



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

Redução de vibrações em estruturas mecânicas utilizando atuadores eletromagnéticos

Vibration reduction in mechanical structures using electromagnetic actuators

Andrei Santos Oliveira*, Edson Hideki Koroish[†],
Camila Albertin Xavier da Silva[‡]

RESUMO

O presente trabalho se refere ao estudo de reduções de vibrações em estruturas mecânicas através de técnicas de controle ativo de vibrações com a utilização de atuadores eletromagnéticos. O estudo propõe a análise entre a relação entre a redução de vibração, em termos de deslocamento, e utilização de corrente elétrica, a fim de alcançar relações ótimas entre estas variáveis. Para isso, foi necessário abordar técnicas de identificação de modelos e de controle ativo, afim de modelar toda estrutura no Matlab/Simulink e projetar os controles responsáveis pela atenuação de vibração. A técnica utilizada de controle ativo foi o Neuro-Fuzzy a partir do Regulador Linear Quadrático, onde o sistema de controle é responsável pelo cálculo dos esforços necessários para alimentar o atuador eletromagnético e reduzir a vibração. Em seguida, foi empregado o MOFPA, algoritmo capaz de realizar uma otimização multi-objetivo a fim de obter uma combinação ótima relacionando atenuação de vibração e consumo de corrente elétrica. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, apresentando pontos que apresentam um bom nível de redução de vibração com um custo menor de corrente elétrica.

Palavras-chave: MOFPA, Neuro-Fuzzy, Vibrações, Controle Ativo.

ABSTRACT

The present work refers to the study of vibration reductions in mechanical structures through active vibration control techniques using electromagnetic actuators. The study proposes an analysis between vibration reduction, in terms of displacement, and use of electric current, in order to reach optimal relationships between these variables. For this, it was necessary to approach the identification of models and active control techniques, in order to model the entire structure in Matlab/Simulink and design the controls responsible for vibration attenuation. The active control technique used was the Neuro-Fuzzy from the Quadratic Linear Regulator, and the control system is responsible for calculating the efforts necessary to feed the electromagnetic actuator and reduce vibration. Then, MOFPA was used, an algorithm capable of performing a multi-objective optimization in order to obtain an optimal combination relating vibration attenuation and electrical current consumption. The results obtained were satisfactory, showing points that present a good level of vibration reduction with a lower cost of electrical current.

Keywords: MOFPA, Neuro-Fuzzy, Vibration, Active Control.

1 INTRODUÇÃO

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

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

[‡] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil; camilaalbertin@hotmail.com



O estudo de vibrações está ligado a vários setores industriais, onde há diversas fontes de vibrações, como máquinas rotativas, compressores, veículos de transporte, fluxo de fluidos, etc. Assim sendo, neste mesmo ambiente, é percebido o quão prejudicial a vibração pode ser, desde afrouxamento de parafusos até a danificação permanente de uma máquina. Dessa forma, o estudo para entender fenômenos e aplicar técnicas para reduzir níveis vibracionais é algo visado (OGATA, 2003).

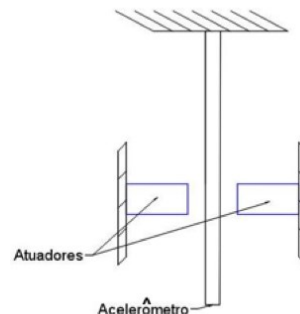
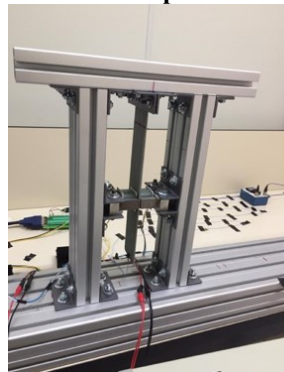
O controle ativo é o método mais avançado para o controle de vibrações, segundo (BORGES, 2016). Para isso, geralmente, utiliza-se sensores, atuadores e uma unidade de controle. Assim, para atenuação acontecer, uma força de vibração de uma estrutura é submetida a uma força contrária, fora de fase, mas com a mesma amplitude da força inicial, o que resulta dessas duas forças opostas é a anulação das forças e conseqüentemente ocorre a atenuação (XINKE, 2007).

Isto posto, o presente trabalho visa aplicar o método de controle ativo em uma estrutura mecânica, através do controlador *Neuro-Fuzzy*, com o acréscimo de aplicação do MOFPA, algoritmo aplicado diretamente nos parâmetros de entrada do controlador, que permite a análise de dois parâmetros, deslocamento e gasto de energia, quantificando-os e possibilitando encontrar valores otimizados para maior eficiência do controle.

2 MÉTODO

O estudo foi realizado com o auxílio da bancada experimental, mostrada na figura a seguir, no laboratório de pesquisa de vibrações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Cornélio Procópio.

Figura 1 – Bancada experimental e representação esquemática da estrutura

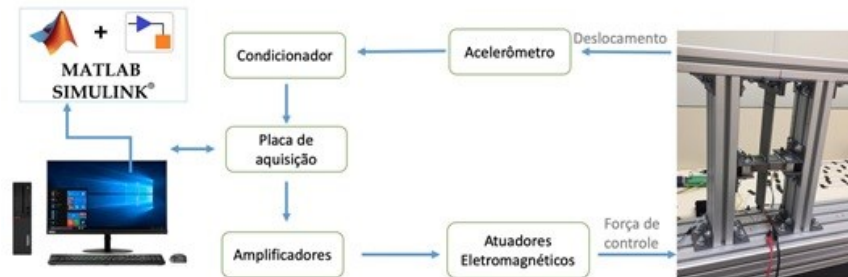


Fonte: Autoria própria (2019)

A viga apresentada na Fig. 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 coleta de dados experimentais e modelagem do sistema a viga analisada foi submetida a um pulso de corrente elétrica por um dos atuadores eletromagnéticos, com o objetivo de causar excitação na viga. Este sinal é então coletado pelo acelerômetro, que por sua vez emite sinal a um condicionador de sinais, a fim de melhorar 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, que alimenta os atuadores. Esse processo se repete até que não exista mais vibração na viga. O processo é representado abaixo.

Figura 2 – Representação esquemática do modelo de controle



Fonte: Autoria própria (2019)

A modelagem de um sistema mecânico parte da segunda lei de Newton que pode ser descrita

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

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

Após isso, é necessário passar a Eq. (1) para espaço de estados, a fim de aplicar os métodos de controle sobre a viga.

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B_u]\{u(t)\} + [B_w]\{w(t)\} \quad (2)$$

$$\{y(t)\} = [C]\{x(t)\} \quad (3)$$

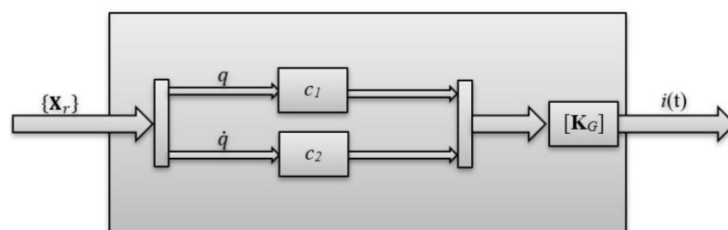
Onde, $\{\dot{x}(t)\}$ corresponde ao vetor de estado, $[A]$ a matriz dinâmica $n \times n$, $[B_w]$ a matriz de entrada de excitação $n \times m$, $[B_u]$ corresponde a matriz de controle $n \times 1$, $[C]$ a matriz de saída $s \times n$, $\{u(t)\}$ a força de entrada e $\{y(t)\}$ o vetor de saída, em que n é a ordem do sistema, m o número de entrada e s o número de saídas.

As matrizes $[A]$, $[B_w]$, $[B_u]$, $[C]$, foram obtidas, no domínio modal, através do método de identificação ERA/OKID que é um algoritmo de identificação capaz de determinar as matrizes que representam o comportamento dinâmico do sistema em espaço de estado (ALVES, 2005).

Com o modelo matemático do sistema foi possível projetar o controlador *Neuro-Fuzzy* nos softwares Matlab/Simulink®, que utiliza redes neurais artificiais, que permitem a aprendizagem e a otimização, com as vantagens da lógica nebulosa, do sistema *Fuzzy*, com a finalidade de unir as melhores qualidades de cada um destes sistemas gerando um sistema melhor (CHAVES, 2013).

Em seguida, para analisar, como os parâmetros de deslocamento e corrente elétrica se relacionam entre si, o controle passou por uma modificação para quantificar o deslocamento modal e velocidade modal foi multiplicando pelas constantes c_1 e c_2 , respectivamente. Essas constantes foram introduzidas como peso da influência do deslocamento modal e velocidade modal, que representam os esforços do controle.

Figura 3 – Representação esquemática do controle



Fonte: DA SILVA (2019)

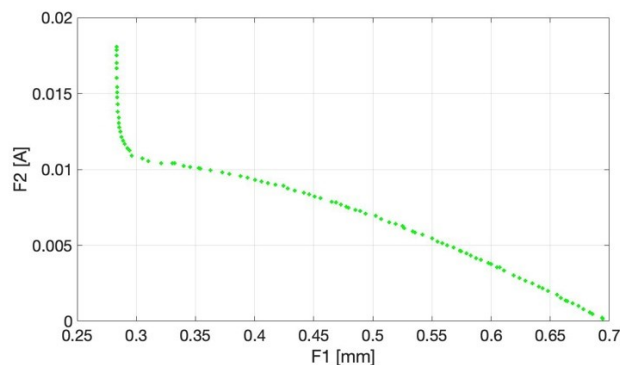


A partir dessa metodologia, foi aplicado o MOFPA (*Multi-Objective Optimization Flower Pollination Algorithm*), algoritmo que atua diretamente nas constantes c_1 e c_2 , mencionadas acima, alterando diretamente nas respostas do controlador na viga. Dessa forma, foi possível analisar possíveis pontos de otimização, tendo como objetivo principal a atenuação de vibração com menor uso de energia, que serão abordados nos resultados.

3 RESULTADOS

Os resultados foram obtidos a partir do software Matlab/Simulink®, representando respostas numéricas. A figura abaixo representa a curva de Pareto, relacionando os dois parâmetros em questão, deslocamento e corrente elétrica.

Figura 4 – Curva de Pareto

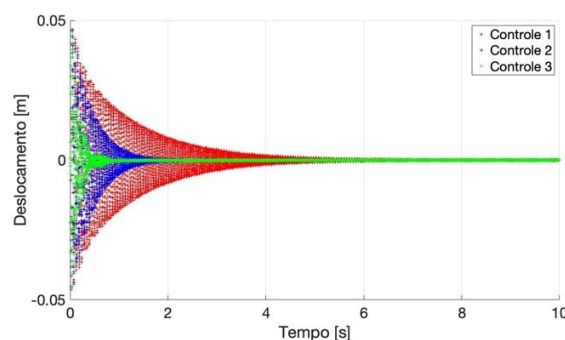


Fonte: Autoria própria (2021)

A Fig. 4 representa a Curva de Pareto, apresenta a influencia dos parâmetros analisados F1 e F2, deslocamento e corrente elétrica, respectivamente, demonstrando que quanto maior a corrente menor o deslocamento e vice-versa. Porém pode-se observar que há um intervalo de corrente elétrica em que a atenuação é praticamente a mesma, esse intervalo corresponde a 0,018 [A] ate, aproximadamente, 0,011 [A], onde o deslocamento entre todo esse intervalo corresponde a 0,28 [mm], representando uma variância percentual de 64% no consumo de energia.

Em seguida estão dispostos os resultados do deslocamento no domínio do tempo com diferentes níveis de atenuação de acordo com o algoritmo capaz de solucionar o problema multi-objetivo e dispô-lo em ordem de atenuação. Nomearemos controlador 1 para os resultados em vermelhos, controlador 2 para os resultados em azul e, por fim, controlador 3 para resultados em verde.

Figura 5 – Deslocamento no domínio do tempo

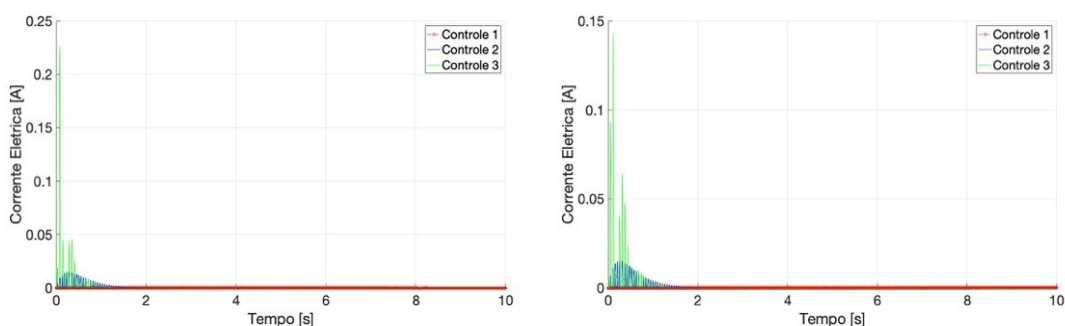


Fonte: Autoria própria (2021)

Com a Fig. 5 é possível notar o impacto no nível de atenuação que o algoritmo MOFPA causa no controlador. Nota-se que no Controle 3 a atenuação acontece em 0,8 [s], enquanto que no Controle 2 em 2 [s] e no Controle 1 somente em 5 [s].

Em seguida foi analisado o gasto energético para as três análises de controle, em cada atuador.

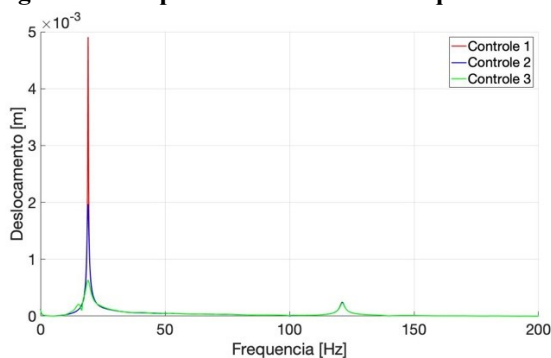
Figura 6 – Gasto de corrente elétrica no domínio do tempo dos atuadores



Fonte: Autoria própria (2021)

A análise de corrente elétrica foi separada para cada atuador, e sobrepostos os resultados de cada caso de controle. Como era de se esperar, o primeiro controle, em vermelho, que apresentou menor atenuação, também apresentou a menor corrente entre todos, com um pico de 0,00015 [A]. O segundo controle, em azul, apresentou um pico em 0,015 [A], uma diferença na ordem de 10^2 em relação ao primeiro. O terceiro e ultimo controle, apresentou 0,22 [A] de corrente máxima, representando uma diferença de 1466 vezes em relação ao primeiro controlador e de 14,6 vezes ao segundo controlador.

Figura 7 – Resposta no domínio da frequência



Fonte: Autoria própria (2021)

A Fig.7 representa a resposta no domínio da frequência dos três casos de controladores. Como pode-se observar, há dois picos de frequência correspondentes aos modos de vibrar do sistema, 19 [Hz] e 121 [Hz], e que cada caso de controle obteve resultados de amplitudes diferentes, de maneira esperada, em que maiores atenuações possuem amplitudes menores (caso Controle 3) e atenuações menores apresentam amplitudes maiores (caso Controle 1).

4 CONCLUSÃO



Os resultados se mostraram satisfatórios, uma vez que as respostas no domínio de frequência comprovam que a simulação numérica representa o sistema, uma vez que os picos de amplitude correspondem as frequências dos modos de vibrar do sistema e seus níveis de redução de amplitudes são relacionados com as respostas no domínio do tempo também.

Em relação ao gasto de energia, os resultados demonstram a grande diferença entre os três casos de controlador, o que revela um grande campo para estudos posteriores de otimização, visto que em termos de deslocamento no tempo o Controlador 3 é apenas 2,5 vezes mais rápido que o Controlador 2 e 14,6 vezes mais custoso energeticamente em comparação com o mesmo.

A curva de Pareto reforça o ponto de estudo de otimização, uma vez que é visível uma faixa de corrente elétrica que apresenta pouca diferença de deslocamento, ou seja, nem sempre a maior corrente representa a melhor escolha para reduzir vibração.

REFERÊNCIAS

- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**, Prentice-Hall do Brasil, São Paulo, Brazil, p. 788, 2003.
- BORGES, A.S. **Controle modal de rotores com mancais magnéticos – Projeto robusto**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- 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.
- 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.
- CHAVES, L. E. **Modelos computacionais fuzzy e neuro-fuzzy para avaliarem os efeitos da poluição do ar**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, 2013.