

Atenuação de vibrações aplicado a uma viga flexível utilizando controle LQR através de atuadores eletromagnéticos

Vibration Attenuation applied to a flexible beam using LQR control through electromagnetic actuators

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

Breno Pagliuse
Autor
pagliuse@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

O presente trabalho tem por objetivo o estudo do controle ativo de vibração de uma viga flexível utilizando atuadores eletromagnéticos. Para isso, a estrutura foi construída e seus parâmetros foram identificados. Depois disso, foi feita a modelagem matemática do sistema físico e, a partir desse modelo, o controlador Linear Quadrático Regular (LQR) 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.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

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



ABSTRACT

The present contribution is dedicated to active vibration control of a flexible beam using electromagnetic actuators. For this, the structure was built and its parameters were identified. After that, the mathematical modeling of the physical system was done, and from this model, the controller Linear Quadratic Regulator (LQR) was designed. The methodology was analyzed numerical and experimentally. The numerical control was projected using software MatLab/Simulink software and the experimental control was performed in a test bench. Both the numerical and experimental results proved the validity of the proposed methodology.

KEYWORDS: Flexible Beam. Active Vibration Control. Electromagnetic Actuator

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 um protótipo de viga flexível.

MATERIAL E MÉTODOS

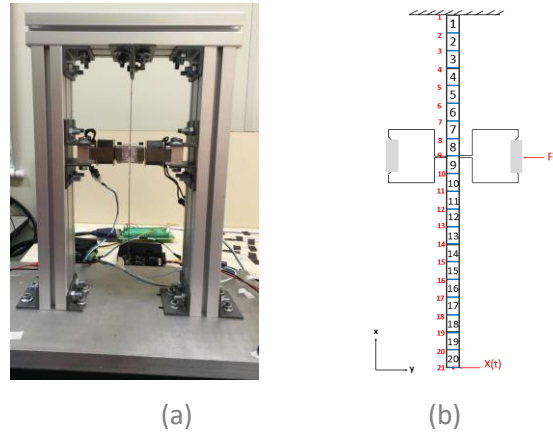
O fenômeno de vibração é caracterizado por um movimento oscilatório natural presente em estruturas e equipamentos. No entanto, quando um sistema exibe um alto nível de propagação de vibração, está sujeito a consequências danosas, como o comprometimento de sua eficiência, resultando em desgaste prematuro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

Este trabalho visa estudar técnicas de controle ativo de vibração em uma viga flexível, mostrado na Figura 1 (a), utilizando atuadores eletromagnéticos, iniciando pela montagem da estrutura, modelagem matemática, identificação de parâmetros, controle numérico e finalmente controle experimental. A Figura 1 (b) apresenta o modelo matemático discretizado da viga. A viga possui dimensões de 300 mm de comprimento, 26,5 mm de largura e 1 mm de espessura, e foi dividida em 20 elementos finitos, com 15 mm de comprimento cada. Uma força impulsiva foi aplicada no nó 9 pelos próprios atuadores e um acelerômetro foi posicionado no nó 21. A viga possui uma massa pontual de 264,07 g no nó 9, que representam o par de "I" dos atuadores.

MODELAGEM DO SISTEMA

De acordo com a segunda Lei de Newton, a Eq. (1) representa a equação de movimento da estrutura, em que $[M]$, $[K]$ e $[C]$ 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 $[p]$ corresponde ao vetor de estados.

Figura 1 – (a) Viga Flexível (b) Modelo Esquemático.



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

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

Para a obtenção do modelo matemático, que é parte fundamental do estudo de sistemas dinâmicos, utilizou-se 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 meios de otimização encontrar os parâmetros físicos desconhecidos do sistema.

Utilizou-se então o Algoritmo Genético como meio de otimização, que são métodos de busca baseados nos princípios da seleção natural e da genética (FRASER, 1957; BREMERMAN, 1958). O GA simula o fenômeno natural, propondo encontrar os melhores valores que se ajustem à curva desejada. GA é uma técnica de busca baseada em processos de seleção natural para sobrevivência através da genética populacional (HOLLAND, 1992). Para que os GAs comecem a evoluir, usamos passos de seleção, cruzamento, mutação e substituição, onde o mecanismo de sobrevivência pode ser aplicado às soluções candidatas (GOLDBERG, 1989; HAUPT; HAUPT, 1998). Os valores dos parâmetros de módulo de elasticidade E , massa específica ρ e as constantes de proporcionalidade α e β identificados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros identificados do sistema.

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

TÉCNICAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle tratam basicamente da manutenção de grandezas como temperatura e pressão em valores operacionais desejados ou da condução

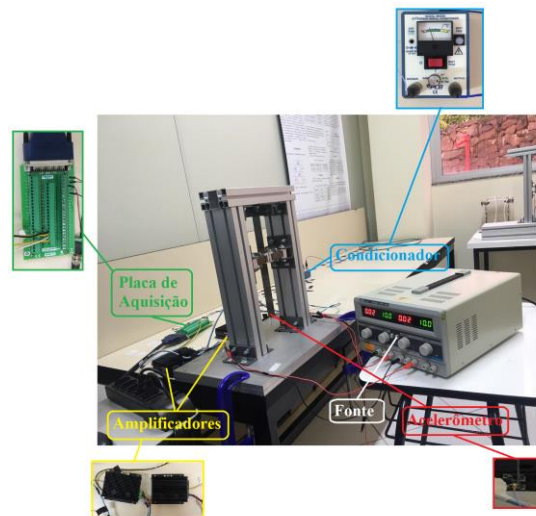
de uma determinada variável a determinados valores. (PINHEIRO, 2009). A técnica de controle consiste em obter os dados da saída do sistema, por meio de sensores. Com estes dados, o controlador toma as decisões necessárias, comparando as saídas com um valor pré-definido e envia os comandos necessários ao atuador, o qual ajusta uma ação para correção do erro com o intuito de melhorar o desempenho do sistema e obter uma variável de saída o mais próximo possível do desejado.

O controlador Regulador Quadrático Linear 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, com auxílio do programa computacional MatLab / Simulink e experimentalmente, em uma bancada de testes desenvolvida neste trabalho, apresentada na Figura (2).

Figura 2 – Bancada de testes.



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

Figura 3 – Modelo esquemático de controle.



Os resultados do controle numérico são apresentados pelas Figuras (4) a (6). Conforme pode ser observado pelos gráficos, o controlador LQR apresentou um desempenho numérico satisfatório. Observa-se que 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].

Figura 4 – Deslocamento numérico.

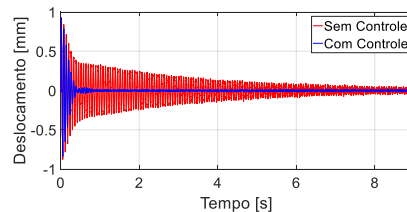


Figura 5 – FRF numérica.

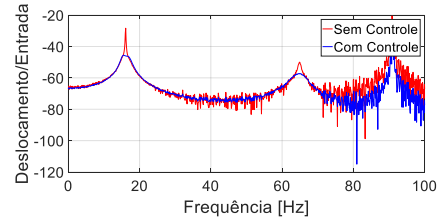
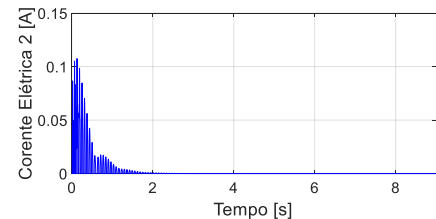
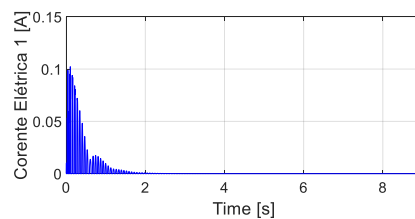


Figura 6 – Correntes elétricas numéricas.



Os resultados do controle experimental, realizado na bancada de testes já apresentada na Figura (2) são apresentados pelas Figuras (7) a (9).

Figura 7 – Deslocamento experimental.

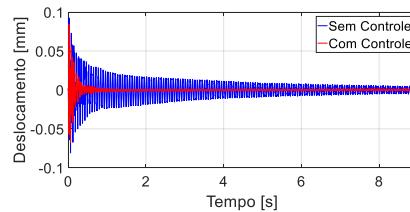


Figura 8 – FRF experimental.

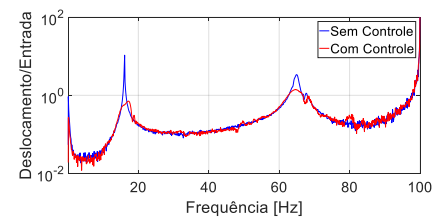
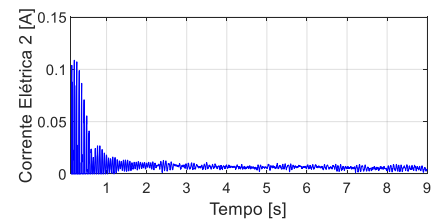
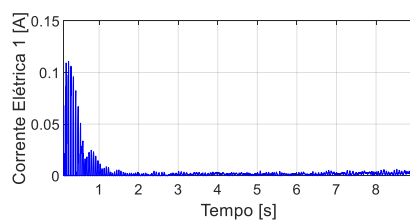


Figura 9 – Correntes elétricas experimentais.



Observando os resultados do controle experimental, nota-se que o controlador LQR apresentou desempenho satisfatório, bem próximo do numérico. O tempo de acomodação foi de cerca de 0,4 s e uma redução nos picos da FRF de 9,94 dB no primeiro modo e 1,97 dB no segundo modo. A máxima corrente elétrica utilizada foi de 0,1108 [A]. Entretanto, é importante ressaltar que ocorreu um pequeno distúrbio, logo após o sistema ser controlado, por volta do tempo de 1 s, que foi provocado pelo próprio atuador, como pode ser observado pelas correntes elétricas que se elevaram um pouco acima do nível de ruído durante esse tempo. Por este motivo, os picos da FRF controlada (principalmente no primeiro modo) não ficaram coerentes.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo montagem, identificação, modelagem, controle numérico e experimental de vibrações em uma estrutura flexível que simula um comportamento de uma viga flexível utilizando atuadores eletromagnéticos. Primeiramente, quando a bancada foi montada, os parâmetros físicos da estrutura foram identificados. Em seguida, realizou-se a modelagem dinâmica do sistema e o projeto do controlador e, finalmente, foram realizadas simulações numéricas e controle experimental. O controlador LQR apresentou excelente desempenho tanto numérica quanto experimentalmente.

O ponto negativo a destacar foi uma pequena perturbação causada pelo atuador que apareceu no controle experimental, o que causa incoerência no pico de FRF controlado. No entanto, 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.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a UTFPR pelo apoio e suporte material. O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e por financiar o projeto (Processo 402581/2016-4)

REFERÊNCIAS

BURNS R. S., 2001, **Advanced Control Engineering**. 1st. ed. London, UK: Butterworth.

GOLDBERG, D. E., 1989. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. The University of Alabama: Society of Automotive Engineers.

HAUPT, R. L. & HAUPT, S. E., 1998. **Practical Genetic Algorithm**. John Wiley G. Sons Inc.

HOLLAND, J. H., 1992. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence**. Cambridge, MA, USA: MIT Press.

KOROISHI, E. H., 2013, **Controle de Vibrações em Máquinas Rotativas utilizando Atuadores Eletromagnéticos**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

OGATA, K., 2003, **Engenharia de Controle Moderno**, Prentice-Hall do Brasil, São Paulo, Brasil.

PINHEIRO, B., 2009, **Sistema de controle tempo real embarcado para automação de manobra de estacionamento**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

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

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 - SIPEM 2018. 2018, Cornélio Procopio.