

Atenuação de Vibrações em Estruturas de Materiais

Compósitos

Vibration Attenuation in Composite Material Structures

RESUMO

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

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

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

O presente trabalho teve por objetivo o estudo do controle ativo de vibrações em estruturas flexíveis utilizando atuadores eletromagnéticos. Foram estudadas duas estruturas: viga de aço inoxidável e viga de material compósito. Primeiramente, foi feita a modelagem matemática dos sistemas físicos e, a partir desse modelo, o controlador Regulador Linear Quadrático foi projetado. A metodologia foi analisada numérica e experimentalmente. O controle numérico foi projetado utilizando o programa computacional MatLab/Simulink e o controle experimental foi realizado em uma bancada de testes. Tanto os resultados numéricos quanto os experimentais comprovaram a validade da metodologia proposta.

PALAVRAS-CHAVE: Viga flexível. Controle ativo de vibrações. Atuador eletromagnético.

ABSTRACT

The present contribution is dedicated to study the active control of vibrations in flexible structures using electromagnetic actuators. Two structures were studied: stainless steel beam and composite material beam. First, the systems physical mathematical modeling was performed and, based on this model, the Linear Quadratic Regulator controller was designed. The methodology was analyzed numerically and experimentally. The numerical control was designed using the computer program MatLab / Simulink and the experimental control was performed on a test bench. Both numerical and experimental results proved the validity of the proposed methodology.

KEYWORDS: Flexible beam. Active vibration control. Electromagnetic actuator.

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

Devido à grande dinâmica de operação na área mecânica, muitas máquinas e equipamentos geram um elevado nível de vibrações, que muitas vezes podem resultar em consequências prejudiciais à estrutura. Portanto, algumas técnicas foram criadas para controlar as vibrações nas estruturas. Entre elas, destaca-se o Controle Ativo, que é o conjunto de técnicas mais avançado para atenuação de vibrações, composto por sensores, atuadores e uma unidade de controle. Entre as técnicas ativas de controle de vibração, o Controle Modal tem-se destacado, principalmente porque reduz consideravelmente o custo computacional necessário. Isso se deve ao fato de que essa técnica emprega um modelo matemático reduzido que representa a estrutura, que tem seu comportamento dinâmico descrito satisfatoriamente pelo uso de um número limitado de modos que compõem seu modelo matemático (KOROISHI, 2013).

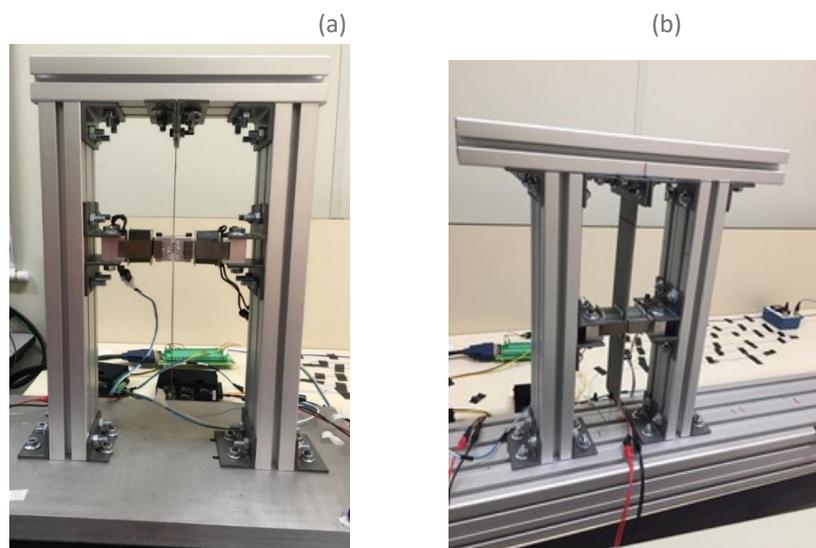
O presente trabalho tem objetivo de estudar técnicas de controle ativo de vibração, numericamente e experimentalmente, utilizando atuadores eletromagnéticos em estruturas flexíveis.

MATERIAL E MÉTODOS

O fenômeno de vibração é caracterizado por um movimento oscilatório natural presente em estruturas e equipamentos. No entanto, quando um sistema exibe um alto nível de propagação de vibração, está sujeito a consequências danosas, como o comprometimento de sua eficiência, resultando em desgaste prematuro ou até mesmo colapso da estrutura (SANTOS et al., 2018).

Este trabalho visa estudar técnicas de controle ativo de vibração em estruturas flexíveis, apresentadas na Figura 1, utilizando atuadores eletromagnéticos, iniciando pela montagem das estruturas, modelagem matemática, identificação de parâmetros, controle numérico e finalmente controle experimental.

Figura 1 – (a) Viga de aço inoxidável (b) Viga de material compósito.



Fonte: Autoria Própria (2019).

MODELAGEM DOS SISTEMAS

De acordo com a segunda Lei de Newton, a Eq. (1) representa a equação de movimento da estrutura, em que $[M]$, $[K]$ e $[C_a]$ representam as matrizes elementares de massa, rigidez e amortecimento, respectivamente. A equação de movimento escrita na forma de espaço de estados, de acordo com (OGATA, 2003), é apresentada pela Eq. (2), em que $[A]$ é a matriz dinâmica, $[B_{exc}]$ é a matriz de entrada, $[B_{cont}]$ é a matriz de controle, $[C]$ é a matriz de saída, enquanto $\{\rho\}$ corresponde ao vetor de estados.

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

$$\begin{aligned} \{\dot{\rho}\} &= [A]\{\rho\} + [B_{exc}]\{f\} + [B_{cont}]\{f_{cont}\} \\ \{y\} &= [C]\{\rho\} \end{aligned} \quad (2)$$

Para a obtenção do modelo matemático, que é parte fundamental do estudo de sistemas dinâmicos, utilizou-se, para a estrutura de aço inoxidável a metodologia do problema inverso, que consiste em aplicar uma entrada no sistema e medir uma saída, gerando assim sua Função Resposta em Frequência (FRF) e através de técnicas de otimização encontram-se os parâmetros físicos desconhecidos do sistema, enquanto para a estrutura de material compósito utilizou-se o método ERA/OKID, que, segundo (ALVES, 2005), é um algoritmo de identificação que é capaz de determinar as matrizes que representam o comportamento dinâmico do sistema em espaço de estados.

Desta forma, a Tabela 1 e a Equação 3 apresentam, respectivamente, os parâmetros identificados de cada uma da viga de aço inoxidável e o modelo em espaço de estados identificados para a viga de material compósito.

Tabela 1 – Parâmetros identificados do sistema de aço inoxidável.

E (MPa)	ρ (Kg/m ³)	α	β
$2,3971 \times 10^{12}$	$2,2442 \times 10^4$	0,2964	$2,9873 \times 10^{-5}$

$$\begin{aligned} [A_{modal}] &= \begin{bmatrix} -0.0968 & 120.084 & -1.119 & -0.1748 \\ -120.084 & -1.411 & 2.108 & 1.359 \\ 1.119 & 2.108 & -4.145 & -640.387 \\ -0.174 & -1.359 & 640.387 & -0.417 \end{bmatrix} \\ [B_{modal}] &= \begin{bmatrix} 0.507 \\ 1.933 \\ -1.938 \\ 0.613 \end{bmatrix} \\ [C_{modal}] &= [-0.597 \quad 1.933 \quad -1.938 \quad -0.613] \end{aligned} \quad (3)$$

REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO

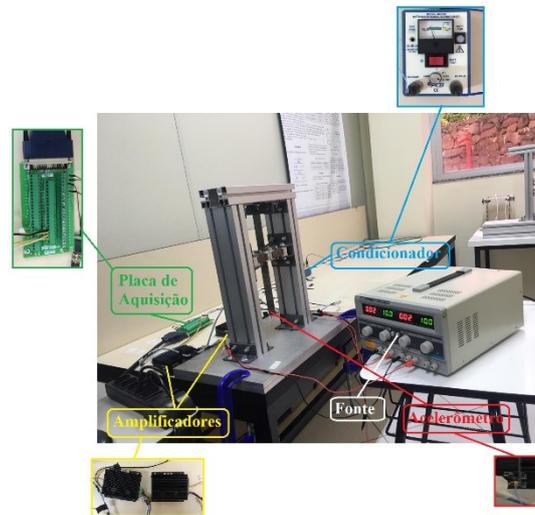
O controlador Regulador Linear Quadrático está cada vez mais difundido na literatura, devido ao seu desempenho e facilidade de implementação (PURNAWAN; MARDLIJAH; PURWANTO, 2017). É amplamente utilizado em muitas aplicações em que é necessário um controle otimizado. A implementação desse

tipo de estratégia de controle inclui o feedback dos estados, que serão ponderados para minimizar a função custo (BURNS,2001).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes foram realizados numericamente para ambas as estruturas, com auxílio do programa computacional MatLab / Simulink; e experimentalmente, apenas para a viga de aço inoxidável em uma bancada de testes desenvolvida neste trabalho, apresentada na Figura (2).

Figura 2 – Bancada de testes.



Fonte: Autoria Própria (2019).

A Figura (3) ilustra o modelo esquemático de controle experimental.

Figura 3 – Modelo esquemático de controle.

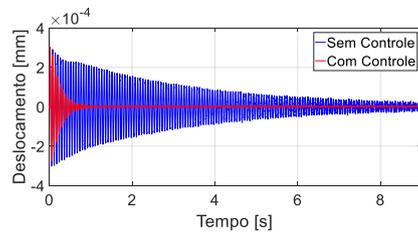


Fonte: Autoria Própria (2019).

Os resultados do controle numérico para a estrutura de aço inoxidável (Estrutura 1) são apresentados pelas Figuras (4) a (6), enquanto que para a estrutura de material compósito (Estrutura 2) são apresentados pelas figuras (7) a (9). Conforme pode ser observado pelos gráficos, o controlador LQR apresentou um desempenho numérico satisfatório em ambos os casos. Para a Estrutura 1 apresentou um tempo de acomodação de cerca de 0,85 s e uma redução no pico da FRF de 7,45 dB no primeiro modo e de 17,68 dB no segundo modo. A corrente elétrica máxima utilizada foi de 0,1128 [A]. Já para a Estrutura 2 apresentou um tempo de acomodação de menos de 1s e uma redução no pico da FRF de 19 dB no

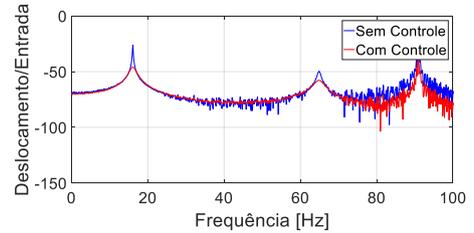
primeiro modo e de 121 dB no segundo modo. A corrente elétrica máxima utilizada foi de 0,062 [A].

Figura 4 – Deslocamento estrutura 1.



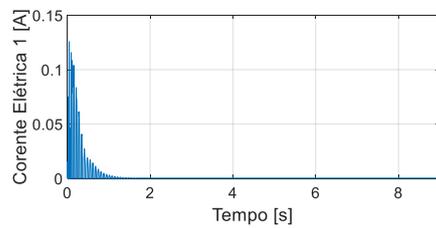
Fonte: Autoria Própria (2019).

Figura 5 – FRF estrutura 1.

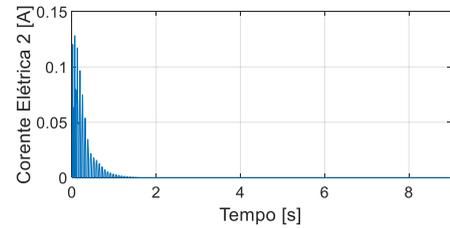


Fonte: Autoria Própria (2019).

Figura 6 – Correntes elétricas Estrutura 1.

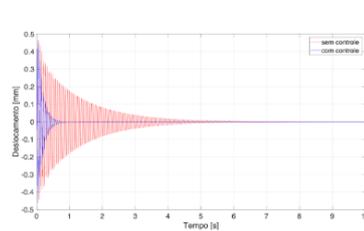


Fonte: Autoria Própria (2019).



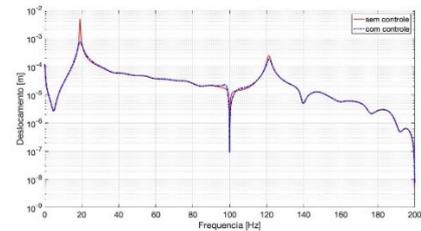
Fonte: Autoria Própria (2019)..

Figura 7 – Deslocamento Estrutura 2.



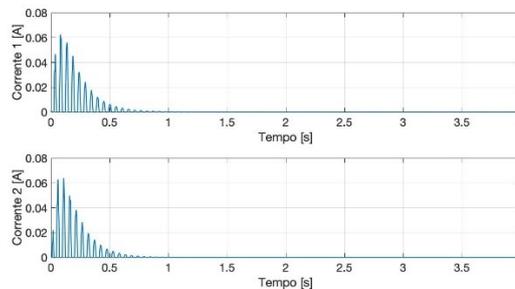
Fonte: Autoria Própria (2019).

Figura 8 – FRF Estrutura 2.



Fonte: Autoria Própria (2019).

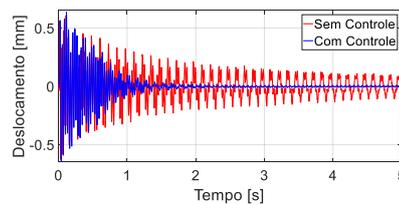
Figura 9 – Correntes elétricas Estrutura 2



Fonte: Autoria Própria (2019).

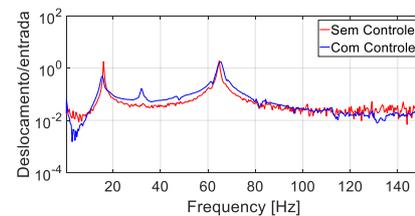
O controle experimental foi realizado somente na Estrutura 1, e seus resultados são apresentados pelas Figuras (10) a (12). No controle experimental, o tempo de acomodação foi de 1,28 s e a redução nos picos da FRF foi de 1,2956 dB no primeiro modo e 0,2978 dB no segundo modo. O pico de corrente elétrica foi de 1,488 A.

Figura 10 – Deslocamento Estrutura 1.



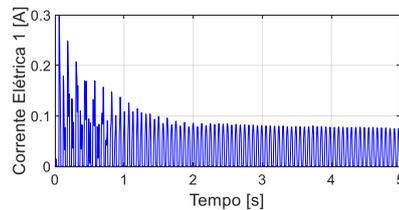
Fonte: Autoria Própria (2019).

Figura 11 – FRF Estrutura 1.

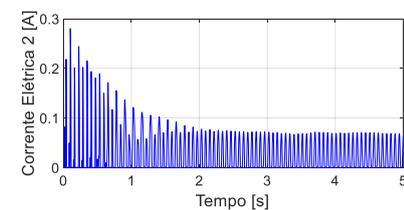


Fonte: Autoria Própria (2019).

Figura 12 – Correntes elétricas experimentais Estrutura 1



Fonte: Autoria Própria (2019).



Fonte: Autoria Própria (2019).

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo construção, identificação, modelagem, controle numérico e experimental de vibrações em duas estruturas flexíveis compostas de materiais diferentes. Primeiramente, quando as bancadas foram montadas, os parâmetros físicos das estruturas foram identificados. Em seguida, realizou-se a modelagem dinâmica de ambos os sistemas e o projeto do controlador e, finalmente, foram realizadas simulações numéricas e controle experimental. O controlador LQR apresentou excelente desempenho tanto numérica quanto experimentalmente, embora experimentalmente tenha sido realizado apenas o controle para a Estrutura 1.

De modo geral, pode-se concluir que a metodologia proposta e as ferramentas utilizadas apresentaram resultados satisfatórios, possibilitando seu uso para melhorar o desempenho do controle ativo de vibração em estruturas flexíveis. Em virtude da pandemia, não foi possível obter os resultados experimentais para a viga de material compósito.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio e suporte material. Os autores também agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo 402581/2016-4).

REFERÊNCIAS

ALVES, M. T. S. **A Numerical and Experimental Evaluation of ERA and ERA/OKID for Mechanical Systems Identification**. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

BURNS R. S. **Advanced control engineering**. 1. ed. London: Butterworth, 2001.

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

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

PURNAWAN, H.; MARDLIJAH; PURWANTO, E. B. **Design of linear quadratic regulator (LQR) control system for flight stability of LSU-05**. Journal of Physics: Conference Series, v. 890, 2017

SANTOS, W. F; SILVA, C. A. X. ; REPINALDO, J. P. ; KOROISHI, E. H. Controle ativo de vibrações em uma viga flexível utilizando desigualdades matriciais lineares. *In*: VII Simpósio Paranaense de Engenharia Mecânica. **Anais...** Cornélio Procópio, 2018.