

Controle ativo de vibrações aplicado em um sistema de quatro graus de liberdade

Active vibration control applied in a four degrees-of-freedom system

RESUMO

Devido a ampla ocorrência de sistemas vibratórios em atividades humanas, o estudo delas vem sendo requerido constantemente, para reduzir gastos numa indústria, evitar falha mecânicas, para diminuir ruídos, etc. Este trabalho visa simular a atenuação de oscilações de um sistema mecânico, utilizando ferramentas de controle. Para tanto, foi criado um modelo de quatro graus de liberdade na própria oficina da faculdade e analisado valores de massa, amortecimento e rigidez. Com tais números, foi possível, modelar um sistema e analisar sua resposta de deslocamento em função do tempo quando se aplicado uma força pulsiva, e a Função Resposta em Frequência (FRF). O controlador foi projetado utilizando regulador linear quadrático (LQR – *linear quadratic regulator*). Com o controlador projetado obteve-se os mesmos gráficos resposta utilizando o mesmo, e também um gráfico representando as forças requeridas pelo controle. O objetivo do trabalho foi concluído visto que a vibração do sistema foi controlada de maneira rápida, e os picos de modos de vibrar foram atenuados.

PALAVRAS-CHAVE: Controle. Vibração. LQR

ABSTRACT

Due to the wide occurrence of vibratory systems in human activities, their study has been required constantly, to reduce expenses in an industry, to avoid mechanical failures, to reduce noise, etc. This work aims to simulate the oscillations' attenuation of a mechanical system using control tools. To this end, a four-degree-freedom model was created in the university's own workshop; and mass, damping and stiffness values were analyzed. With these numbers, it was possible to develop a system and analyze its displacement response as a function of time when applying a pulsating force, and the frequency response function (FRF). The controller was designed using linear quadratic regulator (lqr). With the projected controller, the same response graphs were obtained using the same one, as well as a graph representing the forces required by the control. The purpose of the work was concluded since the system vibration was controlled quickly, and the peaks of vibration modes were attenuated.

KEYWORDS: Control. Vibration. LQR

Bruno Flávio Magurno
brunomagurno@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil.

Edson Hideki Koroishi
edsonh@utfpr.eud.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil.

Andrei Santos Olivera
Andrei.oliveira.wk@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

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



INTRODUÇÃO

Vibrações ou oscilações estão presentes em vários momentos da atividade humana, logo o estudo sobre ela é bem amplo. Em específico, há muitas investigações na área de engenharia, como projeto de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas e sistema de controle (RAO, 2007).

O controle dela é essencial, pois pode-se remover as perdas de energia, possíveis falhas mecânicas em sistemas, até mesmo prevenir quebra de seus componentes. Para isso é desejável um grande conhecimento sobre controle automático, o qual está presente em sistemas de veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura e quaisquer operações industriais que envolvam o controle de temperatura, pressão, umidade, viscosidade, vazão etc (OGATA, 2003).

Dentre as técnicas de controle, o controle ativo de vibração utiliza forças secundárias aplicadas por um controlador, as quais são determinadas baseado num sensor aplicado a estrutura. Esta técnica também é conhecida como controle por realimentação. O mesmo é amplamente utilizado para controlar os modos individuais em regiões de baixa frequência (BUENO, 2007).

O presente trabalho pretende realizar a modelagem física e modal, e o controle de um sistema de 4 graus de liberdade utilizando atuadores eletromagnéticos por meio da aplicação do regulador linear quadrático (LQR – do inglês Linear Quadratic Regulator). O objetivo é reduzir a variação de deslocamento em função do tempo, de modo a considerar incertezas durante o processo.

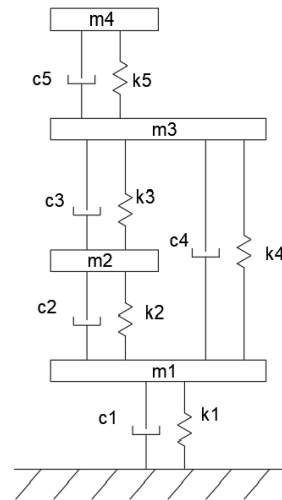
MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo esquemático da estrutura de 4 graus de liberdade é apresentado pela Figura 1, onde m_i representa a massa, c_i a constante de amortecimento e k_i a constante elástica.

Após a montagem da estrutura de 4 graus de liberdade, foi realizada a modelagem matemática do sistema em domínio físico, representada de maneira matricial, baseada na segunda lei de newton:

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

Figura 1 – Modelo físico da bancada



Fonte: Autoria própria.

Os valores de rigidez, coeficiente de amortecimento e massa de cada componente do sistema são apresentadas pela Tabela 1:

Tabela 1: propriedades do sistema

| | Massa (kg) | Rigidez (N/m) | Coeficiente de amortecimento (N.s/m) |
|---|------------|---------------|--------------------------------------|
| 1 | 3,550 | 6948,30 | 16,975 |
| 2 | 2,165 | 8123,96 | 0,012 |
| 3 | 3,240 | 5965,04 | 0,010 |
| 4 | 1,865 | 1017,61 | 0,039 |
| 5 | | 4977,03 | 0,068 |

Fonte: autoria própria

Para a resolução da equação (1), as matrizes foram modeladas em espaço de estados conforme equações (2) e (3), baseado na em Ogata, 2003.

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

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

A equação (4) mostra de forma ampla os parâmetros da equação (2).

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & [I] \\ -[K][M]^{-1} & -[C][M]^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ [M]^{-1} \end{bmatrix} \{F(t)\} \quad (4)$$

A redução do modelo através da realização balanceada é chamada de truncamento balanceado (Assunção, 1992).

Para a aplicação da realização balanceada, é preciso a transformação das equações (2) e (3) para o domínio modal. Para a obtenção do espaço de estados na forma canônica, a matriz dinâmica $[A]$ foi transformada para uma matriz de bloco diagonal modal, na ordem 2×2 , em que cada bloco corresponde a cada modo do sistema. A redução de modelos foi utilizada no presente trabalho a fim de garantir a controlabilidade e observabilidade do sistema.

Para o controle da bancada foi utilizado o controle ótimo LQR (do inglês linear quadratic regulator), o qual apresenta altos índices de desempenho quadrático e é aplicado ao controle ativo de sistemas vibratórios determinísticos (LIANG, et al 2018).

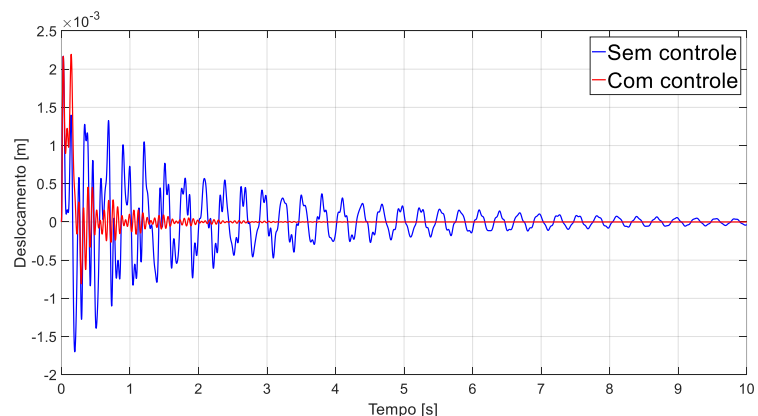
Foram utilizados os softwares MATLAB® e Simulink®. O sistema foi simulado utilizando-se o método de espaço de estado e em seguida o controlador foi aplicado. A força aplicada foi de 50 N, na forma de pulso, com um intervalo de análise de 10 segundos

Foram analisadas as respostas no tempo e na frequência para o sistema sem controle, com controle LQR e a resposta da tensão em função do tempo para ambos os controladores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações obtidos pelos softwares, estão expressos nas figuras a seguir. A figura 2 representa o deslocamento da massa 1 em função do tempo no intervalo de 10 segundos, tanto para o sistema com e sem controle. Pode-se observar que embora, o controle LQR aumente o deslocamento nas primeiras oscilações, o mesmo pode reduzir o deslocamento da massa após 2 segundos, e em 3 segundos o deslocamento era aproximadamente nulo.

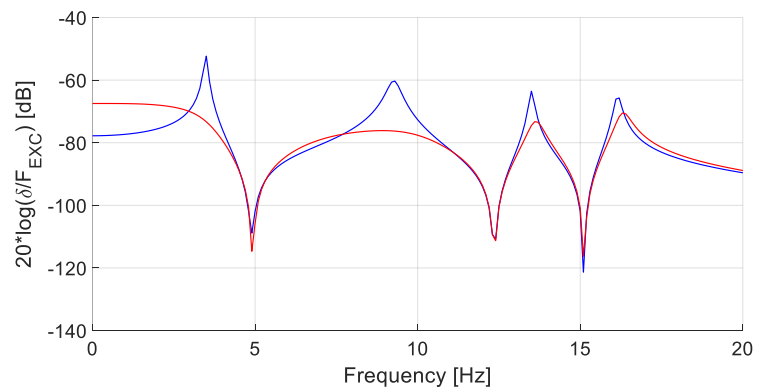
Figura 2 – Deslocamento em função do tempo



Fonte: Autoria própria

A figura 3 representa a Função Resposta em Frequência (FRF). Pode-se observar que ambos gráficos apresentam 4 picos, os quais representam cada um dos modos de vibrar da estrutura. Para o sistema sem o controle LQR, os picos ocorrem em 3,5Hz; 9,3Hz; 13,5Hz e 16,2Hz, apresentando os valores respectivamente -52,34dB; -60,3dB; -63,53dB e -65,72dB. Já para o sistema com controle LQR, ocorrem em 1,0Hz; 8,9Hz; 13,6Hz e 16,3Hz, apresentando valores de -67,5dB; -76,13dB; -73,28dB e -70,49dB.

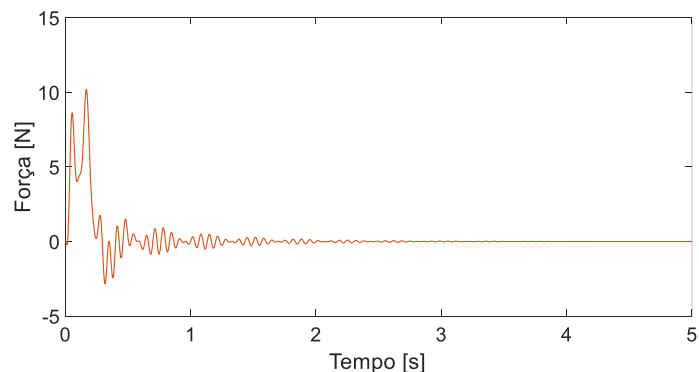
Figura 3 – Função Resposta em Frequência.



Fonte: Autoria própria.

A força de controle está representada na Figura 4. Observa-se que nos primeiros instantes de tempo, há um esforço de controle mais elevado em 0,168 segundos atingindo 10,19 N, reduzindo após a redução da resposta do sistema.

Figura 4 – Força de controle



Fonte: Autoria própria

CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o objetivo do trabalho foi satisfatório, visto que apesar de no começo apresentar grandes oscilações, a resposta do sistema de 4 graus de liberdade medida na massa m_1 foi estabilizada entre 2 e 3 segundos. Sem o controle LQR, o sistema apresenta estabilização após os 10 segundos. Além da rápida estabilidade, o controlador de maneira muito eficaz reduziu os dois primeiros picos de modo de vibrar, atenuando respectivamente 15,16 e 15,83 dB. Porém os dois últimos mesmo sendo também reduzidos, não apresentaram o mesmo nível de atenuação, caindo para 9,75 e 4,77 dB.

REFERÊNCIAS

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 2007.

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

BUENO, D. D. **Controle Ativo de Vibrações e Localização Ótima de Sensores e Atuadores Piezelétricos**. 2007. Tese de Mestrado, Universidade Estadual Mesquita Filho, Ilha Solteira – SP

ASSUNÇÃO, E.; HEMERLY, E. M., **Redução de Modelos de Sistemas Dinâmicos**, Proceedings of the 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vol. 1, Vitória, Brasil, 1992.

L. LIANG; J. YUAN; S. ZHANG; P. ZHAO. **Design a software real-time operation platform for wave piercing catamarans motion control using linear quadratic regulator based genetic algorithm**. Public Library of Science, v. 13(4), 2018

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a UTFPR e a CNPq (processo 402581/2016-4) por apoiar este trabalho.