

CONTROLE DE VIBRAÇÃO DE UMA ESTRUTURA FLEXÍVEL BASEADO NA METODOLOGIA DE ALOCAÇÃO DE PÓLOS UTILIZANDO DESIGUALDADES MATRICIAIS LINEARES (LMIs)

Rodrigo Borges Santos
rborges@dem.feis.unesp.br

Douglas Domingues Bueno
ddbueno@dem.feis.unesp.br

Clayton Rodrigo Marqui
clayton_rm@dem.feis.unesp.br

Vicente Lopes Júnior
vicente@dem.feis.unesp.br
Departamento de Engenharia Mecânica – GMSINT – Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Av. Brasil n.º 56, centro, CEP 15385-000

Resumo: A verificação experimental de estratégias de controle de vibração estrutural é essencial para eventual implementação em escala real. Entretanto, poucos pesquisadores possuem instalações disponíveis e estes analisam experiências de controle de vibração estrutural em escala reduzida. Modelos em escala de bancada são construídos adequadamente para que possam ser usados para estudar importantes aspectos de controle de vibração em escala real, incluindo: interação controlador - estrutura, dinâmica do atuador e sensor, projeto de realimentação de estados, controle de spillover, etc. Neste sentido, o propósito deste artigo é o projeto de um controlador baseado na alocação de pólos utilizando desigualdades matriciais lineares (LMIs) para o controle de vibração em tempo real de um modelo estrutural. O modelo considerado é manufaturado pela Quanser Consulting Inc., e representa um modelo de um edifício flexível controlado por uma massa ativa móvel (Active Mass Driver-AMD). Este modelo consiste de uma armação de aço com uma massa controlável localizada no topo e que pode ser configurado para 1 ou 2 andares. A configuração de dois andares será a utilizada. A presente experiência é uma forma efetiva de se familiarizar com possíveis problemas quando se implementa o projeto de sistemas de controle em situações reais.

Palavras-chave: Alocação de Pólos, Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs) e Active Mass Driver (AMD).

1. INTRODUÇÃO

O estudo de algoritmos para controle ativo de vibrações em estruturas flexíveis tornou-se uma área de enorme interesse, principalmente devido às inúmeras exigências de ótimo desempenho em sistemas mecânicos, como aeronaves e estruturas aeroespaciais (Silva et al., 2003). Nesse sentido, modelos estruturais em escala reduzida são construídos e usados para estudar importantes aspectos de controle de forma para garantir as condições exigidas, através da aplicação de diversos tipos de controladores.

Dentre as inúmeras alternativas de métodos de controle, destaca-se a utilização de desigualdades matriciais lineares (LMIs) que se mostraram nos últimos anos como sendo uma ferramenta poderosa para solucionar problemas de otimização em engenharia, em especial para projeto de sistemas de controle, uma vez que inúmeras restrições e especificações podem ser formuladas por LMIs e posteriormente resolvidas utilizando sofisticadas técnicas de programação convexa. O

propósito deste artigo é o projeto de um controlador baseado na alocação de pólos utilizando LMIs para o controle de vibração em tempo real de um modelo estrutural. Essa técnica é apresentada na secção a seguir. O modelo considerado é manufaturado pela Quanser Consulting Inc., e representa um modelo de um edifício flexível controlado por uma massa ativa móvel (*Active Mass Driver-AMD*) localizada no topo.

2. ALOCAÇÃO DE PÓLOS VIA LMIs

Considere um sistema linear e invariante no tempo (LTI) representado no espaço de estados por:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (1)$$

com $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$.

O problema a ser investigado é encontrar um ganho $\mathbf{K}$ para a lei de realimentação de estados $\mathbf{u} = \mathbf{Kx}$, de maneira a garantir a alocação dos pólos de malha fechada do sistema (1) no interior de um círculo de raio r e centro em $(-\delta, 0)$, ilustrado na Fig. 1. Este problema pode ser resolvido a partir da seguinte equação, para detalhes consulte (Leite et al., 2004):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{AW} + \mathbf{WA}' + \mathbf{BZ} + \mathbf{Z}'\mathbf{B}' + 2d\mathbf{W} & * \\ \mathbf{WA}' + \mathbf{Z}'\mathbf{B}' + d\mathbf{W} & -r\mathbf{W} \end{bmatrix} < 0 \quad (2)$$

sendo $d = \delta - r$. O símbolo $*$ denota o transposto do bloco diagonalmente oposto.

O ganho ótimo $\mathbf{K}$ de realimentação é dado por:

$$\mathbf{K} = \mathbf{ZW}^{-1} \quad (3)$$

sendo $\mathbf{Z}$ e $\mathbf{W}$ obtidos a partir da solução do problema de otimização (2).

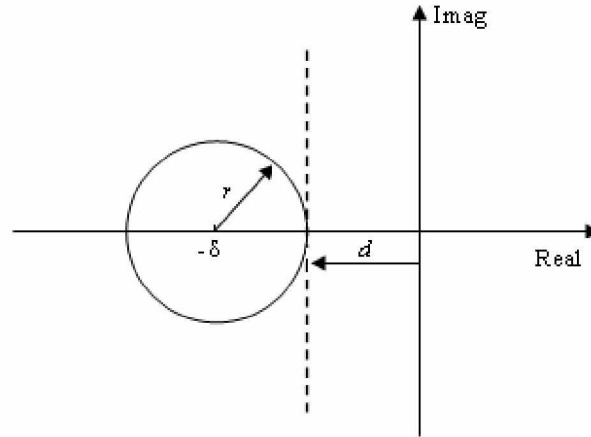


Figura 1: Região para alocação de pólos.

3. APLICAÇÃO EXPERIMENTAL

Para exemplificar o projeto de controlador como descrito na seção anterior, será considerado o controle de vibrações em uma estrutura flexível. A estrutura considerada é manufaturada pela Quanser Consulting Inc., e representa um modelo de um edifício flexível controlado por um *Active Mass Driver (AMD)*. O modelo, mostrado na Fig. 2, consiste de uma armação de aço com uma massa controlável localizada no topo e pode ser configurado para 1 ou 2 andares. A configuração de dois andares é a utilizada nos testes a seguir. A Fig. 3 mostra os equipamentos que foram utilizados nos testes experimentais.

- M_c é massa do carro (atuador),
- M_{f1} é a massa do 1º andar;
- M_{f2} é a massa do 2º andar;
- x_c é deslocamento relativo do carro no segundo andar;
- $\ddot{x}_{f1}$, $\ddot{x}_{f2}$ é a aceleração absoluta do 1º e 2º andares, respectivamente;
- $\ddot{x}_g$ é a aceleração absoluta da base;
- F_c é a força de controle (voltagem) dirigida ao motor do carro.



Figura 2: Modelo AMD

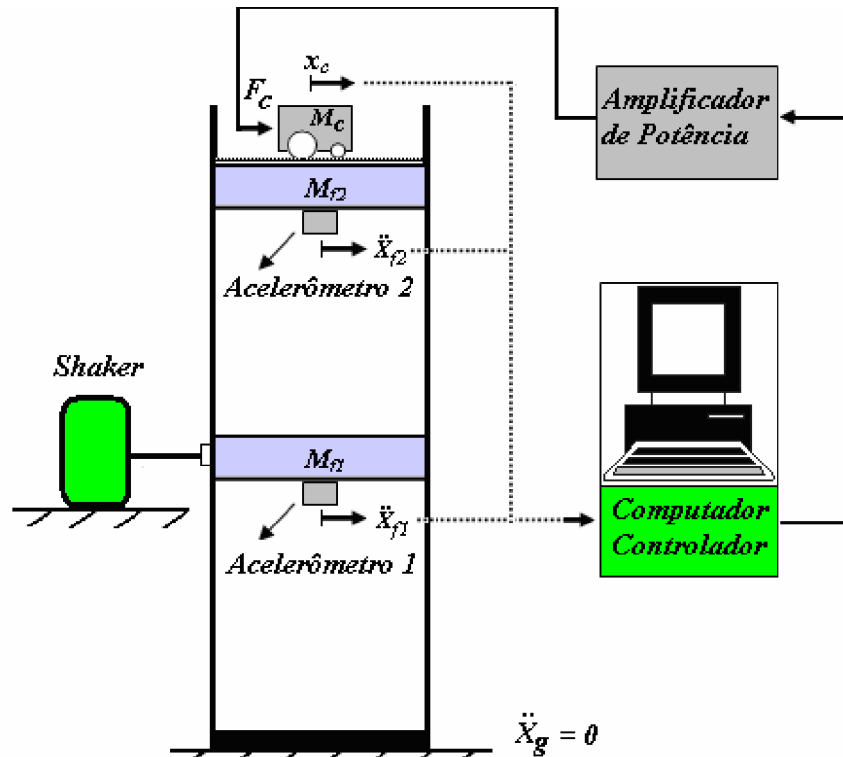


Figura 3: Setup experimental

Para executar em tempo real o controlador projetado foram utilizados os seguintes dispositivos:

- Amplificador de Potência: Quanser UPM 1503
- Placa de Aquisição de Dados: Quanser MultiQ PCI
- Planta de Amortecimento Ativo: Quanser Active Mass Driver (Fig. 2)
- Softwares de Controle em Tempo Real: WinCon-Simulink-RTX configurados.

Neste experimento um *Shaker* é utilizado para gerar uma excitação senoidal (entrada perturbante - w) aplicada no primeiro andar.

3.1 Modelo no Espaço de Estados

Para pequenas deflexões angulares, ambos os andares são modelados como um sistema massa-mola padrão, como representado na Fig. 3. As constantes lineares de rigidez de ambos os andares, K_{f1} e K_{f2} , para pequenas oscilações da estrutura são de 500 N/m. Nesta modelagem, os coeficientes de amortecimento viscoso, B_{f1} e B_{f2} , são desprezados. O método de Lagrange é usado para obter o modelo dinâmico do sistema. Nesta aproximação, as entradas do sistema são consideradas para serem w e F_c .

Para projetar e implementar um controlador com realimentação de estados, a representação do modelo no espaço de estados é a mais indicada. Entretanto, é importante ser lembrado que a representação no espaço de estados representa as equações diferenciais lineares que descrevem a dinâmica do sistema. As seguintes relações representam o modelo no espaço de estados:

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \quad \text{e} \quad y = Cx + Du \quad (4)$$

onde:

- x é o vetor de estados;
- A é a matriz dinâmica;
- B_1 é a matriz de entrada perturbante;
- B_2 é a matriz de entrada de controle;
- w é o vetor de entradas perturbadas;
- u é o vetor de controle;
- y é o vetor de saídas;
- C é a matriz de saídas;
- D é a matriz de transmissão direta.

De acordo com a Eq. (4), com as equações de movimento expressadas em *Active Mass Damper -Student Handout* e usando os valores dos parâmetros disponíveis em *Active Mass Damper -User Manual* as matrizes A , B_1 , B_2 , C e D são as seguintes:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 278.43 & -18.69 & 0 & 0 \\ 0 & -431.03 & 431.03 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 431.03 & -766.49 & 5.98 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 3.00 \\ 0 \\ -0.96 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -431.03 & 431.03 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 431.03 & -766.49 & 5.98 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.96 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2 Resultados Experimentais

O cálculo do controlador é feito resolvendo o problema de otimização dado pela equação (2), com o auxílio do LMI Toolbox do Matlab® 6.5. O controlador foi resolvido fazendo $d=5$ e $r=10$. O tempo de CPU (Pentium 4 XP2000, 2800 MHz) gasto para o projeto do controlador foi de 0.16 segundos.

As FRFs do sistema à malha aberta e à malha fechada são mostradas na Fig. 4.

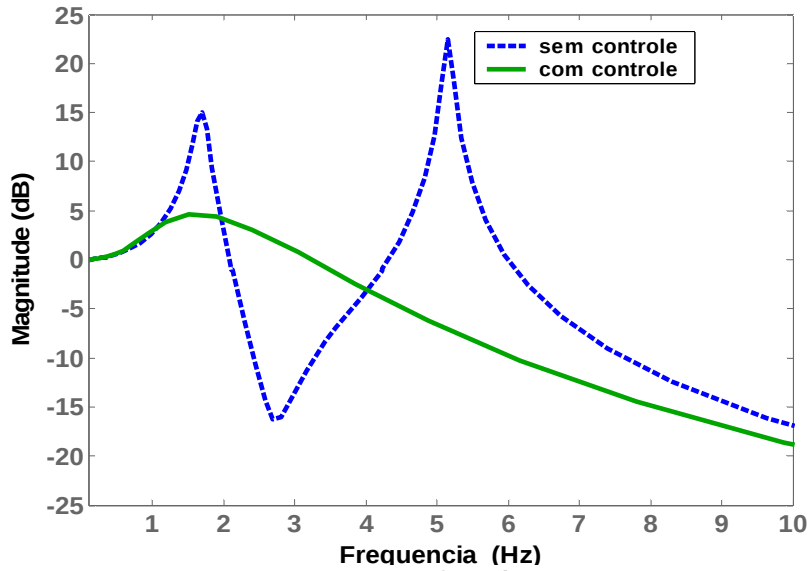


Figura 4. Função de resposta em frequência (FRF) do sistema à malha aberta e à malha fechada.

As Figs. 5 e 6 mostram a aceleração do 1° e 2° andar, respectivamente, devido a uma excitação senoidal aplicada no primeiro andar com amplitude de 1.8 Volts e frequência de 1.6 Hz (aproximadamente a primeira frequência natural de vibração). A Fig. 7 mostra a força de controle aplicada no atuador.

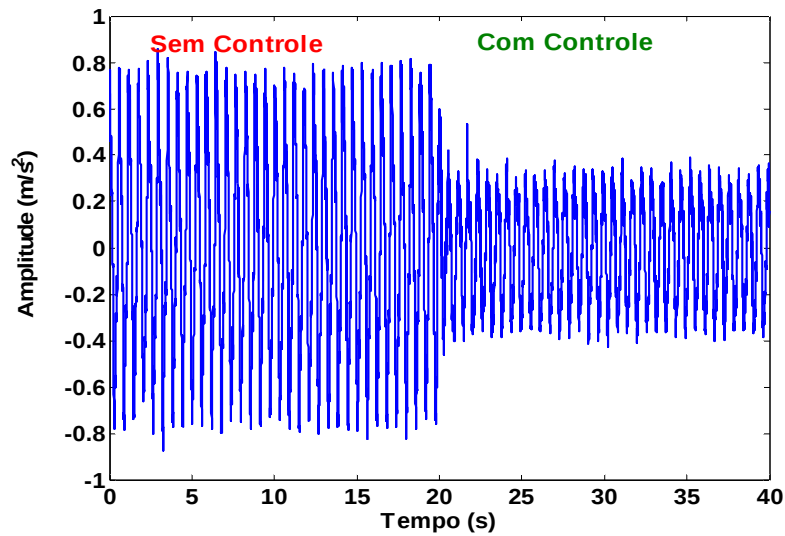


Figura 5: Aceleração do Primeiro Andar – excitação próxima ao primeiro modo de vibrar

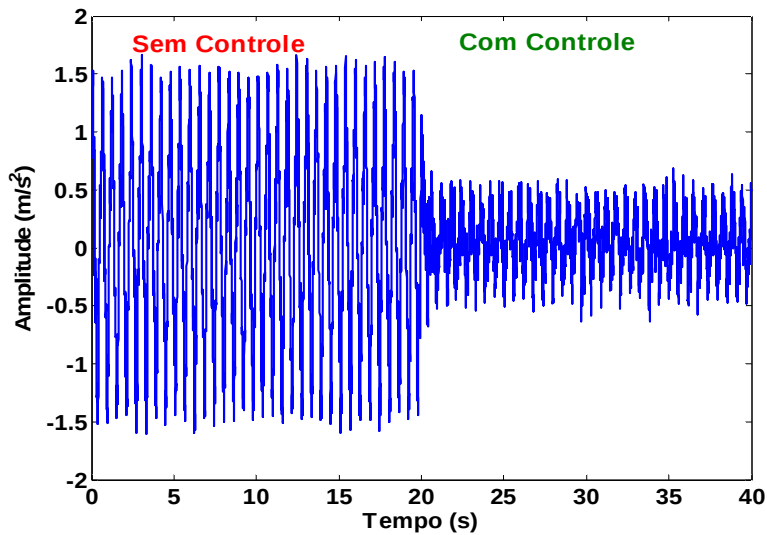


Figura 6: Aceleração do Segundo Andar – excitação próxima ao primeiro modo de vibrar

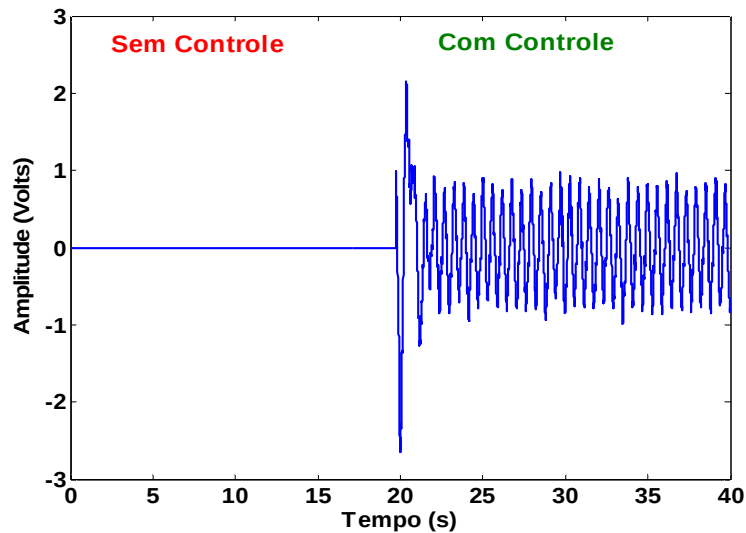


Figura 7: Força de Controle – excitação próxima ao primeiro modo de vibrar

As Figs. 8 e 9 mostram a aceleração do 1° e 2° andar, respectivamente, devido a uma excitação senoidal aplicada no primeiro andar com uma amplitude de 1 V e frequência de 4.8 Hz (aproximadamente a segunda frequência natural de vibração). A figura 10 mostra a força de controle aplicada pelo atuador.

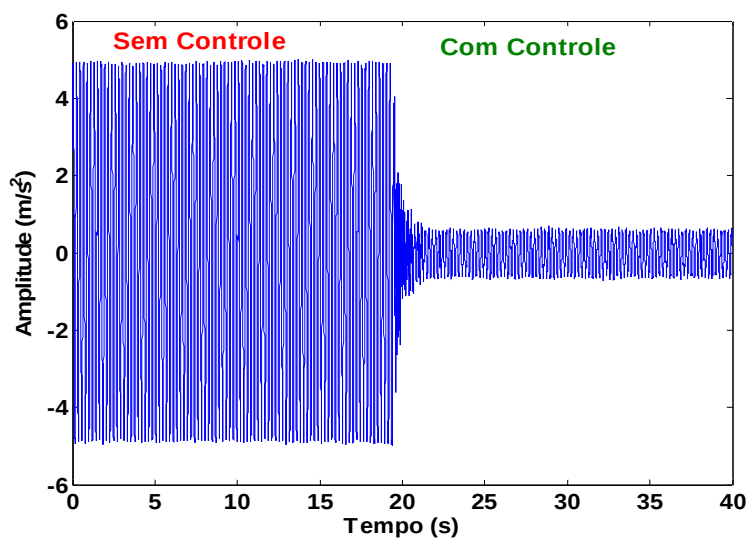


Figura 8: Aceleração do Primeiro Andar – excitação próxima ao segundo modo de vibrar

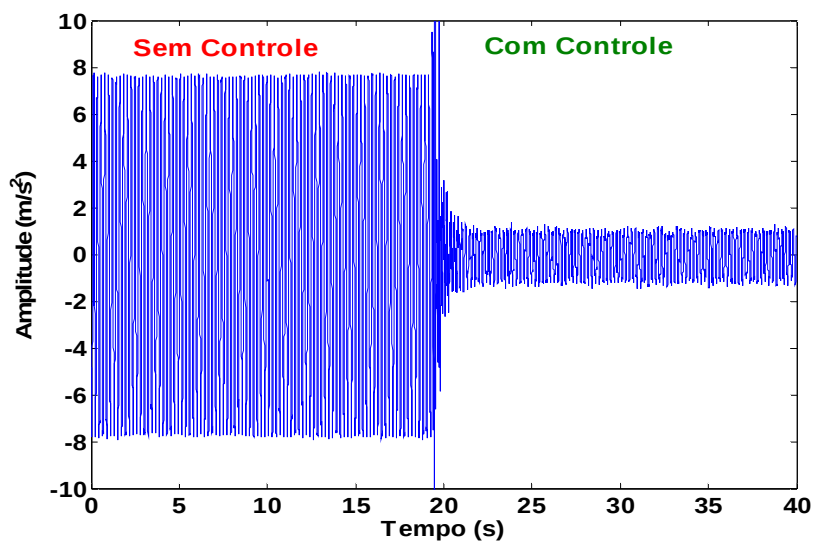


Figura 9: Aceleração do Segundo Andar – excitação próxima ao segundo modo vibrar

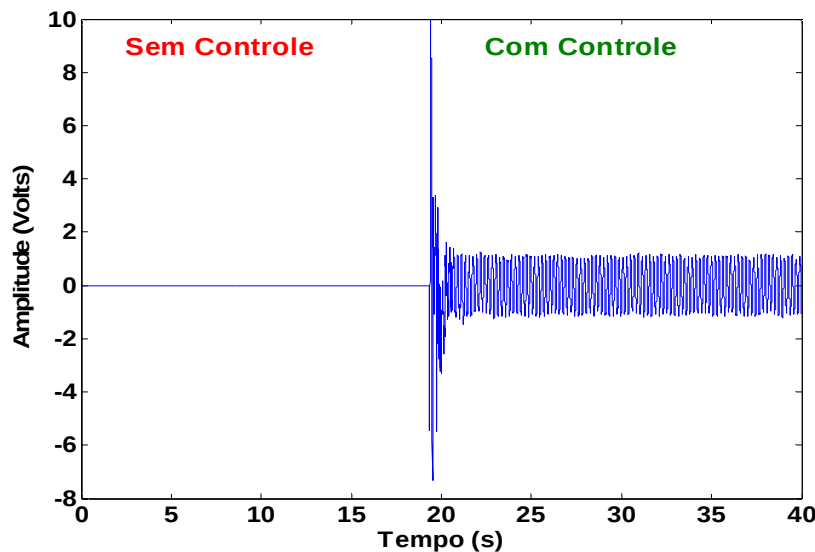


Figura 10: Força de Controle – excitação próxima ao segundo modo de vibrar

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho se buscou validar experimentalmente o projeto de um controlador baseado na alocação de pólos resolvido por desigualdades matriciais lineares. Foi apresentada uma condição para a locação de pólos do sistema onde os parâmetros d e r foram escolhidos para serem 5 e 10, respectivamente. Garantindo, assim, que os pólos em malha fechada estejam dentro de um círculo de raio 5 e centro em -15. Nessas condições o problema de controle foi resolvido e a implementação em tempo real foi realizado. Os resultados acima mostram que o controle de vibração foi atingido, mostrando que o uso de LMIs é uma ferramenta poderosa em problemas de controle. Verifica-se que o controle foi mais eficiente quando a estrutura foi submetida a uma excitação no segundo modo de vibrar, porém, a força de controle foi maior, como mostram as Figs. 7 e 10.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo.

6. REFERÊNCIAS

- Active Mass Damper - Two-Floor (AMD-2) User Manual
 Active Mass Damper - Two-Floor (AMD-2) Linear Experiment #10: Vibration Control -Student Handout.
 Leite, V. Jr. S., Montagner, V. F., Peres, P. L. D., “Alocação Robusta de Pólos Através de Realimentação de Estados Dependente de Parâmetros”. Revista de Controle & Automação, Vol.15 no.2, Abril, Maio e Junho 2004, p.127 – 134.
 Silva, S. e Lopes Jr., V. e Assunção, E. “Controle Robusto de Estruturas Flexíveis usando Técnicas LMIs”. In: 2º Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC, 2003, São José dos Campos, SP, 2.º DINCON 2003, p.2200 – 2219, 2003.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são responsáveis por todo conteúdo deste trabalho.

ACTIVE VIBRATION CONTROL OF A FLEXIBLE STRUCTURE BASED ON POLES PLACEMENT METHODOLOGIES USING LINEAR MATRIX INEQUALITIES (LMIs)

Rodrigo Borges Santos

rborges@dem.feis.unesp.br

Douglas Domingues Bueno

ddbueno@dem.feis.unesp.br

Clayton Rodrigo Marqui

clayton_rm@dem.feis.unesp.br

Vicente Lopes Júnior

vicente@dem.feis.unesp.br

Department of Mechanical Engineering, GMSINT – Group of Intelligent Materials and Systems
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Av. Brazil n.º 56, ZIP CODE 15385-000

Abstract: *Experimental verification of structural vibrations control strategies is essential for eventual full-scale implementations. However, few researchers have facilities readily available to them that are capable of even small-scale structural control experiments. Appropriately constructed bench-scale models can be used to study important aspects of full-scale structural vibrations control implementations, including: control-structure interaction, actuator and sensor dynamics, states feedback design, control spillover, etc. In this sense, the purpose of this article is the project of active vibration controller of a flexible structure based on poles placement methodologies using linear matrix inequalities (LMIs). The considered structure is manufactured by Quanser Consulting Inc., and represents a building controlled by an active mass driver (AMD). The structure consists of a steel frame with a controllable mass located at the top. This structure can be configured to have either 1 or 2 floors. Herein, a 2-floor configuration is employed. The actual experiment considered herein is an effective way to deal with challenges associated with control design.*

Keywords: *Poles Placement, Linear Matrix Inequalities (LMIs) and Active Mass Driver (AMD).*