



## CONTROLE EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES UTILIZANDO ATUADORES ELETROMAGNÉTICOS EM SISTEMAS MECÂNICOS

### EXPERIMENTAL CONTROL OF VIBRATION USING ELECTROMAGNETIC ACTUATORS IN MECHANICAL SYSTEMS

Flávio Marchezim Junior<sup>1</sup>, Edson Hideki Koroishi<sup>2</sup>

#### RESUMO

O presente trabalho se concentra na análise do controle de vibrações mecânicas. O estudo explora três abordagens para a concepção dos dispositivos de controle empregados na redução das oscilações em uma viga constituída de material compósito. Essas abordagens fundamentam-se nas teorias Regulador Quadrático Linear, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*, e as implementações computacionais ocorreram por meio do software *MatLab/Simulink*. Os resultados evidenciaram uma diminuição nos níveis vibratórios da viga compósita, validando, assim, a eficácia da metodologia investigada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controle de vibrações; *Fuzzy*; Regulador Quadrático Linear.

#### ABSTRACT

The present work focuses on the analysis of the control of mechanical vibrations. The study explores three approaches to the design of control devices used to reduce oscillations in a beam made of composite material. These approaches are based on the Linear Quadratic Regulator, Fuzzy and Neuro-Fuzzy theories, and the computational implementations occurred through the *MatLab/Simulink* software. The results showed a decrease in the vibration levels of the composite beam, thus validating the effectiveness of the investigated methodology.

**KEYWORDS:** Vibration control; Fuzzy; Linear Quadratic Regulator.

## INTRODUÇÃO

O estudo das vibrações tem sido uma área de interesse na humanidade há muitos séculos, remontando a tempos anteriores a Cristo. Pitágoras foi o pioneiro nesse campo, como visto em Pereira (2010), ao descobrir as notas musicais e atribuir caráter científico ao estudo das vibrações. Ele percebeu que uma única corda poderia produzir diferentes sons, seguindo uma lógica, o que iniciou a análise da frequência e período das ondas vibratórias.

De acordo com Rao (2008), o Controle Ativo de Vibrações (AVC - Active Vibration Control) é uma das ferramentas mais avançadas para reduzir vibrações em sistemas mecânicos. O presente trabalho tem como objetivo aplicar técnicas dessa ferramenta em uma viga de material compósito, presa em uma extremidade e livre na outra. Serão utilizados o Regulador Quadrático Linear (LQR - Linear Quadratic Regulator), o controle Fuzzy e o controle Neuro-Fuzzy para projetar o controlador.

<sup>1</sup> Voluntariado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: flaviomarchezim@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 3649884008158789.

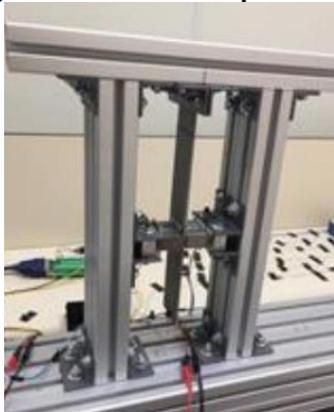
<sup>2</sup> Docente no Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: edsonh@utfpr.edu.br. ID Lattes: 9465293262026260.

## METODOLOGIA

### BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada é composta de uma viga de material compósito, feita de resina epóxi, fibra de vidro e tela de aço 1045, com dimensões de 310 [mm] de comprimento, 59,3 [mm] de largura e 2 [mm] de espessura. Ela está fixada verticalmente entre dois atuadores eletromagnéticos, denominados AEM1 e AEM2, posicionados na estrutura. Eles são responsáveis pela implementação do controle e estão localizados a uma distância de cerca de 1,5 mm da viga.

Figura 1 – Bancada experimental



Fonte: Silva (2020).

Para desenvolver os programas de computador e realizar simulações numéricas, foi utilizado o software MatLab/Simulink.

### IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

O modelo matemático da estrutura foi obtida via identificação ERA/OKID como visto em Silva (2020).

Figura 2 – Representação ERA/OKID



Fonte: Silva (2020).

Esse algoritmo permite a determinação das matrizes de comportamento dinâmico da bancada. Quando um dos atuadores eletromagnéticos emite um pulso de entrada na



estrutura, o acelerômetro registra a resposta de saída do sistema. Posteriormente, essas informações de entrada e saída são encaminhadas para o algoritmo OKID, que calcula a média dos parâmetros de Markov e os envia ao algoritmo ERA para identificação do sistema.

## REGULADOR QUADRÁTICO LINEAR

O Regulador Quadrático Linear é uma abordagem de controle ótimo que trata de sistemas dinâmicos. De acordo com Machado (2003), esse tipo de controle otimiza variáveis físicas pré-determinadas, minimizando o índice de desempenho. A equação 1 apresenta o esforço de controle resultante da retroalimentação.

$$\{\mu(t)\} = - [G]\{x(t)\} \quad (1)$$

No qual  $[G]$  é o ganho determinado pela minimização do desempenho dado pela:

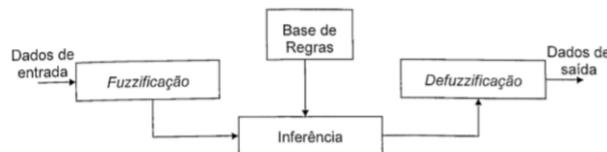
$$J = \int_0^{\infty} (\{x(t)\}^T [Q_{lqr}] \{x(t)\} + \{u(t)\}^T [R_{lqr}] \{u(t)\}) dt \quad (2)$$

Sendo  $[Q_{lqr}]$  uma matriz hermitiana, definida positiva ou real simétrica, das cargas de cada estado. E  $[R_{lqr}]$  é uma matriz hermitiana, definida positiva ou real simétrica, do consumo de energia dos sinais de controle, como visto em Assunção (2001). Esse último parâmetro é importante, pois é através deles que o presente trabalho faz uma análise de otimização de consumo de energia entre os controladores.

## LÓGICA FUZZY

A Figura 3 ilustra um Controlador Fuzzy com seus principais componentes.

**Figura 3 – Componentes controlador Fuzzy**



Fonte: Nuñez (2001).

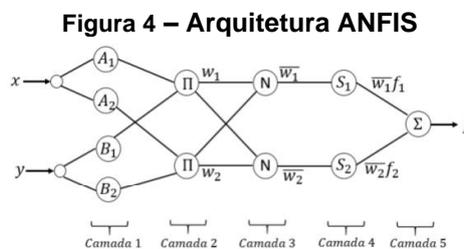
De acordo com Repinaldo (2018), a etapa de fuzzificação consiste em submeter um conjunto de valores numéricos reais ao domínio fuzzy, baseados em funções de pertinência que podem ser do tipo triangular, trapezoidal, gaussiano, senoidal ou sigmoidal. A base de regras contém informações sobre as funções de pertinência associadas a todas as variáveis presentes no sistema. O sistema de inferência Fuzzy envolve a análise dos dados de entrada em conjunto com as regras de controle, resultando na tomada de decisões. Na

etapa de defuzzificação, o valor da variável linguística de saída, no contexto do conjunto Fuzzy, é convertido em um valor numérico de saída.

## CONTROLE NEURO-FUZZY

O controle Neuro-Fuzzy combina a lógica Fuzzy com as Redes Neurais Artificiais (RNAs). Essa abordagem é construída sobre a estrutura chamada Sistema de Inferência Adaptativo Neuro-Difuso (ANFIS), desenvolvida por Jang (1993).

Esse sistema tem o intuito de otimizar os parâmetros da Lógica Fuzzy. Ele é considerado um sistema de inferência Fuzzy que utiliza um algoritmo de treinamento baseado em redes neurais artificiais para ajustar os parâmetros internos de controle, como visto em Nuñez (2001).



Fonte: Jang (1993).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o propósito de avaliar e comparar a eficácia dos controladores. A análise foi feita para dois casos:

- Caso 1: valor de ganho inicial estabelecido.
- Caso 2: ganho otimizado em 10 vezes o consumo de energia.

Os resultados e a comparação entre controladores podem ser observados nos quadros a seguir.

**Quadro 1 – Resultados Caso 1**

<b>Controles</b>	<b>Corrente máx.</b>	<b>Estabilização</b>
LQR	0,4 A	3,6 s
<i>Fuzzy</i>	0,028 A	2,0 s
<i>Neuro-Fuzzy</i>	0,027 A	1,8 s

Fonte: Autoria própria (2023).

**Quadro 2 – Resultados Caso 2**

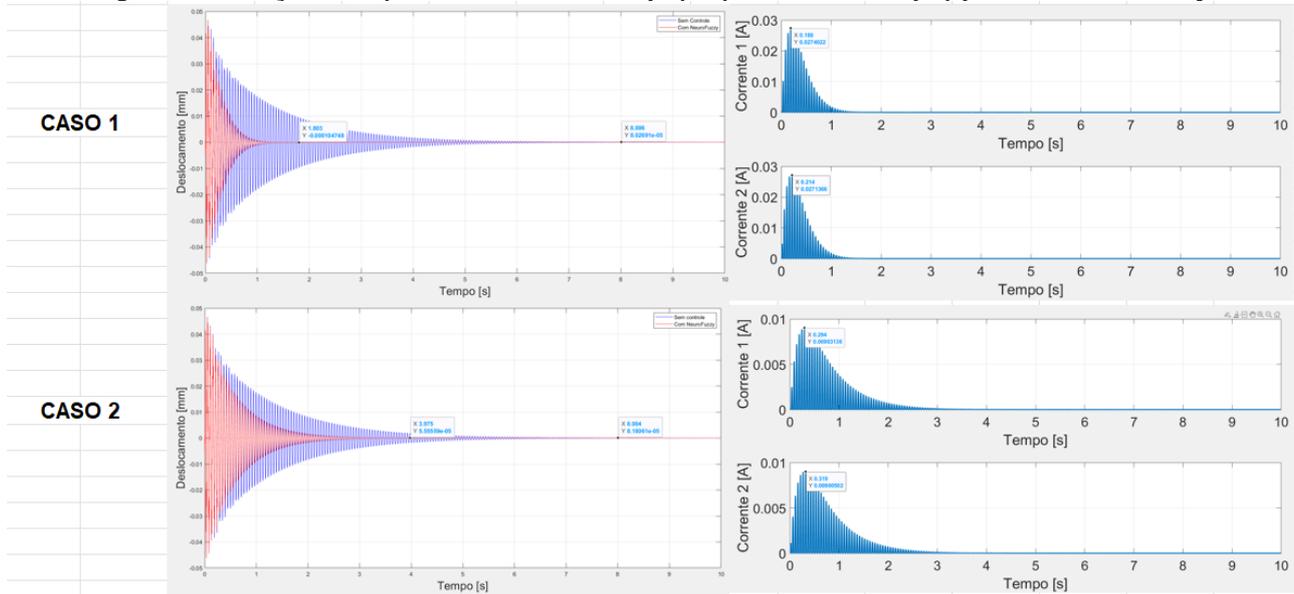
<b>Controles</b>	<b>Corrente máx.</b>	<b>Estabilização</b>
LQR	0,116 A	4,5 s
<i>Fuzzy</i>	0,009 A	4,0 s
<i>Neuro-Fuzzy</i>	0,009 A	3,9 s

Fonte: Autoria própria (2023).



Para fins de análise gráfica, as imagens a seguir representam os resultados obtidos pelo *Neuro-Fuzzy* para os dois casos.

Figura 5 – Relações de (deslocamento x tempo) e (corrente x tempo) para o *Neuro-Fuzzy*



Fonte: Autoria própria (2023).

## CONCLUSÕES

Através das análises realizadas com os controladores LQR, Fuzzy e Neuro-Fuzzy, foi notado um grande aprimoramento na redução das vibrações na viga feita de material compósito.

Enquanto a viga, sem controle, alcançava a estabilidade em aproximadamente 8 segundos, essa estabilização foi reduzida para mais da metade com a utilização dos controladores, valores que podem ser ainda maiores à medida que a corrente utilizada aumenta.

Ao comparar os dois casos, foi possível entender a relação entre corrente e tempo de estabilização e observar como a eficácia de cada controlador melhorava com relação ao anterior. Fato esse que era esperado, já que a fuzzyficação é feita com os mesmos dados utilizados pelo LQR para tornar o algoritmo mais otimizado. E, por consequência, o treinamento em redes neurais com o algoritmo fuzzy também comprova a sua otimização.

Dito isso, o presente trabalho cumpriu com o seu objetivo de analisar a eficácia do Controle Ativo de Vibrações e entender a sua importância para sistemas mecânicos que vibram de forma indesejada. Devido à imprevistos, não foi possível realizar os testes experimentais da bancada e apenas simulações numéricas foram realizadas com base no modelo identificado.



## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela estrutura e oportunidade de estudo. Gostaria de agradecer também ao professor Edson pela orientação e pelo apoio que tem me dado durante a minha formação.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

RAO, S. S. Vibrações mecânicas. 4.ed. São Paulo: **Pearson Prentice Hall**, 2008.424p.

SILVA, C. A. X. Aplicação de técnicas de controle ativo de vibrações em sistemas mecânicos. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, Cornélio Procópio, PR, 2020.

OGATA, K., Engenharia de Controle Moderno. 4ª ed., **Prentice Hall**, São Paulo, 788p, 2003.

KOROISHI, E. H. Controle de vibrações em máquinas rotativas utilizando atuadores eletromagnéticos. **Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica**, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013, 221 f.

NUÑEZ, I. J. C. O uso de Controladores Fuzzy Adaptativos, Implementados em Microcontroladores, no Controle de Vibrações de Sistemas Mecânicos. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica**, Universidade Federal de Uberlândia-UFU, Uberlândia, 2001,90f.

JANG, J. S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. **[S.I.]**: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v.23, n.3, 1993.

ASSUNÇÃO, E.; TEIXEIRA, M. C. M. "Projeto de sistemas de controle via LMIS usando o MATLAB". **Aplicações em Dinâmica e Controle**, São Carlos, p. 350-368, 2001.

MACHADO, E. R. D. Modelagem e Controle de Sistemas Fuzzy Takagi-Sugeno. **Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica**, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2003,190f.

REPINALDO, J. P. Controle Modal Aplicado a uma Estrutura de 2 Graus de Liberdade Utilizando Atuadores Eletromagnéticos. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica**, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018, 128 f.

PEREIRA, R. A., A física da música no Renascimento: uma abordagem históricoepistemológica. **Universidade de São Paulo**, São Paulo, Brasil, 2010.