

Controle ativo de vibrações em estruturas flexíveis utilizando Desigualdades Matriciais Lineares

Active vibration control in flexible structures using Linear Matrix Inequalities

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

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma proposta de controle ativo de vibrações em uma estrutura flexível de um grau de liberdade utilizando atuadores eletromagnéticos e controladores projetados via Desigualdades Matriciais Lineares ou LMIs. A metodologia foi analisada numérica e experimentalmente. O controle numérico foi projetado no *software* MatLab/simulink, e o controle experimental foi aplicado em uma bancada de testes. Em ambos os casos, foram projetados dois tipos de controladores: o controlador LMI e o controlador robusto LMI. Tanto os resultados numéricos como os experimentais comprovaram a validade da metodologia proposta.

PALAVRAS-CHAVE: Controle Ativo de Vibrações. Desigualdades Matriciais Lineares. Atuador Eletromagnético

ABSTRACT

The following work introduce an active vibration control proposal in a flexible structure of one degree of freedom using electromagnetic actuators and controllers projected by Linear Matrix Inequalities or LMIs. The methodology was analyzed numerical and experimentally. The numerical control was projected using MatLab/Simulink software and the experimental control was performed in a test bench. In both cases, were projected two types of controllers: the LMI controllers and the robust controller LMI. Both the numerical and experimental results proved the validity of the proposed methodology.

KEYWORDS: Active Vibration Control. Linear Matrix Inequalities. Electromagnetic Actuator.

Recebido: 30 ago. 2018.

Aprovado: 04 out. 2018.

Direito autoral:

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



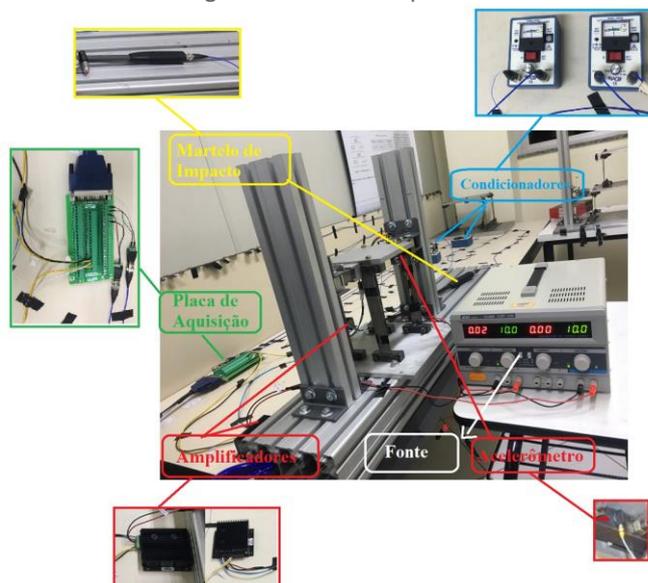
INTRODUÇÃO

Em todos os campos da engenharia, a busca pela otimização dos processos vem crescendo cada dia mais. Com o auxílio da tecnologia, a otimização de tais processos vem em uma grande crescente. No entanto, devido à grande dinâmica de operação, muitas máquinas e equipamentos acabam gerando um nível de vibrações elevado, o que podem provocar consequências muitas vezes danosas para a estrutura. Assim sendo, foram criadas algumas técnicas para controle de vibrações em estruturas. Dentre elas, destacam-se o Controle Passivo, que é basicamente a dissipação da energia vibratória por meio de elementos de amortecimento adicionados à estrutura, e que, segundo (KOROISHI 2013), um aspecto interessante que justifica a escolha do controle passivo em várias aplicações é que este dispensa a utilização de uma eletrônica muitas vezes complexa para seu funcionamento; e o Controle Ativo, que depende de trocas de energia entre a estrutura e o controlador através de atuadores. Assim sendo, o presente trabalho se dispõe a estudar técnicas de controle ativo para atenuar as vibrações em estruturas flexíveis de um grau de liberdade utilizando atuadores eletromagnéticos com controladores projetados através de Desigualdade Matriciais Lineares (LMIs - do inglês *Linear Matrix Inequalities*).

MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta o aparato experimental utilizado para o controle ativo de vibrações da mesa de 1 grau de liberdade.

Figura 1–Bancada experimental.



Fonte: Autoria própria (2018).

A equação de movimento é dada pela Eq. (1) e os parâmetros deste sistema foram identificados por (COLOMBO, 2017) e são apresentados na Tabela 1.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \tag{1}$$

Tabela 1 – Parâmetros da mesa de 1 grau de liberdade

Parâmetros	Valor
Massa (m)	1,5962 [Kg]
Rigidez (k)	6777,4 [N/m]
Amortecimento (c)	8,0559 [N.s/m]

Fonte: Colombo (2017).

MODELAGEM DO SISTEMA

Para o estudo do comportamento dinâmico de um sistema, é preciso a obtenção do modelo matemático, modelos nos quais são construções simplificadas e abstratas que descrevem o comportamento de sistemas físicos de interesse. O modelo matemático do sistema físico foi realizado através de espaço de estados, que segundo (OGATA, 2003) é apresentada pela Eq. (2).

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

em que a matriz $[A]$ é chamada matriz dinâmica, a matriz $[B_{exc}]$ é a matriz de entrada, a matriz $[B_{cont}]$ é a matriz de controle e a matriz $[C]$ é a matriz de saída, enquanto o vetor $[x]$ corresponde ao vetor de estados.

Projeto do controlador através de LMIs

Uma vez modelado o sistema, deu-se início ao projeto do controlador, que foi realizado através de desigualdades matriciais lineares, LMIs. Segundo (AGUIRRE, 2007), essa desigualdade matricial é dada por

$$A'P + AP < 0, P > 0 \quad (3)$$

sendo $P = P'$.

Substituindo a matriz A na Eq. (3) por $(A - B_{cont}K)$ é possível obter a matriz $[K]$ que corresponde a matriz de ganho do controlador.

O projeto de um controlador robusto dá-se de maneira semelhante ao de um controlador LMI, diferenciando apenas que este possui incertezas politrópicas. Assim, de acordo com Aguirre (2007), as LMIs ficam do tipo:

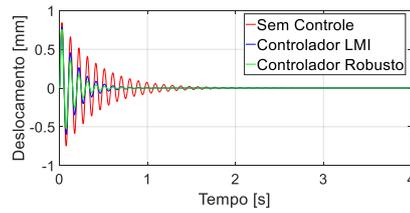
$$\begin{aligned} A_1X - B_{cont}G + XA'_1 - G'B_{cont}' &< 0 \\ A_2X - B_{cont}G + XA'_2 - G'B_{cont}' &< 0 \\ &\vdots \\ A_mX - B_{cont}G + XA'_m - G'B_{cont}' &< 0 \end{aligned} \quad (4)$$

No projeto do controlador robusto foram consideradas incertezas de 5% nos parâmetros de amortecimento e rigidez.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

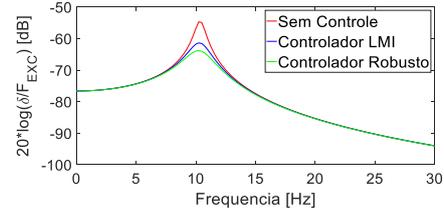
Os resultados numéricos do controlador LMI e do controlador robusto LMI são apresentados pelas Figuras (2) a (4).

Figura 2 – Deslocamento LMI x Robusto



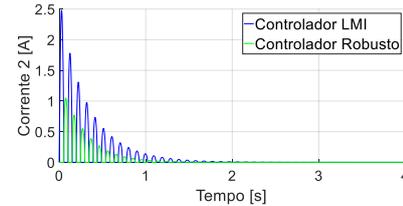
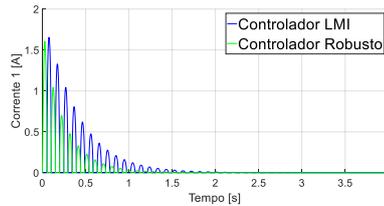
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 3 – FRF LMI x Robusto



Fonte: Autoria própria(2018).

Figura 4–Corrente elétrica dos atuadores eletromagnéticos.



Fonte: Autoria própria(2018).

A Tabela 2 mostra uma análise dos resultados numéricos.

Tabela 2 – Resultados numéricos controlador LMI x controlador Robusto

Controlador	Desloc. Máximo [mm]	Tempo para estabilizar [s]	Corrente máxima [A]	Redução do pico da FRF
LMI	0,7869	0,754	2,479	12,19%
Robusto	0,7559	0,561	1,607	16,78%

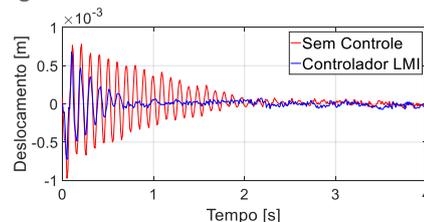
Fonte: Autoria própria (2018).

Observando a Tabela 2, nota-se que o controlador robusto LMI mostrou-se mais eficiente, visto que, para uma mesma força de entrada, este apresentou melhor resultado em todos os requisitos.

CONTROLE EXPERIMENTAL

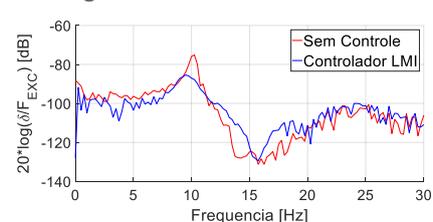
Feito o controle numérico, deu-se início ao procedimento de controle experimental, visando validar a metodologia proposta. Os resultados experimentais são apresentados pelas Figuras (5) a (10).

Figura 5 – Deslocamento controlador LMI



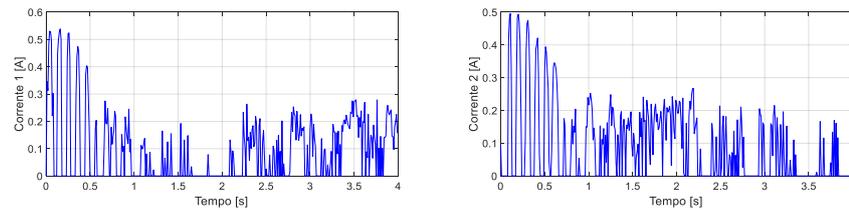
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 6 – FRF controlador LMI



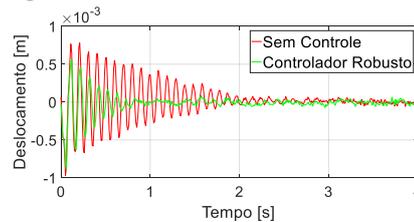
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 7–Corrente elétrica dos atuadores eletromagnéticos (LMI).

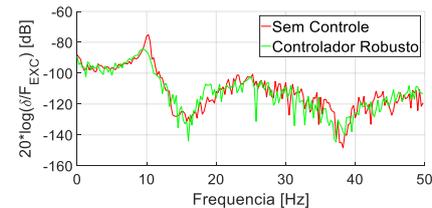


Fonte: Autoria própria(2018).

Figura 8 – Deslocamento controlador Robusto Figura 9 – FRF controlador Robusto

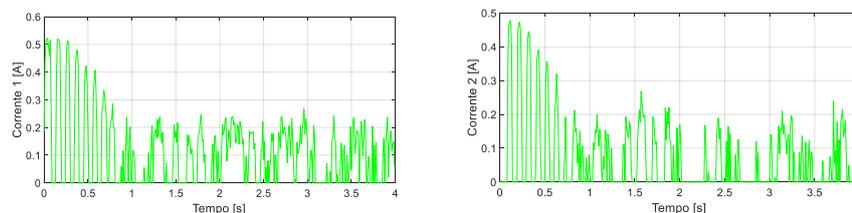


Fonte: Autoria própria (2018).



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 10–Corrente elétrica dos atuadores eletromagnéticos (Robusto).



Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 3 mostra uma análise dos resultados experimentais.

Tabela 3 – Resultados experimentais controlador LMI x controlador Robusto

Controlador	Desloc. Máximo [mm]	Tempo para estabilizar [s]	Corrente máxima [A]	Redução do pico da FRF	Força de excitação [N]
LMI	0,7255	0,76	0,5386	13,63%	0,002789
Robusto	0,888	0,82	0,5222	11,82%	0,003479

Fonte: Autoria própria (2018).

Pelos resultados da Tabela 3, observa-se que ambos os controladores apresentaram características semelhantes no processo experimental. Entretanto, nota-se que o controlador LMI sofreu uma força de excitação menor que o controlador robusto, e mesmo assim necessitou utilizar de uma corrente elétrica mais alta.

Sendo assim, pode-se dizer que o controlador robusto foi mais eficiente no controle experimental, comprovando os resultados numéricos, o que valida a metodologia proposta.



CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo a atenuação de vibrações em uma estrutura flexível capaz de vibrar com 1 grau de liberdade, utilizando atuadores eletromagnéticos comparando os resultados utilizando controlador LMI com o controlador robusto LMI. De modo geral, pode-se concluir que a metodologia proposta e as ferramentas utilizadas, apresentaram resultados satisfatórios, tornando possível sua utilização para melhorar o desempenho de controle ativo de vibrações em estruturas flexíveis.

REFERÊNCIAS

KOROISHI, E. H., Controle de Vibrações em Máquinas Rotativas utilizando Atuadores Eletromagnéticos, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 225f.

COLOMBO, D. A.; TAKETA, E.; REGINALDO, J. P. Identificação de parâmetros através de Técnicas Heurísticas de Otimização. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES - DINCON, 2017.

COLOMBO, D. A. Controle neuro-fuzzy aplicado a atenuação de vibrações utilizando atuadores eletromagnéticos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

OGATA, K., Engenharia de Controle Moderno, Prentice-Hall do Brasil, São Paulo, Brasil, 788p, 2003.

AGUIRRE, L. A. Enciclopédia de automática: controle e automação. 1. ed. [São Paulo]: Blucher, 2007.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio da UTFPR pelo suporte que possibilitou a realização deste trabalho e também ao CNPq, o qual financiou a bolsa de iniciação científica PIBIC. Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Edson Hideki Koroishi, por seus ensinamentos durante a realização deste trabalho.