.

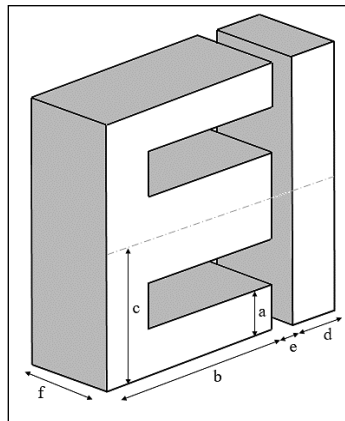


Figura 3. Modelo do atuador eletromagnético (Koroishi, 2013).

Tabela 2. Parâmetros do núcleo e da bobina (Koroishi, 2013).

| $\mu_0$<br>(H/m) | $\mu_r$ | $N$<br>(espiras) | $a$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $c$<br>(mm) | $d$<br>(mm) | $f$<br>(mm) | $i_b$ (A) |
|------------------|---------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| $4\pi 10^{-7}$   | 700     | 250              | 9,5         | 38          | 28,5        | 9,5         | 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  $\mu_r$  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 [8]. 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

A força de atração entre os dois elementos do núcleo ferromagnético é representada pela Eq. (11).

$$F_{AEM} = \frac{\partial W_{cmag}}{\partial x_m} = \frac{N^2 I^2 \mu_0 a f}{2 \left( (e \pm \delta) + \frac{b + c + d - 2a}{\mu_r} \right)^2} \quad (11)$$

Sendo  $I$  a corrente elétrica,  $\delta$  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 “+ ou -” deve ser assim entendido: o valor “+” para  $\delta > 0$ ; e “-” para  $\delta < 0$ .

Nota-se pela Eq. (11) 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 (Koroishi *et al.*, 2011; Maslen, 2000) 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 Eq. (12), onde tem-se uma aproximação linear da relação verdadeira, e precisa apenas da proximidade do ponto de operação.

$$F_{AEM} = k_i i - k_x x \quad (12)$$

Sendo  $k_i$  o ganho de corrente,  $i$  a corrente elétrica,  $k_x$  a rigidez e  $x$  o deslocamento.

Neste trabalho, são utilizados dois atuadores eletromagnéticos (AEM1 e AEM2), ambos atuando na direção  $z$ .

Os atuadores eletromagnéticos foram posicionados na extremidade livre da viga, conforme a Fig. 4, onde se encontram os maiores deslocamentos. Cada atuador age separadamente, aplicando apenas força de atração.

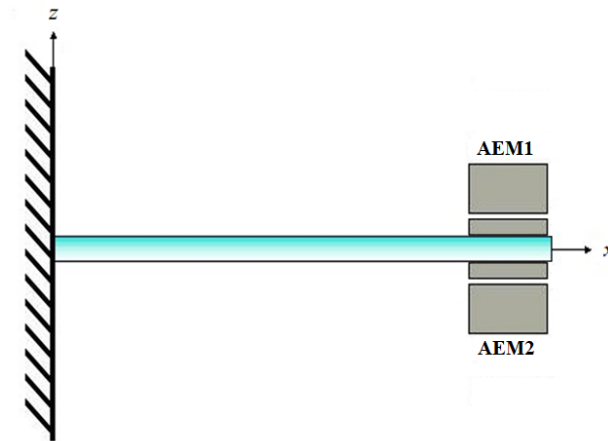
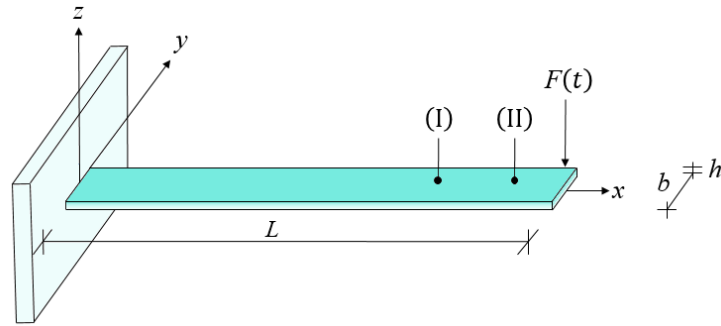


Figura 4. Posicionamento dos atuadores eletromagnéticos na viga de material compósito em engaste-livre.

## 7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A viga de material compósito estudada no presente trabalho (Fig. 4) possui 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  $0^\circ$  são paralelas ao eixo  $x$  (Faria, 2006).



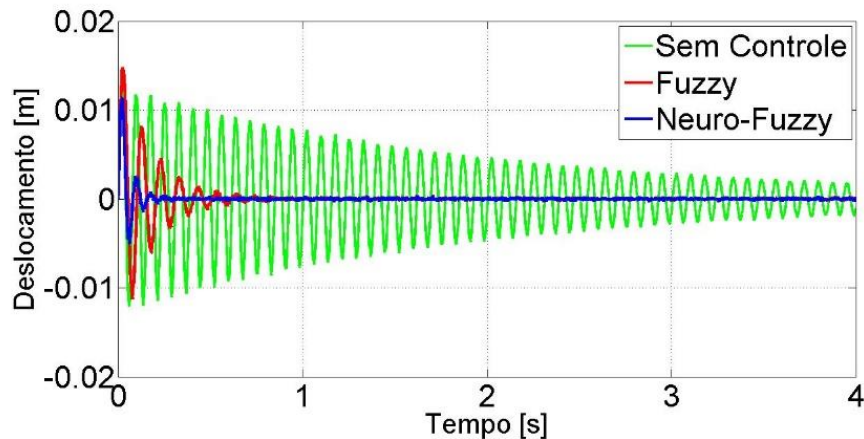
**Figura 5. Viga de material compósito em engaste-livre.**

As constantes de rigidez elástica da viga em material compósito, feita de grafite/epóxi (AS4/3501) dada em [GPa], são, respectivamente:  $C_{11} = 173,6$ ;  $C_{22} = C_{33} = 7,61$ ;  $C_{12} = C_{13} = 2,48$ ;  $C_{23} = 2,31$ ;  $C_{44} = 1,38$ ;  $C_{55} = C_{66} = 3,45$ . A densidade de massa da viga de material compósito é  $1578 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  (Faria, 2006).

Na simulação numérica, a força de excitação de carga  $1 \text{ [N]}$  é aplicada no ponto (II) ilustrado na Fig. 4 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.

## 8. RESULTADOS

Para análise da eficiência desta metodologia considerando as técnicas de controle *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*, em termos de atenuação de vibração, foram analisadas graficamente a redução da resposta do deslocamento do sistema, a função resposta em frequência e as correntes elétricas utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos. A Fig. 6 apresenta a resposta do deslocamento do sistema em domínio no tempo.



**Figura 6. Resposta do deslocamento em domínio no tempo utilizando as teorias de controle *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*.**

Analisando as respostas da Fig. 6, controle *Neuro-Fuzzy* atenuou a resposta do sistema num tempo inferior a  $0,5 \text{ [s]}$ , e o controle *Fuzzy* levou um de tempo de  $1,0 \text{ [s]}$  para a atenuação da resposta, mostrando assim que a metodologia envolvendo a teoria de controle *Neuro-Fuzzy* e *Fuzzy* foi eficiente para a atenuação da resposta de deslocamento do sistema, destacando-se o controle *Neuro-Fuzzy* pelo o menor tempo para a atenuação do deslocamento.

Ainda para análise do comportamento do sistema, é obtida a função resposta em frequência (FRF) dos 3 casos, sem controle, com controle *Fuzzy* e com controle *Neuro-Fuzzy*, conforme a Fig. 7.

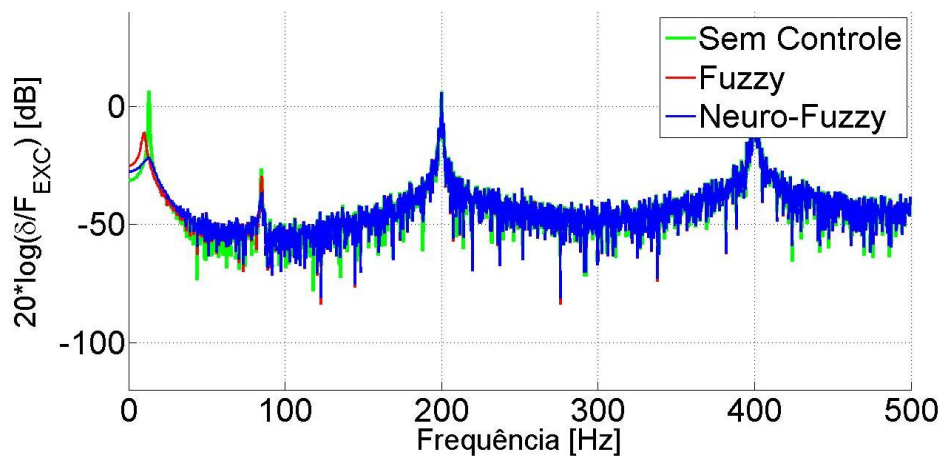


Figura 7. Função Resposta em Frequência.

Nota-se pela Fig. 7, a diminuição expressiva dos picos de frequência para o controle *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*, apresentando a atenuação dos dois primeiros modos, sendo o primeiro atenuado cerca de 19,62 [dB] utilizando o controle *Fuzzy* e 28,90 [dB] utilizando o controle *Neuro-Fuzzy*. Já o segundo modo atenuou cerca de 3,31 [dB] utilizando o controle *Fuzzy* e 10,0 [dB] utilizando o controle *Neuro-Fuzzy*. Os modos mais elevados não apresentaram excedentes com o uso do controle. Vale destacar, pela análise de controlabilidade, o sistema era controlável considerando apenas os dois primeiros modos do sistema.

Com a linearização do atuador eletromagnético, foi analisada graficamente a corrente utilizada nos atuadores eletromagnéticos, utilizando o controle *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*, conforme a Fig. 8.

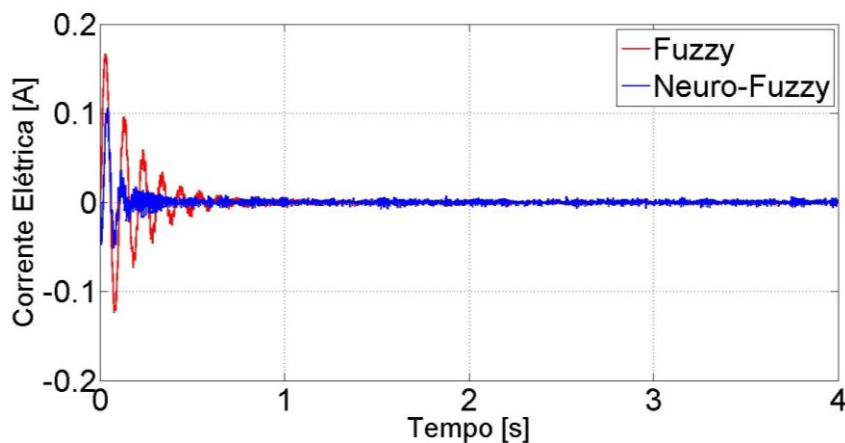


Figura 8. Corrente elétrica com a aplicação dos controles *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*.

De acordo com a Fig. 8, a corrente elétrica de controle dos atuadores eletromagnéticos acompanha a resposta de deslocamento apresentado pela Fig. 6, agindo de forma a controlar o sistema.

## 9. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o controle ativo de vibrações em uma viga de material compósito utilizando atuadores eletromagnéticos, propondo a combinação de rede neurais artificiais com a lógica *Fuzzy*, para o desenvolvimento do sistema de controle ativo de vibrações *Neuro-Fuzzy*.

Com base nos resultados obtidos nas simulações numéricas, comparando o controlador *Neuro-Fuzzy* a um controlador *Fuzzy* simples, pode-se observar que a utilização do treinamento e otimização através da arquitetura ANFIS permite um controle mais eficaz. Desta maneira, a metodologia proposta pode ser utilizada no controle ativo de vibrações em estruturas compósitas.

## 10. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação Araucária pelos suportes financeiros para o desenvolvimento do presente trabalho.

## 11. REFERÊNCIAS

- Artero, A.O., 2009, “ Inteligência Artificial: teórica e prática, Ed. Livraria da Física”, São Paulo, Brasil. Clark, J.A., 1986, Private Communication, University of Michigan, Ann Harbor.
- Chen, C., 2011, “Development of a Neuro-Fuzzy System for Structural Vibration Suppression”, Proceedings of the 2011 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, p.10–13.
- Conceição, S.M., Bueno, B.N., Cavalini Jr, A.A., Abreu, G.L., Melo, G.P. and Lopes Jr, V., 2009, “Model Reduction Methods for Smart Truss like Structure”, Proceedings of 8th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, Bauru, Brasil.
- Faria, A. W., 2006, “Modelagem por Elementos Finitos de Placas Compostas Dotadas de Sensores e Atuadores Piezoelétricos: Implementação Computacional e Avaliação Numérica”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 152 f.
- Jang, J. S. R; Sun, C. T., 1995, “Neuro-Fuzzy Modeling and Control”, Proceedings of the IEEE, v.83, p.378–406.
- Koroishi, E. H., 2013, “Controle de Vibrações em Máquinas Rotativas utilizando Atuadores Eletromagnéticos”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 225f.
- Koroishi, E. H.; Steffen Jr, V., 2011, “Active Vibration Control Using Electromagnetic Actuator: A simple Model Approach”, 10ª Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, 2011.
- Koroishi, E. H.; Borges, A. S.; Cavalini, A. A.; Steffen, V., 2014, “Numerical and Experimental Modal Control of Flexible Rotor Using Electromagnetic Actuator”, Mathematical Problems in Engineering (Print), v. 2014, p. 1-14.
- Mahfoud, J. and Der Hagopian, J., 2011 “Fuzzy Active Control of Flexible Structures by Using Electromagnetic Actuators”, Journal of Aerospace Engineering 329-37.imbra, A.L., 1978, “Lessons of Continuum Mechanics”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brazil, 428 p.
- Maslen E., 2000, “Magnetic Bearings, University of Virginia, Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering”, Charlottesville, Virginia, 233 p.
- Meirovitch, L., 1990, “Dynamics and Control of Structures. Blacksburg”, Departament of Engeneering Science and Mechanics, 193 p.
- Sánchez, E. C. M.; Alva, J. G. C.; Meggiolaro, M. A.; Castro, J. T. P., 2012, “Learning Control and Neuro–Fuzzy Learning Control To Increase the Frequency of Fatigue Tests”, ABCM Symposium Series in Mechatronics, v.5, p.232–244.
- Sreehari, V. M.; Maiti, D. K., 2017, “Passive control of damaged composite laminates with optimized location of piezoelectric fiber composite patches”. Composite Structures, v.173, p.228–241.
- Welch, G.; Bishop, G., 1995, “An Introduction to Kalman Filter, Technical Report”, University of North Carolina, Chapel Hill, USA.
- Zhou, K., Doyle, J. C., 1998, “Essentials of Robust Control”, Prentice Hall.

## 12. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

## NEURO-FUZZY CONTROL APPLIED IN A BEAM OF COMPOSITE MATERIAL

Camila Albertin Xavier da Silva, [camilaalbertin@hotmail.com](mailto:camilaalbertin@hotmail.com)<sup>1</sup>

Joana Pereira Repinaldo, [joanarepinaldo@hotmail.com](mailto:joanarepinaldo@hotmail.com)<sup>1</sup>

Willian Faria dos Santos, [wfsantos92@hotmail.com](mailto:wfsantos92@hotmail.com)<sup>1</sup>

Daniel Almeida Colombo, [danielcolz28@gmail.com](mailto:danielcolz28@gmail.com)<sup>1</sup>

Fabian Andres Lara-Molina, [fabianmolina@utfpr.edu.br](mailto:fabianmolina@utfpr.edu.br)<sup>1</sup>

Edson Hideki Koroishi, [edsonh@utfpr.edu.br](mailto:edsonh@utfpr.edu.br)<sup>1</sup>

Albert Willian Faria, [awfaria2021@gmail.com](mailto:awfaria2021@gmail.com)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio, Avenida Alberto Carazzai 1640, 86300-000, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Avenida Guilherme Ferreira 1940, 38022-200, Uberaba, Minas Gerais, Brasil.

**Abstract.** *The present work proposes the active control of vibrations in a beam of composite material, using electromagnetic actuators, in order to obtain a reduction in the displacement of the system. The control theory used was the Neuro-Fuzzy, which consists of the combination of artificial neural networks with the Fuzzy logic for the development of an active vibration control system. The electromagnetic actuator used was linearized using a methodology similar to that used in magnetic bearings. In the numerical simulations was obtained the displacement of the system in the time domain using Fuzzy and Neuro-Fuzzy control, thus demonstrating the efficiency of the proposed methodology. The system response in the frequency domain was also obtained, as was the current plot.*

**Keywords:** *Active Vibration Control, Neuro-Fuzzy, Electromagnetic Actuators, Composite Material*