

Atenuação de vibrações aplicada a sistemas mecânicos utilizando atuadores eletromagnéticos

Vibration attenuates applied to mechanical systems using electromagnetic actuators

RESUMO

Andrei Santos Olivera
andrei.oliveira.wk@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Edson Hideki Koroishi
edsonh@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Matheus Rincon Modesto Maroni
matheusmaroni@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

O presente trabalho tem como objetivo o controle ativo de vibrações em uma estrutura flexível, a fim de atenuar a vibração da estrutura a partir do uso de atuadores eletromagnéticos. O método de identificação utilizado foi o algoritmo ERA/OKID, que consiste em um método de identificação de estruturas complexas a partir de dados de entrada e saída do sistema. A técnica de controle utilizada foi o controle ótimo, a partir do uso de Regulador Linear Quadrático e Neuro-Fuzzy. O sistema de controle é responsável por calcular os esforços de controle necessários para alimentar os atuadores eletromagnéticos. Os atuadores eletromagnéticos por sua vez, atuam sobre a estrutura a partir da força eletromagnética, resultando na atenuação de vibração da estrutura. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, apresentando um tempo de acomodação pequeno e redução da amplitude no primeiro modo de vibrar. A fim de validar os resultados numéricos, foram obtidos os resultados experimentais, validando assim a metodologia proposta.

PALAVRAS-CHAVE: Controle ativo. Vibrações. ERA/OKID. Neuro-Fuzzy. LQR.

ABSTRACT

The present work aims to active vibration control in a flexible material structure, in order to attenuate the vibration of the structure using electromagnetic actuators. The identification method used was the ERA / OKID algorithm, which consists of a method of identifying complex structures from the input and output data of the system. The control technique used was the optimal control, based on the use of Linear Quadratic Regulator (LQR) and Neuro-Fuzzy. The control system is responsible for calculating the control efforts required to power the electromagnetic actuators. The electromagnetic actuators, in turn, act on the structure from the electromagnetic force, resulting in the attenuation of the structure's vibration. The results obtained were satisfactory, with a short accommodation time and reduced amplitude in the first mode of vibration. In order to validate the numerical results, experimental results were obtained, thus validating the proposed methodology.

KEYWORDS: Active control. Vibration. ERA/OKID. Neuro-Fuzzy. LQR.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Existem inúmeras fontes de vibrações que podem causar desgastes excessivos em mancais, falhas estruturais e mecânicas, manutenção frequente, afrouxamento de parafusos, entre outros problemas na indústria. Assim sendo, estudar o comportamento dessas vibrações é fundamental para eliminar ou reduzir os níveis vibracionais (OGATA, 2003).

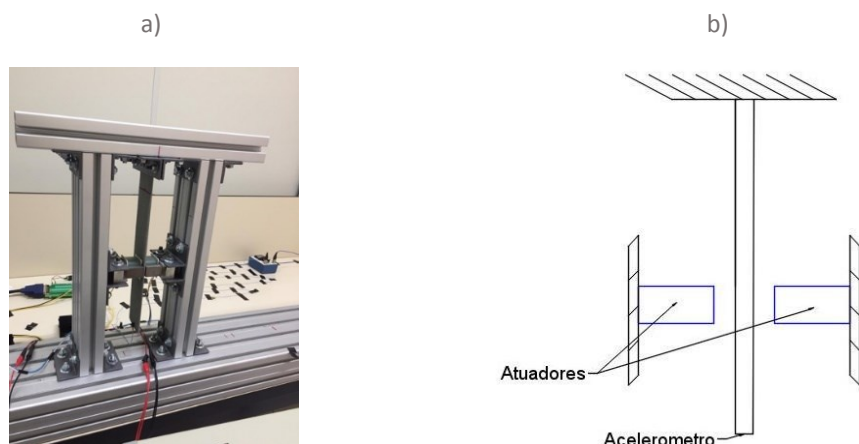
Segundo (BORGES, 2016), o controle ativo é o método mais avançado para atenuações de vibrações, é constituído, geralmente, por sensores, atuadores e uma unidade de controle. É uma técnica em que a força de vibração de uma estrutura é submetida a uma força contrária, fora de fase, mas com a mesma amplitude da força inicial. O resultado dessas duas forças opostas é a anulação das forças e assim a vibração da estrutura cessa (XINKE, 2007).

Dentro deste contexto o presente trabalho dedica-se a implementar técnicas de controle ativo modal de vibração em uma viga de material compósito, utilizando Regulador Linear Quadrático (LQR- *Linear Quadratic Regulator*) e Neuro-Fuzzy para o projeto do controlador. Neste projeto, foram utilizados atuadores eletromagnéticos para aplicação da força de controle sobre a estrutura.

MATERIAIS E MÉTODOS

A bancada experimental consiste em uma viga engastada de material compósito, dois atuadores eletromagnéticos, perfis de alumínio, um acelerômetro, uma placa de aquisição, dois amplificadores e uma fonte de alimentação. A Figura 1 apresenta a bancada experimental e os seus respectivos elementos.

Figura 1– a) Estrutura da viga compósita e b) representação esquemática da estrutura



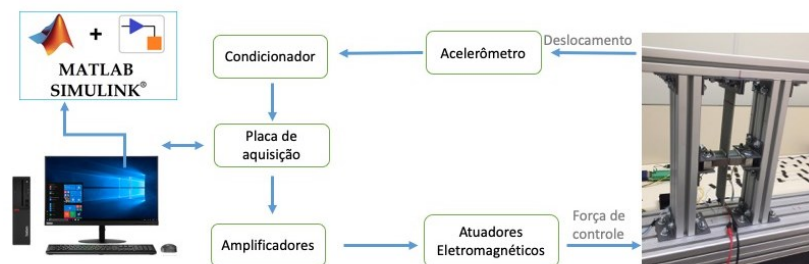
Fonte: Autoria própria (2019).

A viga apresentada na Figura 1 apresenta 310 [mm] de comprimento, 59,3 [mm] de largura e 2 [mm] de espessura, e é formada por resina epóxi, fibra de vidro e tela de aço 1045.

Para fins de modelagem e coleta de dados experimentais, foram realizados procedimentos na bancada de vibração. Para isto, foi emitido um pulso de corrente por um dos atuadores eletromagnéticos, excitando a viga. O sinal de resposta é

coletado através do acelerômetro, que emite sinal a um condicionador de sinais, que melhora a exatidão da resposta. O condicionador é conectado a uma placa de aquisição, que sua por vez é conectado a um computador desktop com os softwares Matlab/Simulink®, que calcula os esforços necessários para atenuar a vibração da viga. Para isto, a placa de aquisição conectada com o computador desktop, é também conectada a amplificadores, que convertem a voltagem de saída da placa de aquisição em corrente elétrica, essa corrente por sua vez, alimenta os atuadores. Esse processo se repete até que a vibração cesse. A Figura 2 ilustra esse ciclo.

Figura 2 – Representação esquemática do sistema de controle



Fonte: Autoria própria (2019).

De acordo com a segunda lei de Newton, pode-se descrever o movimento de uma estrutura pela equação (1).

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

A matriz $[M]$ representa a matriz de massa, $[C_a]$ de amortecimento, $[K]$ de rigidez, $\{x\}$ o vetor deslocamento e $\{F\}$ a força de excitação.

Em seguida, transforma-se essa equação para modelagem em espaço de estado e temos como resultado a equação (2).

$$\begin{aligned} \{\dot{x}(t)\} &= [A]\{x(t)\} + [B_u]\{u(t)\} + [B_w]\{w(t)\} \\ \{y(t)\} &= [C]\{x(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

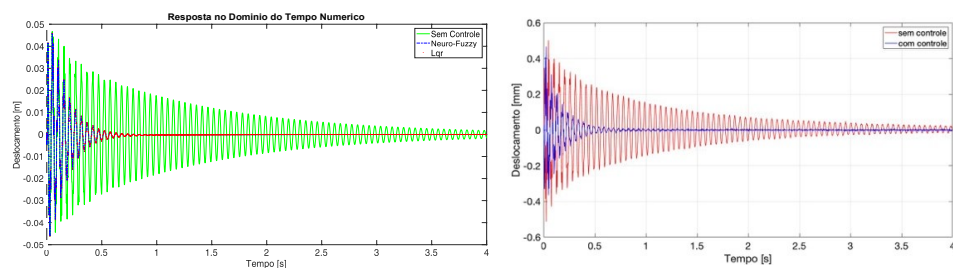
onde, $\{\dot{x}(t)\}$ corresponde ao vetor de estado, $[A]$ a matriz dinâmica $n \times n$, $[B_w]$ a matriz de entrada de excitação $n \times m$, $[B_u]$ corresponde a matriz de controle $n \times 1$, $[C]$ a matriz de saída $s \times n$, $\{u(t)\}$ a força de entrada e $\{y(t)\}$ o vetor de saída. As matrizes que correspondem ao comportamento dinâmico do sistema: $[A]$, $[B_w]$, $[B_u]$, $[C]$, sendo todas no domínio modal, foram obtidas através do algoritmo de identificação ERA/OKID que, segundo (ALVES, 2005), é um algoritmo de identificação capaz de determinar as matrizes que representam o comportamento dinâmico do sistema em espaço de estados.

Definido o modelo matemático que descreve o comportamento da estrutura, foi projetado o Regulador Linear Quadrático (LQR), que é uma estratégia de controle ótimo e amplamente utilizado em controle ativo de vibrações, baseado em retroalimentação no sistema (LIANG, 2018). Também foi projetado o controlador Neuro-Fuzzy que pode ser definido como sendo um sistema de inferência Fuzzy composto por um algoritmo de treinamento baseado em redes neurais artificiais para obtenção dos parâmetros interno de controle. Assim sendo, as redes neurais artificiais permitem a aprendizagem e a otimização, com as vantagens da lógica nebulosa, do sistema Fuzzy (CHAVES, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As respostas foram separadas em partes numéricas e partes experimentais. Como foram trabalhados dois tipos de controladores, foi disposto gráficos sobrepostos para fins comparativos dos métodos na simulação. Infelizmente, devido a pandemia (COVID-19), não foi possível a coleta de dados experimentais do controle Neuro-Fuzzy, portanto os resultados experimentais apresentam apenas resultados do controle LQR (com controle, nas legendas). Todos os resultados numéricos foram obtidos a partir do *software* MATLAB®. A figura abaixo representa o deslocamento em função do tempo numérico e experimental, respectivamente.

Figura 4: Resposta no domínio do tempo numérico e experimental

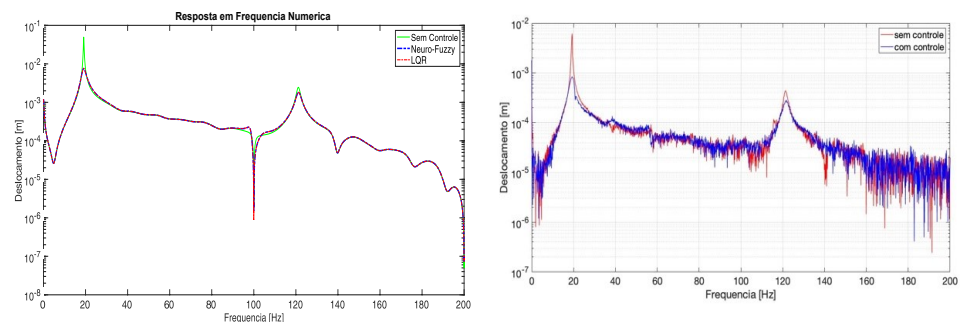


Fonte: Autoria própria (2020).

Segundo a Figura 4 pode-se observar que a atenuação de vibração aconteceu em menos de 1 [s], tanto com o controle LQR como Neuro-Fuzzy. A proximidade de resultados é explicada em virtude de que o método Neuro-Fuzzy baseado em dados fornecidos por outro controlador, LQR no caso deste trabalho. Experimentalmente foi alcançado praticamente os mesmos valores que o resultado simulado.

Para análise de comportamento do sistema, é obtida a função resposta em frequência.

Figura 5: Resposta em frequência numérico e experimental

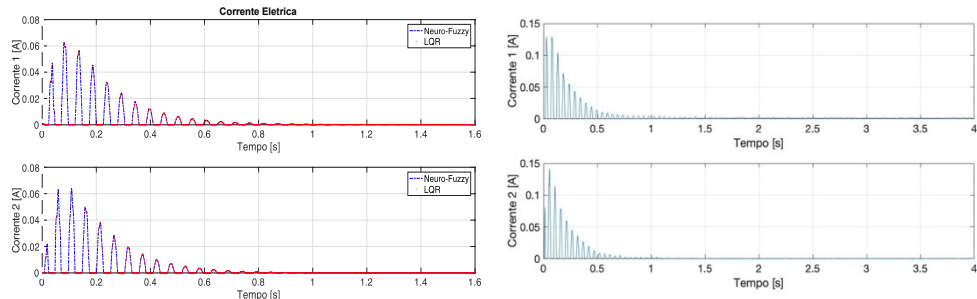


Fonte: Autoria própria (2020).

Nota-se a atenuação também nos picos de frequência dos dois modos de vibrar da viga compósita, o primeiro localizado aproximadamente em 19Hz e o segundo em 121Hz. Observa-se também a similaridade dos resultados dos dois controles. No âmbito experimental suas frequências permaneceram próximas aos resultados simulados: 19,4Hz e 121,9Hz.

A Figura 6 apresenta a comparação entre os dois controladores em relação a utilização de corrente elétrica.

Figura 6: Corrente elétrica



Fonte: Autoria própria (2020).

Como esperado, ambos controladores apresentam utilização de corrente elétrica de forma muito similar. A corrente elétrica experimental também mostrou valores próximos dos valores numéricos.

CONCLUSÕES

Neste trabalho pode-se observar que ambos controladores, LQR e Neuro-Fuzzy, foram eficientes nas simulações. A parte experimental validou os resultados numéricos do controlador LQR, contudo, em virtude da pandemia, não foi possível colher dados experimentais do controlador Neuro-Fuzzy.

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

ALVES, MARCO TÚLIO SANTANA. **Avaliação numérica e experimental dos métodos ERA e ERA/OKID para a identificação de sistemas mecânicos.** Marco Túlio Santana Alves – 2005.

BORGES, A.S. **Controle modal de rotores com mancais magnéticos – Projeto robusto.** 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

CHAVES, L. E. **Modelos computacionais fuzzy e neuro-fuzzy para avaliarem os efeitos da poluição do ar.** 2013. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, 2013.

L. LIANG; J. YUAN; S. ZHANG; P. ZHAO. **Design a software real-time operation platform for wave piercing catamarans motion control using linear quadratic regulator based genetic algorithm.** Public Library of Science, v. 13(4), 5. ed, abr. 2018.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**, Prentice-Hall do Brasil, São Paulo, Brazil, p. 788, 2003.

XINKE, G.; HAIMIN, T. Active vibration control of a cantilever beam using bonded piezoelectric sensors and actuators. In: ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENTS, 2007. **Anais...** Xi'an, China: ICEMI'07,2007.