



Controle Neuro-*Fuzzy* aplicado a atenuação de vibrações de estruturas mecânicas

NEURO-FUZZY CONTROL APPLIED TO VIBRATION ATTENUATION OF MECHANICAL STRUCTURES

Hugo Inoue Nagao*, Edson Hideki Koroishi†

RESUMO

Vibrações em sistemas mecânicos podem gerar desde desconfortos até falhas, colocando em risco a segurança das pessoas. A análise e o estudo das vibrações em sistemas mecânicos utilizam métodos para aumentar a eficiência e reduzir o desgaste dos equipamentos. O presente trabalho tem como objetivos o desenvolvimento e a análise do controle ativo de vibrações em uma estrutura composta por um sistema de massa-mola-amortecedor com 2 graus de liberdade por meio de atuadores eletromagnéticos. A pesquisa consistiu no estudo do modelo matemático do sistema e a comparação e validação dos controladores desenvolvidos. Os controladores *Fuzzy* e Neuro-*Fuzzy* foram utilizados para calcular o esforço de controle necessário para atenuar o nível de vibrações da estrutura. Como o controlador Neuro-*Fuzzy* é baseado nos dados obtidos no controlador *Fuzzy*, os comportamentos dos sistemas devem ser bem próximos para ambos os controladores desenvolvidos. Foram analisados os espectros de frequência, as forças de controle e os tempos necessários para a atenuação da vibração da estrutura para o controlador *Fuzzy* e para o controlador Neuro-*Fuzzy*. Os resultados obtidos se mostraram coerentes com o que era esperado para o estudo, validando o modelo e os métodos utilizados.

Palavras-chave: Controle de vibrações, *Fuzzy*, Neuro-*Fuzzy*, Atuadores eletromagnéticos.

ABSTRACT

Vibrations in mechanical systems can generate from discomfort to failure, putting people's safety at risk. The analysis and study of vibrations in mechanical systems use methods to increase efficiency and reduce equipment wear. The present work has as objectives the development and analysis of the active control of vibrations in a structure composed of a mass-spring-damper system with 2 degrees of freedom by means of electromagnetic actuators. The research consisted of the study of the mathematical model of the system and the comparison and validation of the developed controllers. The Fuzzy and Neuro-Fuzzy controllers were used to calculate the control effort needed to attenuate the structure's vibration level. As the Neuro-Fuzzy controller is based on the data obtained from the Fuzzy controller, the system behaviors must be very close for both developed controllers. The frequency spectra, control forces and times needed to attenuate the vibration of the structure for the Fuzzy controller and for the Neuro-Fuzzy controller were analyzed. The results obtained were consistent with what was expected for the study, validating the model and methods used.

Keywords: Vibration Control, *Fuzzy*, Neuro-*Fuzzy*, Electromagnetic actuators.

1 INTRODUÇÃO

* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil;
hugonagao@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio; edsonh@utfpr.edu.br

A análise e o estudo das vibrações em sistemas mecânicos são cada vez mais importantes para as indústrias atualmente, com os objetivos de aumentar a eficiência, reduzir o desgaste dos equipamentos, aumentando a durabilidade e reduzindo os custos com manutenção e/ou conserto. Segundo Repinaldo (2018), a vibração é um movimento oscilatório em estruturas ou equipamentos que podem gerar desde desconfortos até falhas que colocam em risco a segurança das pessoas. Almeida (2016) afirma que complicações de saúde como mal-estar, problemas cardiovasculares e respiratórios, lesões na coluna cervical, alterações das funções fisiológicas e o desenvolvimento da Doença de Raynaud são muitas vezes, diretamente relacionadas a vibrações. Diante deste cenário, surge a questão: Como podemos atenuar vibrações em sistemas mecânicos?

O controle ativo de vibrações (AVC- do inglês active vibration control) é o método mais avançado para atenuação de vibrações e é composto por sensores, atuadores e por uma unidade de controle, onde um conjunto de técnicas são desenvolvidas para a aplicação de forças dinâmicas para a redução de vibrações indesejadas (QUEIROZ, 2007). Entre os métodos de controle ativo, o controle modal se destaca, pois utiliza um modelo numérico reduzido, implicando em uma redução do custo computacional, o que permite representar o comportamento dinâmico da estrutura de maneira satisfatória mesmo com a utilização de um número limitado de modos (KOROISHI, 2013).

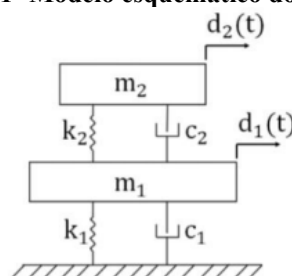
O presente trabalho tem como objetivos desenvolver, analisar e comparar dois sistemas de controle ativo de vibrações para a estrutura de 2 graus de liberdade baseados na lógica *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy* no projeto dos controladores.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Sistema de 2 graus de liberdade

O sistema estudado consiste em um sistema massa-mola-amortecedor, composto por duas massas m_1 e m_2 , duas molas com coeficientes de rigidez k_1 e k_2 , e amortecedores com coeficientes de amortecimento c_1 e c_2 , ilustrado na Fig. 1 e com os respectivos valores na Tab. 1.

Figura 1- Modelo esquemático do sistema



Fonte: Repinaldo (2018)

Tabela 1 – Parâmetros da estrutura

Parâmetro	Valor
Massa (m_1)	4,38262 Kg
Rigidez (k_1)	$2,1506 \times 10^{+04}$ N/m
Amortecimento (c_1)	14,4314 N.s/m
Massa (m_2)	1,93959 Kg
Rigidez (k_2)	$1,4740 \times 10^{+04}$ N/m
Amortecimento (c_2)	$3,1817 \times 10^{-08}$ N.s/m

Fonte: Repinaldo (2018).



O modelo do sistema de dois graus de liberdade é apresentado pela Eq. (1).

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{d}_1 \\ \ddot{d}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Resumindo a Eq. (1) tem-se a Eq. (2).

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C_a]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F\} \quad (2)$$

2.2 Transformação modal

O objetivo de realizar a transformação modal é a partir de uma equação diferencial acoplada, obter n equações diferenciais desacopladas, facilitando a análise da dinâmica do sistema. Partindo da Eq. (3).

$$\{\delta\} = [\Phi]\{p\} \quad (3)$$

Aplicando na Equação (2), obtém-se a Eq. (4) que de maneira simplificada é representada pela Eq. (5).

$$[M][\Phi][\Phi]^t\{\ddot{p}\} + [\Phi]^t[C_a][\Phi]\{\dot{p}\} + [\Phi]^t[K][\Phi]\{p\} = [\Phi]^t\{F\} \quad (4)$$

$$[M']\{\ddot{p}\} + [C_a']\{\dot{p}\} + [K']\{p\} = \{F'\} \quad (5)$$

2.3 Representação em espaço de estados

Segundo Ogata (2010), os ganhos do controlador são calculados a partir das matrizes que representam o comportamento do sistema que se quer controlar. Partindo disso, a representação em espaço de estados é essencial para o estudo dos controladores, já que os sistemas mais complexos podem ter diversas variáveis de entrada e de saída, sendo variantes ou não com o tempo. A representação em espaço de estados é dada pela Eq. (6).

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C_a] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ [M]^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

De maneira simplificada, tem-se as Eq. (7) e Eq. (8).

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + [B]\{F\} + [B_c]\{F_c\} \quad (7)$$

$$\{y\} = [C]\{x\} \quad (8)$$

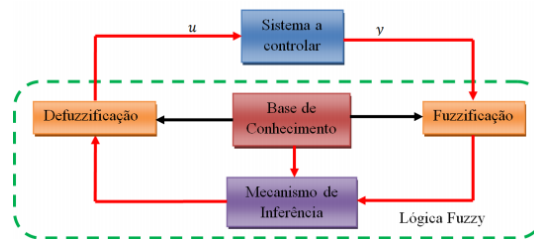
Onde $[A]$ é a matriz de estado, $[B]$ é a matriz de força de excitação, $[B_c]$ é a matriz de força de controle e $[C]$ é a matriz de saída. Toda teoria vista até o momento foi implementada em um programa no software Matlab.

2.4 Controlador Fuzzy

Um sistema de controle consiste em realimentar a planta do sistema para se obter a resposta desejada, o sistema de controle *Fuzzy* também funciona assim, porém requer dois processos, a fuzzificação e a defuzzificação (KOROISHI, 2013).

Segundo Koroishi (2013), a fuzzificação é o processo de conversão dos valores absolutos para valores nebulosos, a partir de uma função de pertinência e a defuzzificação é a tradução da variável linguística de saída pelas regras *Fuzzy* para um valor numérico. A estrutura do controlador *Fuzzy* é ilustrada pela Fig. 2.

Figura 2 – Estrutura do controlador *Fuzzy*

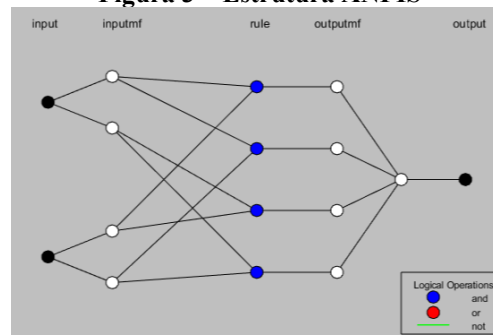


Fonte: Koroishi (2013)

2.5 Controlador Neuro-*Fuzzy*

O controle Neuro-*Fuzzy* é baseado na arquitetura conhecida como sistema de inferência adaptativo neuro-difuso (ANFIS), consiste na previsão e aproximação de funções a partir de dados de entradas e saída, do tipo e do número de funções de pertinência (SILVA, 2020). A estrutura do ANFIS é composta por multicamadas, ligadas através de pesos por conexões unidirecionais e aprendizado supervisionado (REPINALDO, 2018). Neste trabalho, foi desenvolvido um controlador utilizando o ANFIS no software Matlab que foi alimentado com dados obtidos com o controlador *Fuzzy*. A Figura 3 ilustra a estrutura ANFIS utilizada no controlador.

Figura 3 – Estrutura ANFIS



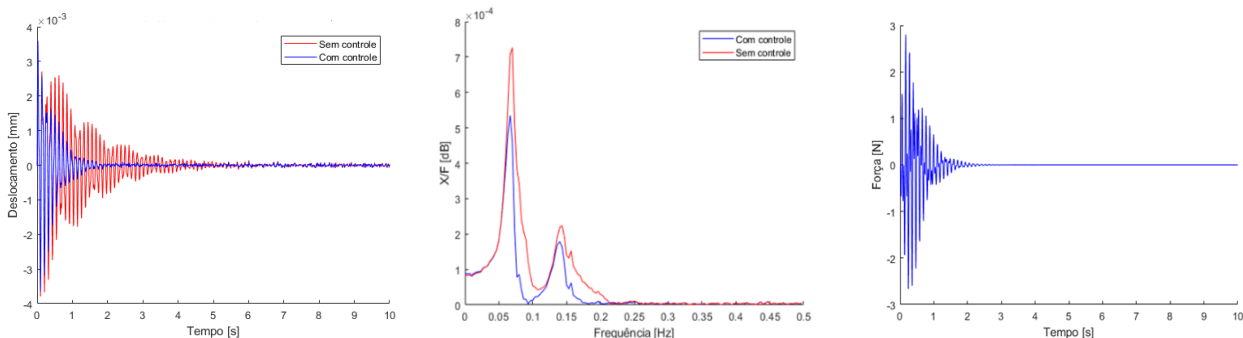
Fonte: Autoria Própria (2021)

3 RESULTADOS

3.1 Controle *Fuzzy*

Para o controlador *Fuzzy*, obteve-se uma redução do tempo de atenuação de 3,39s, de 6,33s para o caso sem controle reduzindo para 2,94s no caso com controle, o espectro de frequência no maior pico teve uma redução de 26,35%. A Figura 4 contém o gráfico de deslocamento em função do tempo, o espectro de frequência e a força de controle aplicada, com o valor máximo de 2,80 N.

Figura 4- Gráficos de deslocamento, espectro de frequência, força de controle aplicada *Fuzzy*.

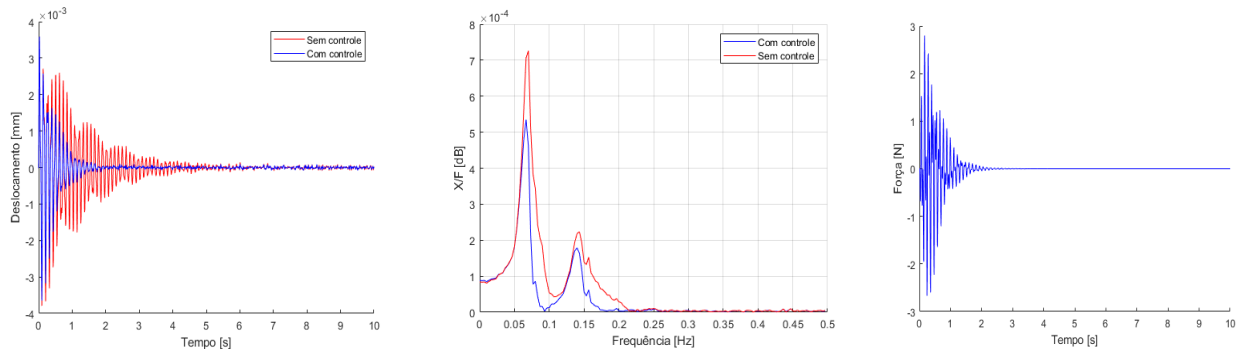


Fonte: Autoria Própria (2021)

3.2 Controle Neuro-*Fuzzy*

Como esperado, os resultados obtidos com o controlador Neuro-*Fuzzy* se mostraram semelhantes com os resultados do controlador *Fuzzy*, visto que o ANFIS foi alimentado com dados obtidos com o *Fuzzy*, convergindo para respostas quase idênticas. Para o controlador Neuro-*Fuzzy*, obteve-se uma redução do tempo de atenuação de 3,49s, de 6,33s para o caso sem controle reduzindo para 2,84s no caso com controle, o espectro de frequência no maior pico teve uma redução de 26,3%. A Figura 5 contém o gráfico de deslocamento em função do tempo, o espectro de frequência e a força de controle aplicada, com o valor máximo de 2,79 N.

Figura 5- Gráficos de deslocamento, espectro de frequência, força de controle aplicada Neuro-*Fuzzy*



Fonte: Autoria Própria (2021)

4 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e analisar dois sistemas de controle de vibrações para a estrutura de 2 graus de liberdade. Após realizar análises sobre as respostas do sistema, pode-se concluir que os resultados encontrados são satisfatórios. Verificou-se que o uso do controlador Neuro-*Fuzzy* promoveu uma redução do espectro de frequência no maior pico de 26,3% e o tempo de atenuação foi reduzido em 3,49s. Estes resultados, quando comparados ao controlador *Fuzzy* se mostram muito semelhantes, o que já era esperado segundo conhecimentos prévios sobre o assunto. Com os parâmetros e as metodologias utilizadas, a simulação permitiu prever como a atenuação poderá ser realizada em modelos reais. Sugere-se para trabalhos futuros, a aplicação dos controles na bancada experimental para testes e comparação com o modelo simulado.



AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo suporte financeiro e estrutural para realização do trabalho. O primeiro autor agradece a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela Bolsa de Iniciação Científica no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

- REPINALDO, J. P. **Controle modal aplicado a uma estrutura de 2 graus de liberdade utilizando atuadores eletromagnéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018.
- BORGES, A. S. **Controle modal de rotores com mancais magnéticos-projeto robusto**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- ALMEIDA, P. C. **Doença de Raynaud como consequência da vibração ocupacional**. Trabalho de conclusão de curso (graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário Ingá, 2016.
- QUEIROZ, E. M. **Controle ativo de vibrações em máquinas-ferramentas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- KOROISHI, E. H. **Controle de vibrações em máquinas rotativas utilizando atuadores eletromagnéticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- SILVA, Camila Albertin Xavier Da. **Aplicação de técnicas de controle ativo de vibrações em sistemas mecânicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2020.