

Neuro-Fuzzy Control Applied on a 2DOF Structure Using Electromagnetic Actuators

Joana P. Repinaldo, Edson H. Koroishi, and Fabian A. Lara-Molina

Abstract—This paper proposes the parameter identification and the application of active vibration control technique within a structure of two degrees of freedom using electromagnetic actuators. In the identification of the unknown stiffness and damping coefficients, the heuristic optimization technique Differential Evolution was used. By identifying the system parameters, it was possible to design the controllers and together with the electromagnetic actuators applied on the active vibration control of the structure. The neuro-fuzzy control theory was used to reduce the amplitude of vibration of the structure when submitted to an impulsive force. Moreover, the Fuzzy controller was used for comparison purposes. The results that were obtained numerically and experimentally demonstrate the efficiency of the proposed neuro-fuzzy control.

Index Terms—Active vibration control, neuro-fuzzy control, electromagnetic actuators, parameter identification, vibrations.

I. INTRODUÇÃO

Em diversas aplicações os sistemas e estruturas mecânicas são submetidos a excitações que provocam vibrações indesejáveis. A redução de vibrações nestes sistemas tem se tornado objeto principal de estudo em diversas áreas da engenharia, já que vibrações excessivas podem causar danos e ocasionar falhas dos componentes e da estrutura. Para este fim, diversos sistemas de controles de vibração foram propostos, tais como controles passivos, semi-ativos e ativos. A técnica de controle passivo consiste em solucionar o problema de vibrações indesejadas através da manipulação das propriedades do sistema, como massa, rigidez e amortecimento, provocando a dissipação da energia vibratória por meio destes elementos [1], [2]. O controle ativo de vibração minimiza as vibrações através de forças secundárias aplicadas na estrutura por um atuador [3], [4]. As técnicas semi-ativas compreendem a junção das duas anteriores [5], [6]. Diferentes métodos de controle ativo de vibração têm sido usados no controle de estruturas compostas, máquinas rotativas e suspensões automotivas. Dentre os métodos de controle têm-se, o controle robusto a incertezas paramétricas e dinâmicas não modeladas [3], [4], [7], controle ótimo [8], [9], controle fuzzy [10], [11] e controladores não lineares [12] dentre outros. O desempenho do controle fuzzy destaca-se dentre as técnicas de controle apresentadas na atenuação de vibrações devido às suas características não lineares acompanhado da definição da sua estrutura baseada na dinâmica da estrutura a ser controlada. Como benefício adicional, os controladores fuzzy têm mostrado um bom desempenho na presença de incertezas paramétricas [3].

A teoria fuzzy foi desenvolvida por [13] para lidar com fenômenos imprecisos e incertos [14]. Diferente da lógica clássica, a lógica fuzzy permite que as proposições sejam expressas linguisticamente assumindo diferentes graus de pertinência [15].

Os controladores *fuzzy* têm sido amplamente aplicados no controle ativo de vibrações de estruturas. Dentre as principais aplicações consideradas encontram-se controle ativo de estruturas em aplicações de engenharia civil [16], [17], atenuação de vibrações em suspensões ativas veiculares [18], e controle ativo de vibrações de manipuladores robóticos com elementos flexíveis [19], [20]. As aplicações referidas têm visado implementar os controladores *fuzzy* com critérios de ótimos. Com este propósito, diversas técnicas de otimização para sintonizar os controladores *fuzzy* e assim otimizar seu desempenho foram propostos, tais como otimização multi-objetivo [21], otimização por enxame de partículas [22] dentre outras.

A principal limitação do controlador *fuzzy* é a dificuldade na definição efetiva dos parâmetros e regras linguísticas do controlador que depende do grau de conhecimento do especialista. Uma alternativa para este problema é empregar redes neurais artificiais para otimização do controlador *fuzzy* e determinar os parâmetros ótimos do controlador. O controle *neuro-fuzzy* surgiu da combinação de sistemas fuzzy e redes neurais artificiais, o qual incorpora as vantagens das redes neurais, como a habilidade de aprendizagem e otimização, com as vantagens da lógica nebulosa, dos sistemas *fuzzy*. Vários tipos e aplicações dos sistemas de *neuro-fuzzy* têm sido propostas na literatura [12], [23], [24]. Uma arquitetura específica do sistema *neuro-fuzzy* é o Sistema de Inferência Adaptativo Neuro-Difuso (ANFIS do inglês *Neuro-Fuzzy Interference System*). Esta arquitetura baseada no sistema de inferência fuzzy Takagi-Sugeno, possui multicamadas interligadas por conexões unidirecionais e aprendizado supervisionado. Cada camada corresponde a uma etapa de processamento resultando em uma saída análoga a desejada [25]. Com isto, os controladores ANFIS são aplicados para otimizar os parâmetros do controlador fuzzy com base em um conjunto de dados de treinamento [26], [27]. Consequentemente, os controladores ANFIS apresentaram vantagens potenciais em decorrência do desempenho superior aos controles *fuzzy* somado à otimização na sintonização dos parâmetros do controlador. Portanto, nesta contribuição o controlador ANFIS aplica-se no controle ativo de vibrações. Especificamente, propõe-se a síntese e aplicação experimental de uma técnica de controle *neuro-fuzzy* ANFIS para atenuar as vibrações em uma estrutura.

A principal novidade da presente proposta de pesquisa

J. P. Repinaldo, E. H. Koroishi and F. A. Lara-Molina are with the Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology - Paraná, Cornélio Procópio, PR, 86300-000 Brazil e-mail:fabianmolina@utfpr.edu.br.

Manuscript received April 19, 2005; revised August 26, 2015.

em relação aos trabalhos publicados previamente na literatura consiste em otimizar o controlador fuzzy mediante o sistema de inferência adaptativo Neuro-Difuso (ANFIS) para o controle ativo de vibrações de uma estrutura. Diferente dos trabalhos publicados anteriormente, propõe-se a aplicação de um atuador eletromagnético cuja principal vantagem é a fácil construção e integração com a estrutura comparado com atuadores utilizados em aplicações anteriores tais como atuadores PZT ou atuadores magnetoreolológico [20], [28].

Neste contexto, o presente trabalho propõe a identificação dos parâmetros de uma estrutura de dois graus de liberdade, mediante da comparação das Funções Resposta em Frequência (FRFs) experimental e simulada com o modelo numérico usando os parâmetros a serem identificados, utilizando o algoritmo de otimização Evolução Diferencial (ED). Com o modelo do sistema foi possível projetar o controle ativo de vibração, utilizando os Atuadores Eletromagnéticos (AEM) para aplicação da força de controle, atenuando a vibração da estrutura. A técnica de controle ativo de vibração empregada foi o controle *neuro-fuzzy*. O controle *fuzzy* foi desenvolvido e aplicado na estrutura para fins de comparação. O sistema de controle foi desenvolvido no ambiente Matlab/Simulink® e os resultados foram analisados mediante de simulações numéricas e testes experimentais.

II. ESTRUTURA DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE

O sistema de dois graus de liberdade, considerado neste trabalho, é composto por duas chapas de alumínio representadas pelas massas (m_1 e m_2), sustentadas por hastes flexíveis (réguas de aço inoxidável) correspondente aos elementos de rigidez (k_1 e k_2) e amortecimento (c_1 e c_2). Além destes, a estrutura possui dois atuadores eletromagnéticos posicionados nos suportes laterais opostos a estrutura, conforme apresentado na Fig. 1. A plataforma experimental apresenta-se na Fig. 1a e o diagrama para obtenção da equação de movimento apresenta-se na Fig. 1b.

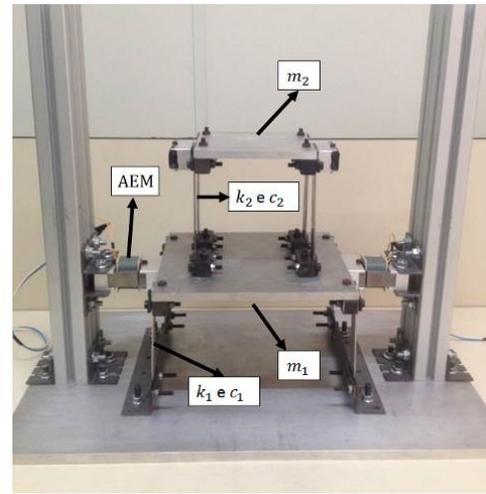
A equação de movimento da estrutura apresenta-se na Eq. (1).

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} + \{F_{EAM}(t)\} \quad (1)$$

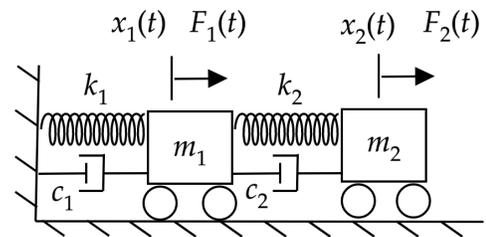
Sendo $[M]$, $[K]$ e $[C]$ as matrizes de massa, rigidez e amortecimento, respectivamente. $\{F\} = \{F_1(t) \ F_2(t)\}^T$ é o vetor da força de excitação, $\{F_{EAM}\}$ o vetor de força do atuador eletromagnético na massa m_1 e $\{x(t)\} = \{x_1(t) \ x_2(t)\}^T$ o vetor deslocamento.

A. Caracterização da Estrutura

A caracterização da estrutura foi obtida mediante a identificação dos parâmetros de rigidez e amortecimento pela técnica do problema inverso em conjunto com o método de otimização Evolução Diferencial (ED) [29]. A Evolução diferencial (ED) é um método meta-heurístico que otimiza um problema iterativamente visando aprimorar uma solução candidata mediante um critério que avalia a qualidade; este método não garante achar a solução ótima global, no entanto permite obter a solução de um problema de otimização com desempenho superior a outros métodos meta-heurísticos [30].



(a) Bancada



(b) Diagrama esquemático

Fig. 1. Estrutura de dois graus de liberdade.

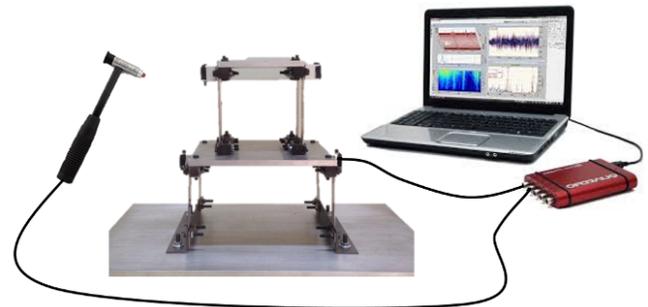


Fig. 2. Sistema de aquisição de dados (adaptado de [29]).

Este método consiste em minimizar a diferença entre a Função Resposta em Frequência (FRF) experimental com a FRF numérica obtida a partir do modelo matemática da estrutura.

Para a obtenção das FRFs experimentais, foi utilizado o sistema de aquisição apresentado na Fig. 2. O acelerômetro, acoplado na lateral das massas, mede a resposta do sistema quando uma força impulsiva é aplicada pelo martelo de impacto. A placa de aquisição Quattro, da fabricante Data Physics®, recebe os dados e envia para o software SignalCalc ACE onde são salvos e apresentados ao usuário. Este procedimento foi realizado cinco vezes, obtendo ao final a média da FRF experimental. Neste trabalho foram consideradas quatro FRFs variando a localização da força de excitação e o ponto de fixação do acelerômetro (massas m_1 e m_2).

O algoritmo ED foi desenvolvido no Matlab® por [31] considerando os parâmetros a seguir: 100 gerações, taxa de

TABELA I

ESPAÇO DE BUSCA DOS PARÂMETROS IDENTIFICADOS.

| Parâmetros | Espaço de Projeto |
|-------------------------|----------------------------------|
| Rigidez (k_1) | $9000 \leq k_1 \leq 40000$ [N/m] |
| Amortecimento (c_1) | $0 \leq c_1 \leq 25$ [Ns/m] |
| Rigidez (k_2) | $8000 \leq k_2 \leq 20000$ [N/m] |
| Amortecimento (c_2) | $0 \leq c_2 \leq 10$ [Ns/m] |

probabilidade de cruzamento 0.8, taxa de perturbação de 0.8 e estratégia de mutação *DE/rand/bin*. A ED foi executada cem vezes para verificar que os resultados obtidos correspondem ao ótimo global. Adicionalmente, diferentes tamanhos de população foram considerados, assim: 50, 100, 150 e 200 indivíduos. O espaço de projeto para a otimização dos parâmetros é apresentado na Tabela I. A função objetivo é apresentada pela Eq. (2), sendo FRF_{exp} a FRF experimental e FRF_{simu} a simulada.

$$FO = \sum \left| \frac{FRF_{exp} - FRF_{simu}}{FRF_{exp}} \right| \quad (2)$$

A Fig. 3 apresenta a comparação entre a FRF experimental e as $FRFs$ identificadas com o menor valor da função objetivo para os diferentes valores de população considerando as quatro $FRFs$ segundo as entradas e saídas definidas na equação de movimento do modelo apresentado na Eq. (1): x_2/F_1 (ver a Fig. 3a), x_1/F_1 (ver a Fig. 3b), x_1/F_2 (ver a Fig. 3c), x_2/F_2 (ver a Fig. 3d).

Analisando as $FRFs$ da Fig. 3 percebe-se que não há grande variação na identificação dos parâmetros para os diferentes tamanhos de população, mostrando que o tamanho da população não interferiu na identificação dos parâmetros; Portanto, observa-se que a identificação considerando uma população com 50, 100 e 150 coincidem com o da população com 200 indivíduos. Os picos das frequências naturais (8,5Hz e 18,25 Hz) para as curvas experimentais e simuladas estão próximas para todas as $FRFs$, demonstrando a validade da metodologia proposta. Com isto, os parâmetros de rigidez e amortecimento utilizados no controle foram os obtidos para a população de 50 indivíduos: $m_1 = 4,38\text{kg}$, $k_1 = 2,15 \times 10^4 \text{N/m}$, $c_1 = 14,43 \text{N.s/m}$, $m_2 = 1,94\text{kg}$, $k_2 = 1,47 \times 10^4 \text{N/m}$, $c_2 = 3,18 \times 10^{-8} \text{N.s/m}$.

B. Atuador Eletromagnético

O atuador eletromagnético foi utilizado para aplicação de forças para controle ativo de vibrações na estrutura. A força eletromagnética do atuador é descrita na Eq. (3), sendo esta em função dos parâmetros geométricos das bobinas, corrente elétrica e a variação no gap.

$$F_{AEM} = \frac{N^2 I^2 \mu_o a h}{2 \left((e + \epsilon) + \frac{b + c + d - 2a}{\mu_r} \right)^2} \quad (3)$$

Os parâmetros (a , b , c , d , e , h) definem a geometria das bobinas, μ_r e μ_o são as permeabilidades magnética do material e do vácuo, N o número de espiras, e é o valor do entreferro (gap) e ϵ representa o deslocamento relativo entre as partes que compõem o núcleo ferromagnético. Os valores destes parâmetros são obtidos em [11].

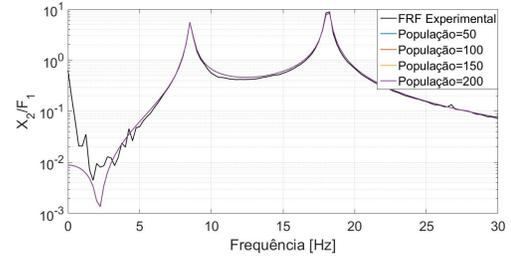
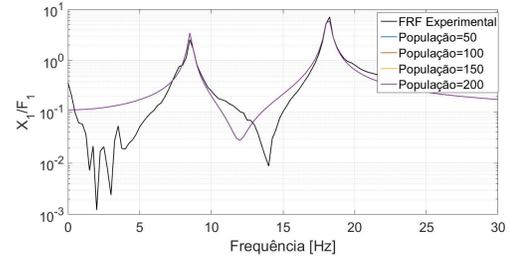
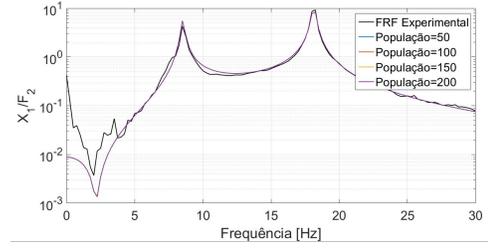
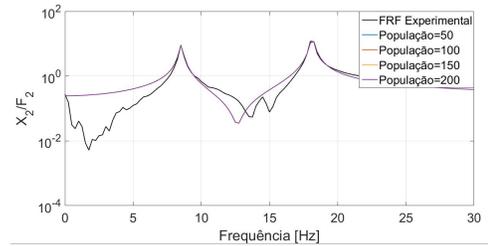

 (a) x_2/F_1

 (b) x_1/F_1

 (c) x_1/F_2

 (d) x_2/F_2

 Fig. 3. $FRFs$ experimentais e identificadas.

Desta forma, o modelo inverso determina a corrente elétrica exigida pelo atuador com base no conhecimento da força de controle e da variação do gap. O modelo inverso do atuador foi utilizado devido a não linearidade dos atuadores eletromagnéticos que consiste na utilização da Eq. (4) para determinar a corrente elétrica, I , necessária [4].

$$I = \sqrt{\frac{2F_{AEM} \left((e + \epsilon) + \frac{b + c + d - 2a}{\mu_r} \right)^2}{N^2 \mu_o a h}} \quad (4)$$

III. ESTRUTURA DO CONTROLADOR

O controle ativo de vibração na estrutura de 2 graus de liberdade foi realizado através do desenvolvimento dos controladores *fuzzy* e *neuro-fuzzy* em conjunto com os atuadores eletromagnéticos, o qual aplica a força de controle no sistema.

O observador de estado foi utilizado para estimar os valores dos estados do sistema, conforme Fig. 4.

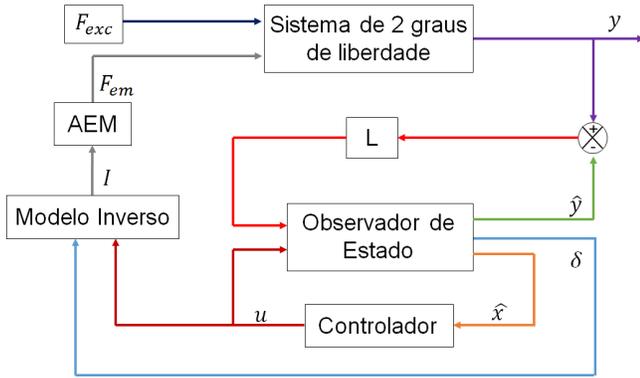


Fig. 4. Esquemático sistema de controle.

Na Fig. 4, u é a força de controle, y a saída, \hat{y} a saída estimada, \hat{x} os estados estimados referentes ao deslocamento e velocidade em coordenadas físicas, δ o deslocamento da massa controlada e I a corrente elétrica do atuador eletromagnético.

No presente trabalho, o observador de estado da Fig. 4 foi utilizado para determinar a variação do gap (ϵ) no atuador eletromagnético e para estimar o vetor de estado utilizado pelo controlador para gerar o sinal de controle (u). A saída do controlador u corresponde a força de controle que deve ser aplicada pelo atuador eletromagnético na estrutura F_{AEM} .

A. Controle Fuzzy

A estrutura do controlador *fuzzy* é composta pelas seguintes etapas: fuzzificação, base de regras, sistema de inferência e defuzzificação. A fuzzificação consiste no processo de transformação dos valores do domínio real para o domínio *fuzzy*. Desta forma, para cada variável de entrada (x) são criadas funções de pertinência, as quais definirão o valor da entrada no domínio *fuzzy* ($\mu_i(x)$). Neste trabalho foram definidas duas funções de pertinência do tipo campana generalizada [15].

Para representar o conhecimento de maneira precisa, a base de regras é composta por regras de controle na forma de expressões linguísticas [32]. Foram criadas para o controlador *fuzzy* 16 regras, na forma condicional Se-Então, e duas ações. A definição da base de regras derivou-se da implementação de controladores *fuzzy* desenvolvidos previamente para controle ativo de vibrações [11], [33]. O sistema de inferência adotado foi o proposto por Takagi-Sugeno [34], o qual consiste na combinação linear dos conjuntos *fuzzy* sendo a saída final obtida pela média ponderada das combinações lineares. Os valores de saída do controlador *fuzzy* são apresentados a seguir:

$$z_1 = 0, \quad z_2 = [1 \quad 14,39 \quad -51,53 \quad 12,5] \{x\}$$

onde z_1 e z_2 são os fatores que ponderam a intensidade que o controlador *fuzzy* exerce na aplicação do esforço de controle u . Os valores para z_1 e z_2 foram determinados por tentativa e erro para obter o melhor desempenho dinâmico do sistema controlado.

B. Controle Neuro-Fuzzy

O sistema *neuro-fuzzy* baseou-se na arquitetura denominada Sistema de Inferência Adaptativa Neuro-Difuso (ANFIS) [24]. Para exemplificar o funcionamento da arquitetura ANFIS consideram-se duas variáveis de entrada (x e y) e uma variável de saída (f), conforme apresentado na Fig. 5.

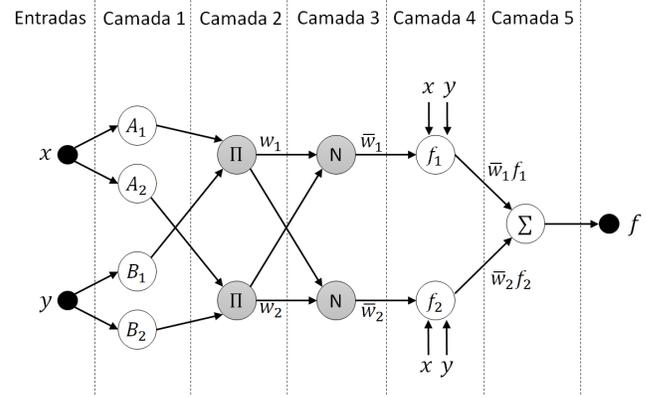


Fig. 5. Arquitetura ANFIS.

Na camada 1 calcula-se o grau de pertinência da Eq. (5), para as entradas x e y , baseada na função de pertinência escolhida.

$$\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

Cada neurônio da camada 2 executa a operação de interseção entre as funções de pertinência, tendo como resultado o grau de aplicabilidade mostrado na Eq. (6).

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

Na terceira camada são realizadas as normalizações das funções de pertinência. Nesta camada é calculada a razão entre a aplicabilidade da i -ésima regra (w_i) e a somatória das aplicabilidades de todo o sistema de regra da Eq. (7).

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

Na quarta camada estão os parâmetros consequentes da regra com função de ativação apresentado pela Eq. (8). Sendo que os valores de p_i , q_i , e r_i correspondem às constantes a serem ajustadas no treinamento.

$$f_1 = p_1x + q_1y + r_1, \quad f_2 = p_2x + q_2y + r_2 \quad (8)$$

O nó da última camada calcula a saída do sistema promovendo a defuzzificação dos sinais como apresentado na Eq. (9).

$$\sum \bar{w}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i}, \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

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 combina o método de gradiente descendente nos parâmetros antecedentes e os mínimos quadrados para estimar ou identificar parâmetros consequentes. Para a construção do modelo *neuro-fuzzy*, foi utilizado o *software* Matlab® /Simulink em conjunto com a *Toolbox* ANFIS. Os mesmos parâmetros apresentados para o

controlador *fuzzy* foram otimizados no desenvolvimento do controlador *neuro-fuzzy*. A arquitetura da rede de neurônios gerada pelo ANFIS neste trabalho é apresentada na Fig. 6.

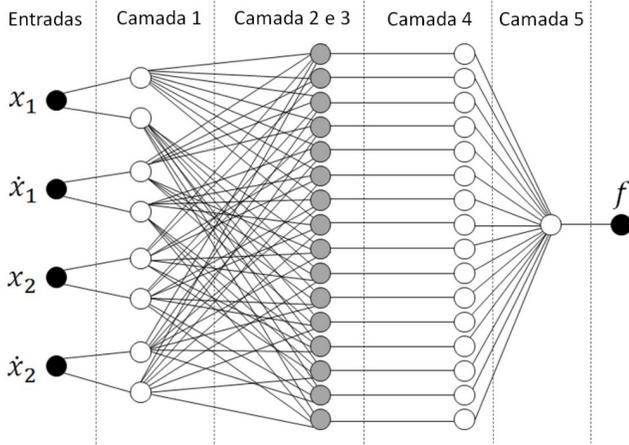


Fig. 6. Arquitetura ANFIS do controlador *neuro-fuzzy*.

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 combina o método de gradiente descendente nos parâmetros antecedentes e os mínimos quadrados para estimar ou identificar parâmetros consequentes. Para a construção do modelo *neuro-fuzzy*, foi utilizado o software Matlab®/Simulink em conjunto com a Toolbox ANFIS. Os mesmos parâmetros apresentados para o controlador *fuzzy* foram otimizados no desenvolvimento do controlador *neuro-fuzzy*. A arquitetura da rede de neurônios gerada pelo ANFIS neste trabalho é apresentada na Fig. 6, sendo as camadas 2 e 3 apresentadas agrupadas em uma mesma camada.

A rede de neurônios tem como função o aprendizado com base no conjunto de entrada-saída desejado. Com isto, o controle regulador quadrático linear foi utilizado como base de treinamento para o controle *neuro-fuzzy*. No treinamento da ANFIS, os parâmetros de entrada foram: erro de tolerância igual a zero, treinamento híbrido e 100 épocas para o treinamento da rede. Diferente do controle *fuzzy* foi gerada 16 valores de saída baseados na Eq. (10), com valores das constantes α_i , β_i , γ_i e λ_i , diferente para cada saída (z_i).

$$z_i = \{\alpha_i \quad \beta_i \quad \gamma_i \quad \lambda_i\} \{x\} \quad (10)$$

IV. IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONTROLE

A Fig. 7 apresenta a configuração experimental utilizada no controle da estrutura, na qual consiste em uma placa de aquisição PCI-6221, da National Instrument®, dois servoamplificadores, um acelerômetro e amplificador.

A integração da bancada experimental e implementação do controle é ilustrada na Fig. 8, onde as forças de controle são calculadas pelo software Matlab/Simulink® e enviados através da placa de aquisição para os servoamplificadores de sinais, os quais enviam para os atuadores eletromagnéticos. O acelerômetro localizado na lateral da massa em conjunto com o condicionador de sinal envia os valores da aceleração para

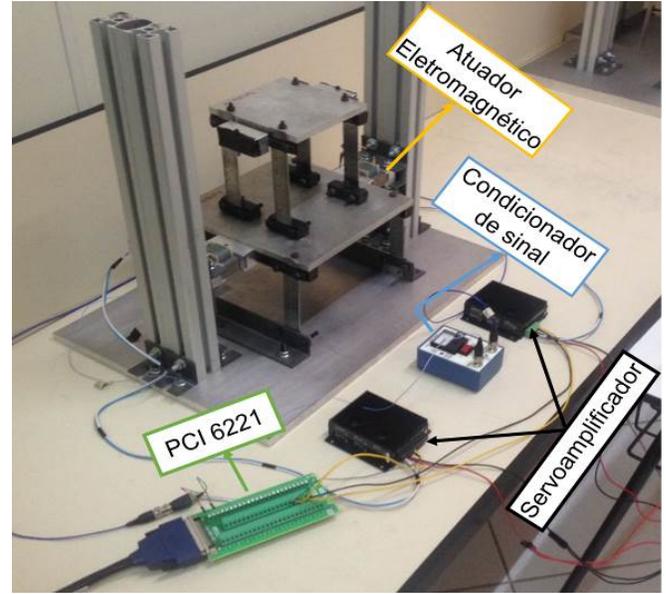


Fig. 7. Sistema de controle experimental.

a placa de aquisição, a qual processa novos valores para o esforço de controle fechando a malha de controle.

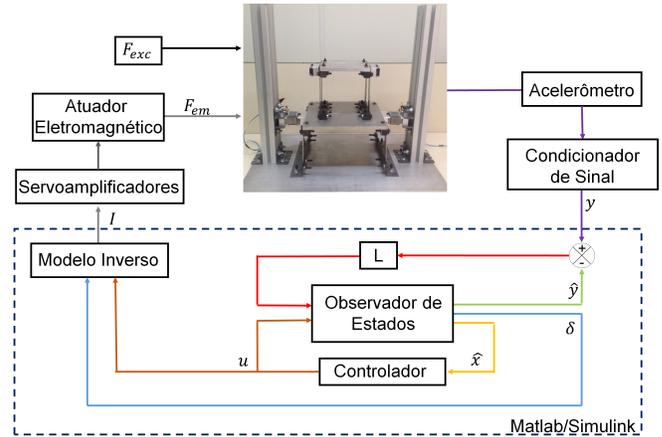


Fig. 8. Integração entre a bancada experimental e controle em Matlab/Simulink®.

V. RESULTADOS

O deslocamento é considerado para avaliar o desempenho do controle ativo de vibração numérica e experimental quando aplicada uma força impulsiva na massa m_2 . A força de controle foi aplicada na massa m_1 e a resposta do sistema analisada na massa m_2 . Estes resultados foram analisados e desenvolvidos no software Matlab/Simulink®.

A. Resultados Numéricos

A Fig. 9 apresenta a comparação dos controladores com o sistema não controlado para o deslocamento do sistema. A amplitude de vibração foi reduzida para os dois controladores, *fuzzy* e *neuro-fuzzy*. A resposta ao impacto foi controlada em

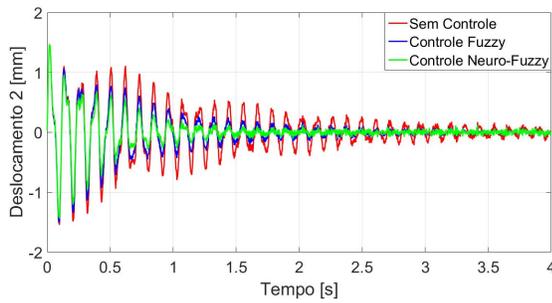


Fig. 9. Resposta impulsiva simulada.

aproximadamente 1,5s para o controle *neuro-fuzzy* e 2,5s para o controle *fuzzy*.

A Função de Resposta em Frequência para o sistema sem e com controle (ver Fig. 10) apresentou uma redução significativa das amplitudes de ambos os picos, sendo a redução do primeiro pico de 4,04 dB para o controle *fuzzy* e 7,66 dB para o controle *neuro-fuzzy*, e para o segundo pico de 6,13 dB para o controle *fuzzy* e 6,00 dB para o controle *neuro-fuzzy*.

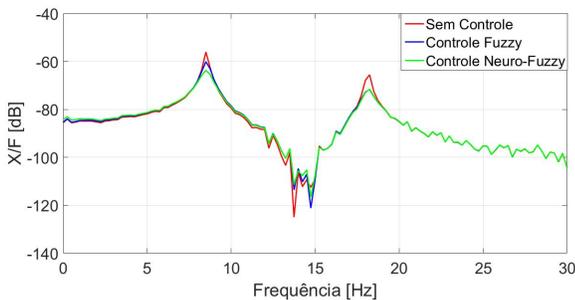


Fig. 10. FRF simulada.

A força de controle utilizada pelo atuador é apresentada na Fig. 11. Observa-se que o controle *neuro-fuzzy* apresentou uma maior força para os instantes iniciais, isto reflete diretamente na atenuação de vibração apresentada na resposta impulsiva da Fig. 9.

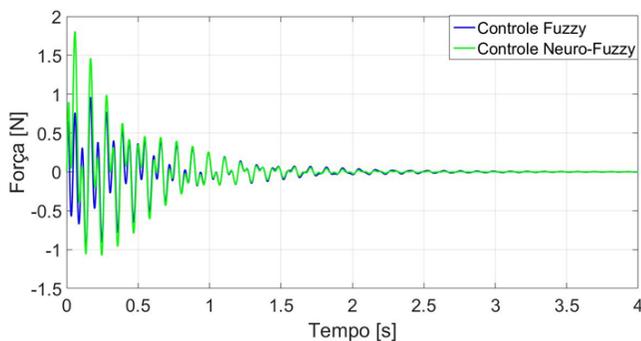


Fig. 11. Força de controle simulada.

B. Resultados Experimentais

A Fig. 12 apresenta o deslocamento da massa m_1 . O tempo de atenuação das oscilações pelos controladores foram de 1,2s para o controle *neuro-fuzzy* e 1,7s para o controle *fuzzy*.

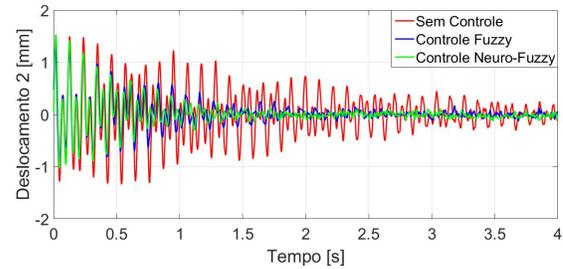


Fig. 12. Resposta impulsiva experimental.

A função resposta em frequência do sistema com controle e sem controle é exposta na Fig. 13. Os controladores atenuaram as duas frequências naturais, sendo a redução de 7,54 dB no controle *fuzzy* e 10,89 dB no controle *neuro-fuzzy* para o primeiro pico, e 9,01 dB no controle *fuzzy* e 10,52 dB no controle *neuro-fuzzy* para o segundo pico.

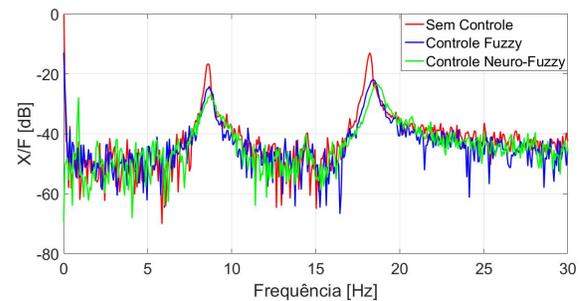


Fig. 13. FRF experimental.

Observando a Fig. 14, a qual apresenta a força de controle, percebe-se um maior consumo de energia para o controlador *neuro-fuzzy*.

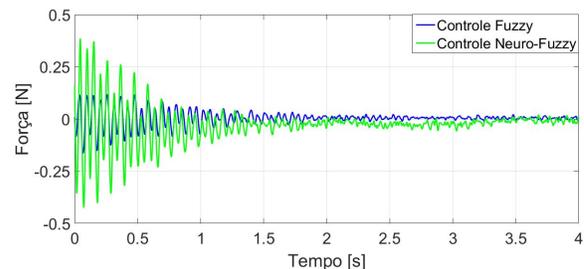


Fig. 14. Força de controle experimental.

Os resultados obtidos experimentalmente apresentaram-se de acordo com os simulados para a estrutura, visto que, com os controladores projetados ocorreu uma atenuação da vibração no sistema. Comparando os resultados experimentais com os obtidos nas simulações, percebe-se que as correntes elétricas e as forças de controle dos atuadores foram menores no controle experimental, isto ocorre devido à amplificação do sinal enviado. Além disto, no controle experimental as frequências dos sistemas controlados sofreram um deslocamento para a direita, ocasionado pelo aumento de rigidez na estrutura devido a força dos atuadores eletromagnéticos.

VI. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como principal contribuição a apresentação da técnica de controle ativo de vibração *fuzzy* aplicada em uma estrutura de dois graus de liberdade, numérica e experimentalmente. As duas abordagens, *fuzzy* e *neuro-fuzzy*, em conjunto com os atuadores eletromagnéticos mostraram-se eficientes na atenuação das vibrações ocasionadas por uma força impulsiva. Com base nos resultados obtidos nas simulações numéricas e no controle experimental, comparando os controladores *fuzzy* e *neuro-fuzzy*, pode-se observar que a utilização do treinamento e otimização através da arquitetura ANFIS permite uma maior redução da vibração quando comparado ao controlador *fuzzy*, porém há um maior consumo de energia por este controlador. A implementação do controle foi possível devido a identificação dos parâmetros obtidos pela técnica Evolução Diferencial possibilitando a caracterização da estrutura e com isto a obtenção do modelo do sistema. Considerando os resultados experimentais observados para estrutura considerada nesta contribuição, os trabalhos futuros visarão desenvolver controladores *neuro-fuzzy* para estruturas compósitas e máquinas rotativas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo 402581/2016-4), a Fundação Araucária e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos suportes financeiros para o desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Bodaghi, M. Shakeri, and M. Aghdam, "Passive vibration control of plate structures using shape memory alloy ribbons," *Journal of Vibration and Control*, vol. 23, no. 1, pp. 69–88, 2017.
- [2] E. A. Ribeiro, J. T. Pereira, and C. A. Bavastrri, "Passive vibration control in rotor dynamics: optimization of composed support using viscoelastic materials," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 351, pp. 43–56, 2015.
- [3] E. H. Koroishi, F. A. L. Molina, A. W. Faria, and V. Steffen Junior, "Robust optimal control applied to a composite laminated beam," *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 7, no. 1, pp. 70–80, 2015.
- [4] E. Koroishi, F. Lara-Molina, A. Borges, and V. Steffen Jr, "Robust control in rotating machinery using linear matrix inequalities," *Journal of Vibration and Control*, vol. 22, no. 17, pp. 3767–3778, 2016.
- [5] C. Min, M. Dahlmann, and T. Sattel, "A concept for semi-active vibration control with a serial-stiffness-switch system," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 405, pp. 234–250, 2017.
- [6] S. Mohammadi, S. Hatam, and A. Khodayari, "Modeling of a hybrid semi-active/passive vibration control technique," *Journal of Vibration and Control*, vol. 21, no. 1, pp. 21–28, 2015.
- [7] Y. Yang, D. Zhang, and Q.-L. Han, "Networked active vibration control of structural systems: A non-small input delay approach," *Journal of Vibration and Control*, vol. 24, no. 22, pp. 5391–5400, 2018.
- [8] X. Liu, G. Cai, F. Peng, and H. Zhang, "Dynamic model and active vibration control of a membrane antenna structure," *Journal of Vibration and Control*, vol. 24, no. 18, pp. 4282–4296, 2018.
- [9] Y.-J. Liang, N. Li, D.-X. Gao, and Z.-S. Wang, "Optimal vibration control for nonlinear systems of tracked vehicle half-car suspensions," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1675–1683, 2017.
- [10] Y. Luo, X. Zhang, Y. Zhang, Y. Qu, M. Xu, K. Fu, and L. Ye, "Active vibration control of a hoop truss structure with piezoelectric bending actuators based on a fuzzy logic algorithm," *Smart Materials and Structures*, vol. 27, no. 8, p. 085030, 2018.
- [11] E. H. Koroishi, A. S. Borges, A. A. Cavalini, and V. Steffen, "Numerical and experimental modal control of flexible rotor using electromagnetic actuator," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, 2014.
- [12] A. T. Nugraha *et al.*, "Setting neuro-fuzzy pid control in plant nonlinear active suspension," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1114, no. 1. IOP Publishing, 2018, p. 012063.
- [13] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
- [14] F. Lara-Molina, E. Koroishi, D. Dumur, and V. Steffen Jr, "Stochastic analysis of a 6-dof fully parallel robot under uncertain parameters," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 19, pp. 214–219, 2015.
- [15] L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, no. 1, pp. 28–44, 1973.
- [16] R. Guclu and H. Yazici, "Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 318, no. 1-2, pp. 36–49, 2008.
- [17] —, "Fuzzy logic control of a non-linear structural system against earthquake induced vibration," *Journal of Vibration and Control*, vol. 13, no. 11, pp. 1535–1551, 2007.
- [18] K.-G. Sung, Y.-M. Han, J.-W. Cho, and S.-B. Choi, "Vibration control of vehicle er suspension system using fuzzy moving sliding mode controller," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 311, no. 3-5, pp. 1004–1019, 2008.
- [19] A. Jnifene and W. Andrews, "Experimental study on active vibration control of a single-link flexible manipulator using tools of fuzzy logic and neural networks," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 3, pp. 1200–1208, 2005.
- [20] J.-j. Wei, Z.-c. Qiu, Y.-c. Wang *et al.*, "Experimental comparison research on active vibration control for flexible piezoelectric manipulator using fuzzy controller," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 59, no. 1, pp. 31–56, 2010.
- [21] A. Ahlwat and A. Ramaswamy, "Multiobjective optimal structural vibration control using fuzzy logic control system," *Journal of Structural Engineering*, vol. 127, no. 11, pp. 1330–1337, 2001.
- [22] M. Marinaki, Y. Marinakis, and G. E. Stavroulakis, "Fuzzy control optimized by pso for vibration suppression of beams," *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 6, pp. 618–629, 2010.
- [23] S. Refoufi and K. Benmahammed, "Control of a manipulator robot by neuro-fuzzy subsets form approach control optimized by the genetic algorithms," *ISA transactions*, vol. 77, pp. 133–145, 2018.
- [24] F. G. de Araujo Filho and A. L. Maitelli, "A neuro-fuzzy control scheme for the electrical submersible pumping in oilfield systems," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 11, pp. 2077–2083, 2017.
- [25] J.-S. Jang, "Anfis: adaptive-network-based fuzzy inference system," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, 1993.
- [26] P. Senthil Kumar, K. Sivakumar, R. Kanagarajan, and S. Kuberan, "Adaptive neuro fuzzy inference system control of active suspension system with actuator dynamics," *Journal of Vibroengineering*, vol. 20, no. 1, pp. 541–549, 2018.
- [27] A. D. Muradova, G. K. Tairidis, and G. E. Stavroulakis, "Adaptive neuro-fuzzy vibration control of a smart plate," *Numerical Algebra, Control and Optimization*, vol. 7, no. 3, pp. 251–271, 2017.
- [28] P. Teixeira, N. Saad, F. A. Lara-Molina, A. A. Cavalini Jr, and V. Steffen Jr, "Evaluation of parametric models dedicated to a magnetorheological actuator including uncertainty and sensitivity analyses," *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 2019.
- [29] E. H. Koroishi, F. A. Lara-Molina, L. Rocha, and V. Steffen Jr, "Characterization of an electromagnetic actuator applied in the active vibration control of rotating machines," in *Proceedings of the 22nd International Conference of Magnetically Levitated Systems and Linear Drivers-MAGLEV*, 2014.
- [30] R. Storn and K. Price, "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces," *Journal of global optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, 1997.
- [31] F. A. C. Viana, "Surrogate modeling techniques and heuristic optimization methods applied to design and identification problems," Ph.D. dissertation, Federal University of Uberlândia, 2008.
- [32] T. J. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons, 2005.
- [33] E. Koroishi, A. Faria, F. Lara-Molina, and V. Steffen Jr, "Fuzzy modal control applied to smart composite structure," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 628, no. 1. IOP Publishing, 2015, p. 012090.
- [34] H. Ying, *Fuzzy control and modeling: analytical foundations and applications*. Wiley-IEEE Press, 2000.



Joana Pereira Repinaldo Possui graduação em Engenharia da Mecânica (2015) e Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Ciências Mecânicas com ênfase em Sistemas Dinâmicos (2018) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.



Edson Hideki Koroishi possui graduação em Engenharia da Mecânica pela Universidade Estadual Paulista (2006), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista (2009) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (2013). Atualmente é professor efetivo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.



Fabian Andres Lara-Molina possui graduação em Engenharia da Mecânica pela Universidad Militar Nueva Granada (2005), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2008) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2012). Atualmente é professor efetivo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.