



Controle Modal de Vibrações em Estrutura Mecânica Utilizando Atuadores Eletromagnéticos

Vibration Modal Control in Mechanical Structures Using Electromagnetic Actuators

Pedro Bertim¹, Edson Hideki Koroishi²

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é reduzir o nível de vibrações com o uso de atuadores eletromagnéticos em uma estrutura mecânica de dois graus de liberdade. Para aplicar o controle ativo de vibrações, foram projetados controladores com base em duas abordagens: o Regulador Linear Quadrático e o Neuro-Fuzzy. Nas simulações numéricas, foram implementados dois sistemas de controle no software MATLAB/Simulink. O primeiro sistema incorpora o modelo inverso do atuador eletromagnético para a determinação das correntes elétricas. Já o segundo sistema emprega o Neuro-Fuzzy, eliminando a necessidade do modelo inverso e simplificando significativamente o sistema de controle. Os resultados foram obtidos mediante simulações numéricas, permitindo uma comparação entre os dois sistemas de controle, sendo analisado os deslocamentos da estrutura e as correntes elétricas utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos. Os resultados demonstraram a eficiência dos controladores projetados assim como a validade de ambos os sistemas de controle com e sem o uso do modelo inverso dos atuadores eletromagnéticos. Desta forma, pode-se concluir que as metodologias propostas foram eficientes para a atenuação de vibrações.

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

ABSTRACT

The aim of this work is to reduce the level of vibrations using electromagnetic actuators in a two-degree-of-freedom mechanical structure. To apply active vibration control, controllers were designed based on two approaches: the Linear Quadratic Regulator and Neuro-Fuzzy. In the numerical simulations, two control systems were implemented in MATLAB/Simulink software. The first system incorporates the inverse model of the electromagnetic actuator to determine the electric currents. The second system uses Neuro-Fuzzy, eliminating the need for the inverse model and significantly simplifying the control system. The results were obtained through numerical simulations, allowing a comparison between the two control systems, analyzing the displacements of the structure and the electric currents used by the electromagnetic actuators. The results demonstrated the efficiency of the controllers designed as well as the validity of both control systems with and without the use of the inverse model of the electromagnetic actuators. In this way, it can be concluded that the proposed methodologies were efficient for vibration attenuation.

KEYWORDS: Vibration Control; *Neuro-Fuzzy*; Linear-Quadratic Regulator.

INTRODUÇÃO

Fortes níveis de vibrações e ruídos podem comprometer projetos de estruturas mecânicas, diminuindo sua vida útil e gerando riscos (SILVA, 2002), por isso, devem ser estudados e controlados.

A teoria do Regulador Linear Quadrático tem o objetivo de resumir o sistema dinâmico em um conjunto de equações diferenciais lineares minimizando o custo, que é descrito por uma equação quadrática.

¹ Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: pedber@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5291897796671188.

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

Já a abordagem *Neuro-Fuzzy*, por sua vez, mescla a lógica *Fuzzy* com redes neurais, sendo a primeira essencial na criação de controladores e a segunda na criação do controle através do conhecimento de dados.

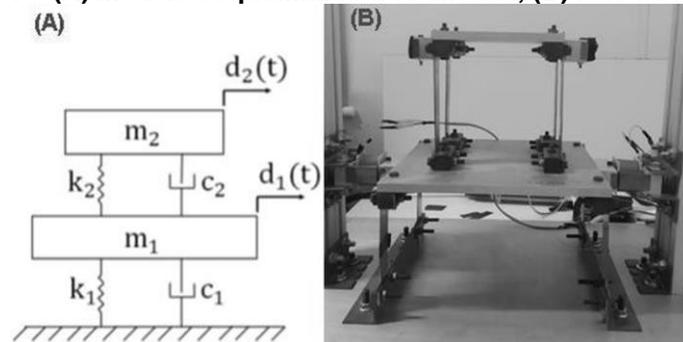
Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de introduzir sistemas de controle vibracional aplicado em uma estrutura mecânica de dois graus de liberdade, a partir de simulações numéricas dos sistemas de controle desenvolvidos com o *software* MATLAB/Simulink.

MATERIAIS E MÉTODOS

SISTEMA DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE

O sistema de dois graus de liberdade (Figura 1) consiste em duas massas, duas molas e dois amortecedores.

Figura 1 – (A) Modelo esquemático da bancada, (B) foto da bancada.



Fonte: REPINALDO, 2018.

O modelo matemático da bancada pode ser descrito pelas Equações (1) e (2).

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + [B]\{F\} + [B_c]\{Fc\} \quad (1)$$

$$\{y\} = [C]\{x\} \quad (2)$$

Onde $[A]$ é a matriz de estados, $[B]$ é a matriz de entrada da força de excitação, $[B_c]$ é a matriz de entrada da força de controle caso possuir e $[C]$ é a matriz de saída.

SISTEMA DE CONTROLE

Os sistemas de controle são compostos por vários componentes que trabalham juntos para atingir um objetivo, relacionados em entradas e saídas, que interpretam dados e emitem comandos para o atuador solucionar um problema, se houver (MARUYAMA, 2017).

A teoria de Regulador Linear Quadrático foi desenvolvida com a finalidade de reduzir o peso das funções ou a execução da realimentação dos estados do sistema (REPINALDO, 2018).

Esse processo de realimentação pode ser representado pelas Equações (3), (4), (5), (6) e (7).

$$\{u(t)\} = -[G]\{x(t)\} \quad (3)$$

Onde $[G]$ é o ganho obtido através da função de custo minimizada dado pela Equação (4).

$$J = \int_0^{\infty} \{ \{x(t)\}^T [Q_{lqr}] \{x(t)\} + \{u(t)\}^T [R_{lqr}] \{u(t)\} \} dt \quad (4)$$

Onde $[Q_{lqr}]$ e $[R_{lqr}]$ são matrizes hermitianas estabelecidas positivas ou reais simétricas. Substituindo-se a Equação (3) na Equação (4), obtém-se a Equação (5).

$$J = \int_0^{\infty} \{ \{x(t)\}^T ([Q_{lqr}] + [G]^T [R_{lqr}] [G]) \{x(t)\} \} dt \quad (5)$$

A matriz de ganho $[G]$ dada pela Equação (6) foi apresentada por Ogata (2003).

$$[G] = [T_{lqr}]^{-1} ([T_{lqr}]^T)^{-1} [B]^T [P_{lqr}] = [R_{lqr}]^{-1} [B]^T [P_{lqr}] \quad (6)$$

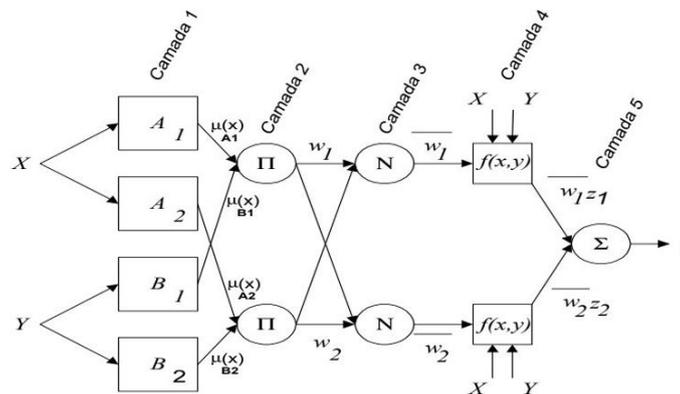
$[P_{lqr}]$ pode ser obtida pela redução da Equação matricial de Riccati, dada pela Equação (7).

$$[A]^T [P_{lqr}] + [P_{lqr}] [A] - [P_{lqr}] [B] [R_{lqr}]^{-1} [B]^T [P_{lqr}] + [Q_{lqr}] = 0 \quad (7)$$

Logo, o ganho $[G]$ é determinado pela matriz $[P_{lqr}]$ substituída na Equação (6).

A teoria *Neuro-Fuzzy* é um sistema composto pela junção da lógica *Fuzzy* e por redes neurais artificiais proporcionando um sistema de alto processamento (Pessanha, 2002). Uma das maneiras de trabalhar com esse sistema é através do comando “*anfis.m*” no *software* MATLAB e é representado pela Figura 2.

Figura 2 – Modelo esquemático Neuro-Fuzzy.



Fonte: PESSANHA, 2002.

Segundo Luccesi, o sistema passa por cinco camadas de neurônios até chegarem a uma única resposta, sendo X e Y as entradas e z a saída.

PROGRAMAS REALIZADOS

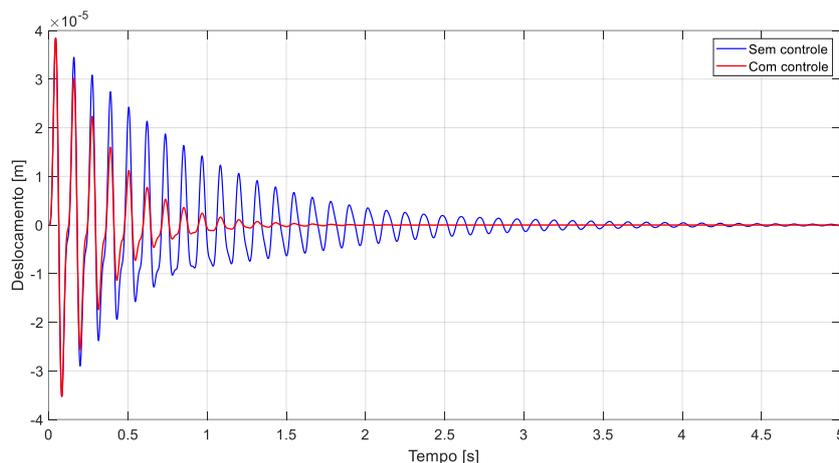
Para as simulações computacionais, foram desenvolvidos programas no *software* MATLAB/Simulink. A princípio, foram realizadas duas análises, uma com a teoria do

Regulador Linear Quadrático no projeto dos controladores, aplicando o modelo inverso do atuador eletromagnético no sistema de controle, que, baseando-se no deslocamento e no esforço de controle, serviu para a obtenção das correntes elétricas dos atuadores. Já a outra análise consistiu na teoria *Neuro-Fuzzy* utilizando as correntes elétricas e as respostas modais da primeira análise para a configuração dos controladores, assim, obteve-se um sistema de controle simplificado sem o modelo inverso do atuador eletromagnético e com o controlador já calculando diretamente as correntes elétricas necessárias pelos atuadores eletromagnéticos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

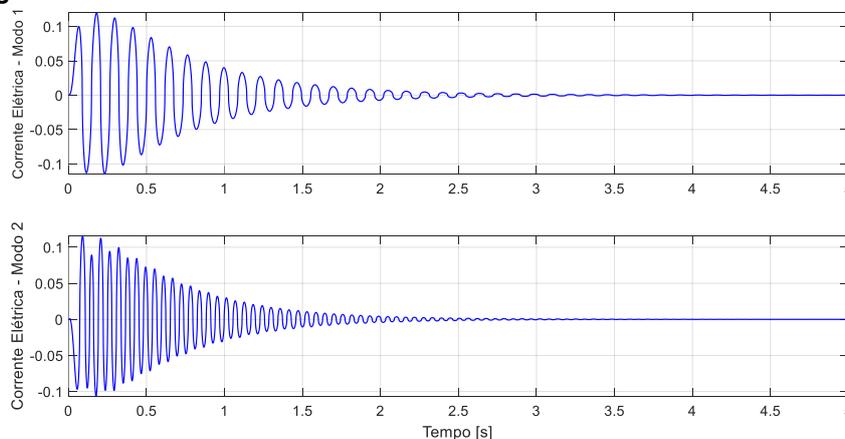
Após a realização das simulações numéricas, foram obtidos os resultados apresentados pelas Figuras 3, 4, 5 e 6 que representam os gráficos resultantes para cada caso.

Figura 3 – Comparação do deslocamento ao longo do tempo com e sem controle de vibrações com modelo inverso.



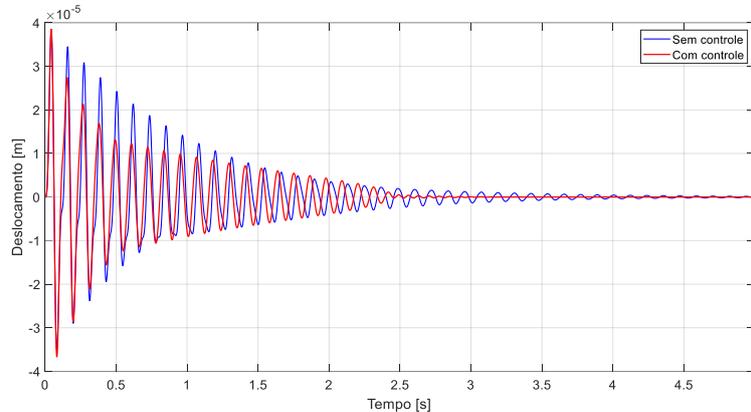
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 4 – Correntes elétricas no modo 1 e modo 2 com modelo inverso.



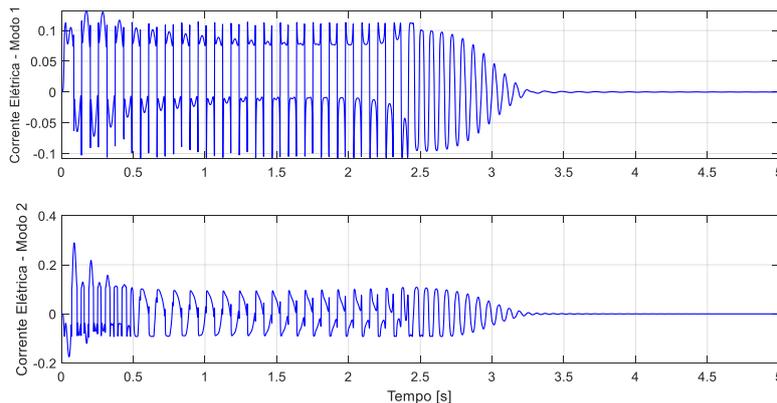
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 5 – Comparação do deslocamento ao longo do tempo com e sem controle de vibrações sem modelo inverso.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 6 – Correntes elétricas no modo 1 e modo 2 sem modelo inverso.



Fonte: Autoria própria, 2023.

De acordo com os resultados, é notável a diminuição rápida das oscilações, logo, o objetivo foi alcançado através dos dois modelos. Entretanto, utilizando-se modelo inverso os resultados são visualmente mais satisfatórios, pois a redução vibracional ocorre rapidamente.

Além disso, as correntes elétricas possuem condições de trabalho mais favoráveis, o que facilita a diminuição de erros no experimento e futuras simulações.

CONCLUSÕES

O objetivo principal do presente trabalho era estudar diferentes métodos de aplicação de controle de vibrações em uma estrutura de dois graus de liberdade. O projeto apresentado de atenuação das vibrações pela teoria do Regulador Linear Quadrático e da teoria *Neuro-Fuzzy* mostraram-se eficientes a partir das simulações numéricas, porém, devido à falta de tempo de aplicação dos testes na bancada de trabalho, o trabalho resumiu-se em simulações.



Conclui-se que o controle ativo de vibrações através da utilização de atuadores eletromagnéticos, baseando-se em duas lógicas, do Regulador Linear Quadrático e *Neuro-Fuzzy*, foi eficiente, logo, os controladores exerceram os papéis esperados avaliados através de simulações numéricas numa estrutura de dois graus de liberdade, entretanto, utilizar atuadores com modelo inverso originando resultados melhores.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais por todo apoio e confiança durante esta trajetória na graduação, que, por mais longe que estejam, sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edson Hideki Koroishi que me trouxe a oportunidade de participar da minha primeira iniciação científica num assunto tão interessante e complexo.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela oportunidade e pela bolsa para realização deste trabalho.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

LUCCHESI, Stéphanie; ROVEDA, Sandra Regina Monteiro Masalskiene. **SISTEMA NEURO-FUZZY NEURAL-FUZZY SYSTEMS**. Sorocaba: p. 5. Acesso em: 11 ago. 2023.

MARUYAMA, Newton. **Introdução aos sistemas de controle**. Pmr-epusp, 2017. 110 slides, color. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/55280403-Pmr3404-aula-1-introducao-os-sistemas-de-controle-newton-maruyama-10-de-marco-de-2017-pmr-epusp.html>>. Acesso em: 11 ago. 2023.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4 ed. Prentice Hall, São Paulo, 2003. Acesso em: 11 ago. 2023.

PESSANHA, José Francisco Moreira. **Sistema de Inferência Neuro-Fuzzy Adaptativo - ANFIS**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002. 52 slides, color. Disponível em: <<https://professorjf.webs.com/ANFIS.pdf>>. Acesso em: 7 set. 2023.

REPINALDO, Joana Pereira. **CONTROLE MODAL APLICADO A UMA ESTRUTURA DE 2 GRAUS DE LIBERDADE UTILIZANDO ATUADORES ELETROMAGNÉTICOS**. 2018. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018.

SILVA, Samuel da. **Vibrações Mecânicas**. 2. ed. Foz do Iguaçu: Centro de Engenharias e Ciências Exatas - Cece, 2009. p. 151. Acesso em: 11 ago. 2023.