

## Controle Ativo de Vibrações Aplicado a um Rotor Flexível Utilizando Regulador Linear Quadrático

## Active Vibration Control Applied to a Flexible Rotor Using Linear Quadratic Regulator

### RESUMO

**Breno Pagliuse**

[pagliuse@alunos.utfpr.edu.br](mailto:pagliuse@alunos.utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

**Edson Hideki Koroishi**

[edsonh@utfpr.edu.br](mailto:edsonh@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

**Matheus Rincon Modesto Maroni**

[matheusmaroni@gmail.com](mailto:matheusmaroni@gmail.com)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Este trabalho teve como objetivo a identificação, modelagem matemática e aplicação de controle em um rotor flexível. Após definir as localizações dos elementos do sistema (Discos e Mancais), foi realizada a identificação dos parâmetros através do Algoritmo Genético em conjunto com a modelagem do sistema utilizando o Método dos Elementos Finitos, através do software *MatLab/Simulink*. Com o sistema modelado, foi aplicado controle no domínio modal e foi analisado o comportamento do rotor a diversas entradas. Primeiramente foi aplicada uma entrada impulsiva com o rotor em repouso, posteriormente foram analisadas as respostas em um teste de partida e ao rotor em regime permanente sujeito a um desbalanceamento. O Algoritmo Genético apresentou um bom resultado, visto que o objetivo era minimizar a diferença entre as quatro primeiras frequências naturais do sistema, atendendo ao esperado. O controlador LQR apresentou um ótimo desempenho, uma vez que reduziu significativamente o nível de vibrações em todas as análises realizadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Método dos elementos finitos, Algoritmos genéticos, Vibração.

**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.



### ABSTRACT

This work aimed at the identification, mathematical modeling and control application in a flexible rotor. After defining the locations of the system elements (Disks and Bearings), the parameters were identified through the Genetic Algorithm together with the system modeling using the Finite Element Method, using the *MatLab/Simulink* software. With the modeled system, control was applied in the modal domain and the rotor behavior was analyzed to several inputs. First an impulsive input was applied with the rotor at rest, later the responses were analyzed in a starting test and the rotor in steady state subjected to an unbalance. The Genetic Algorithm presented a good result, since the objective was to minimize the difference between the first four natural frequencies of the system, as expected. The LQR controller performed optimally as it significantly reduced the level of vibration in all analyzes performed.

**KEYWORDS:** Finite Element Method, Genetic Algorithm, Vibration.

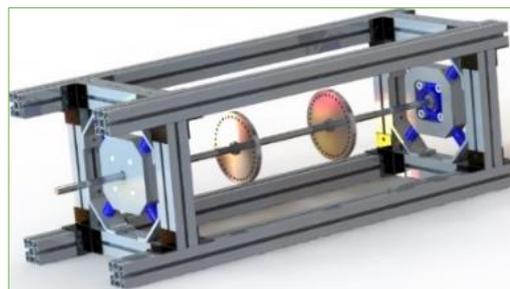
## INTRODUÇÃO

Atualmente, equipamentos e máquinas cada vez mais eficientes vem sendo desenvolvidos. Em termos de máquinas rotativas, a eficiência está diretamente relacionada com a sua velocidade de operação (KOROISHI, 2013, p. 1). Rotores flexíveis apresentam altos níveis de vibração quando trabalham próximo a velocidades críticas. Neste contexto, surge grande necessidade de monitoramento e controle dos níveis de vibrações com o objetivo de mantê-los dentro de determinados limites pré-determinados (BORGES, 2016, p. 1). Com isso, técnicas de controle de vibração vêm sendo desenvolvidas, no intuito de garantir a segurança e o bom funcionamento das máquinas rotativas. Neste presente trabalho são empregadas técnicas de modelagem, tal como o Método dos Elementos Finitos, Método Pseudo-Modal, para criar modelos capazes de fornecerem resultados condizentes com a realidade, técnicas de otimização, como o Algoritmo Genético, para realizar a identificação dos parâmetros do sistema e Controle Ativo de Vibrações a fim de controlar o nível de vibração de um rotor flexível (através de atuadores eletromagnéticos) desenvolvido na UTFPR Câmpus Cornélio Procópio, utilizando controladores projetados através do Regulador Linear Quadrático (LQR - do inglês Linear Quadratic Regulator).

## MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema em estudo é representado pela Figura 1. consiste de um eixo de 1,007m de comprimento, perfis de alumínio 50x50mm, dois discos de alumínio, com 150mm de diâmetro e 11mm de espessura, oito molas de compressão para carregamento médio, dois mancais de rolamento e duas capas para os mancais.

Figura 1 – Bancada de Estudo



Fonte: Autoria Própria (2019).

Para a redução do modelo, utilizou-se o método pseudo-modal, o qual transforma as coordenadas físicas em coordenadas modais. A equação completa do rotor na forma reduzida, é representada pela Equação (1).

$$[\tilde{m}]\{\ddot{q}(t)\} + [\tilde{c}]\{\dot{q}(t)\} + [\tilde{K}]\{q(t)\} = \{\tilde{F}(t)\} \quad (1)$$

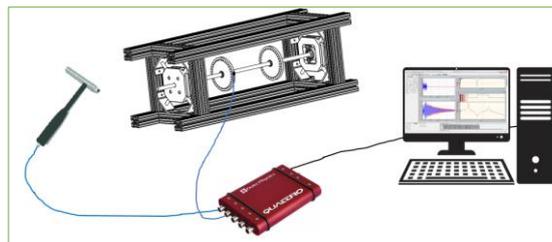
$$\text{Onde, } [\tilde{c}] = [c_d] + \phi[c_g]0; \quad [\tilde{K}] = [k] + \phi[k_{st}] \quad \text{e} \quad \{\tilde{F}(t)\} = \{\tilde{f}_w(t)\} + \{\tilde{f}_{AEM}(t)\}.$$

Para a modelagem foi utilizado o Método dos Elementos Finitos, e o sistema foi discretizado em 47 elementos de viga (48 nós), de Timoshenko (com 4 graus de liberdade cada, sendo dois de translação e dois de rotação). Os mancais M1 e M2 estão localizados nos nós 7 e 42, respectivamente, enquanto os discos D1 e D2 estão localizados nos nós 18 e 30.

Foi utilizado o Algoritmo Genético para a identificação dos parâmetros do sistema. É um método baseado na teoria de Darwin, portanto, os parâmetros são buscados de forma aleatória e evolutiva. O GA é dividido nas seguintes etapas: inicialização, avaliação, seleção, cruzamento, mutação, atualização e critério de parada (DE SOUZA, 2018, p. 26). Este método leva em consideração alguns fatores importantes como a natureza da função objetiva, as restrições e o número de variáveis. A função objetivo utilizada minimiza a diferença entre as 4 primeiras frequências naturais numéricas e experimentais, como mostra a Equação (2). A Figura 2 mostra o esquema utilizado nos testes experimentais.

$$F. O. = \sum_{i=0}^4 \left| \frac{w_{ne}(i) - w_{nn}(i)}{w_{ne}(i)} \right| \quad (2)$$

Figura 2 – Esquema de testes experimentais.



Fonte: Adaptado de MARTINS et. al. (2018).

O Regulador Linear Quadrático (LQR) foi utilizado para projetar o controlador. O LQR consiste em adotar um índice de desempenho  $J$ , representado pela Equação (3), a partir do qual é possível otimizar grandezas físicas (KOROISHI, 2013, p. 31). Este método fornece um modo sistemático de cálculo da matriz de ganho de controle por realimentação de estado (OGATA, 2010, p. 718). O vetor de controle é dado pela Equação (4), onde  $[G]$  é a matriz de ganho do controlador.

$$J = \int_0^{\infty} \left\{ \{x(t)\}^T [Q_{lqr}] \{x(t)\} + \{u(t)\}^T [R_{lqr}] \{u(t)\} \right\} dt \quad (3)$$

$$u(t) = -[G] \{x(t)\} \quad (4)$$

A força de controle é aplicada através de atuadores eletromagnéticos inseridos em um dos mancais, tornando-o um mancal híbrido. Neste trabalho, são dispostos quatro atuadores, que exercem somente força de atração (dois em cada direção,  $x$  e  $z$ ) e os mesmos estão localizados no Elemento 7, onde se encontra um dos mancais.

Com o modelo identificado e o controlador projetado, foram realizadas algumas simulações a fim avaliar o comportamento dinâmico do rotor e analisar as suas respostas (com e sem controle) à algumas entradas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros do sistema, identificados através do Algoritmo Genético são apresentados no Quadro 1.

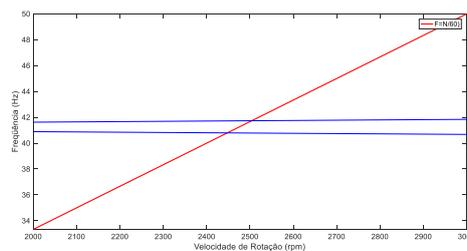
Quadro 1 – Parâmetros do Sistema

Propriedade	Valor	Propriedade	Valor
$k_{x1}$ (N/m)	$3,74 \times 10^5$	$C_{x1}$ (Ns/m)	0,6448
$k_{z1}$ (N/m)	$4,54 \times 10^5$	$C_{z1}$ (Ns/m)	0,3663
$k_{x2}$ (N/m)	$7,10 \times 10^7$	$C_{x2}$ (Ns/m)	1,5403
$k_{z2}$ (N/m)	$8,66 \times 10^9$	$C_{z2}$ (Ns/m)	0,3193
$\alpha$	0,0518	$\beta$	$9,6 \times 10^{-9}$

Fonte: Autoria própria.

As duas primeiras velocidades críticas do rotor foram obtidas através do Diagrama de Campbell mostrado na Figura 3, e são 2450 e 2510 rpm.

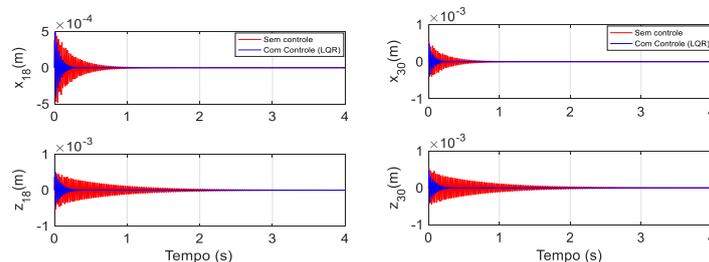
Figura 3 – Esquema de testes experimentais.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Com o rotor em repouso foi aplicada uma entrada impulsiva no Nó 12 com amplitude de 100N. A resposta nos Elemento 18 e 30, e as Funções Resposta em Freqüência (FRFs) obtidas são apresentadas nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

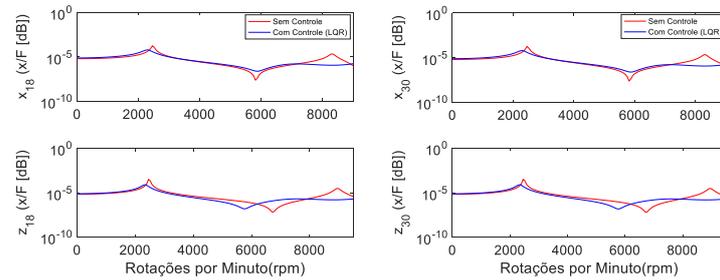
Figura 4 – Resposta ao Impulso Elementos 18 e 30.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Para o sistema com controle (LQR), a resposta ao impacto foi atenuada em aproximadamente 0,27s para o Eixo x e 0,29s para o Eixo z, enquanto que para o sistema sem controlador, a resposta foi atenuada em aproximadamente 0,95s para o eixo x e 2,7s para o eixo z. Resultando em reduções de aproximadamente 72% e 89%, para os eixos x e z, respectivamente.

Figura 5 – FRFs Elementos 18 e 30.

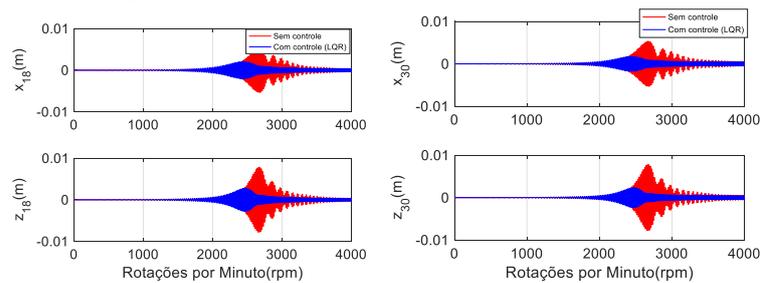


Fonte: Autoria Própria (2019).

Observando os gráficos apresentados, nota-se a redução nos picos de frequências naturais, sendo mais significativo no segundo pico.

Foi realizado um teste de partida (*run-up*), a fim de analisar a amplitude da vibração do sistema, quando o mesmo sai do repouso até uma rotação desejada. Analisou-se a resposta do sistema variando sua rotação de 0 a 4000rpm. As respostas nos Elementos 18 e 30, nos eixos x e z, são mostradas na Figura 6.

Figura 6 – *Run-up* Elementos 18 e 30.

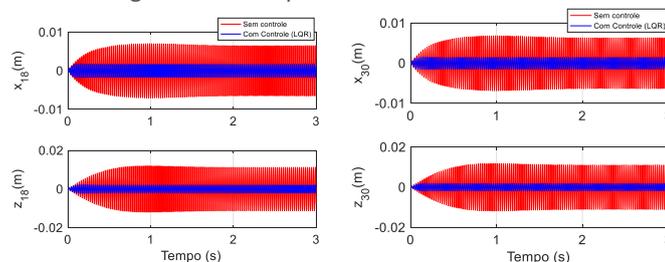


Fonte: Autoria Própria (2019).

Após analisar os gráficos nota-se que as reduções nas amplitudes foram de aproximadamente 65%, para ambos os eixos.

Foi analisada a resposta do rotor a um desbalanceamento de 50gcm. A rotação escolhida foi de 2480rpm em regime permanente, visto que é uma rotação próxima de suas velocidades críticas. As respostas nos Elementos 18 e 30, nos eixos x e z, são mostradas na Figura 7.

Figura 7 – *Run-up* Elementos 18 e 30.



Fonte: Autoria Própria (2019).

A partir da análise dos gráficos, nota-se que a redução nas amplitudes foi de aproximadamente 80% para ambos os eixos.

## CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a realização da identificação, modelagem matemática e aplicação de controle (LQR) em um rotor flexível.

De modo geral, pode-se concluir que a metodologia proposta e as ferramentas utilizadas apresentaram resultados satisfatórios, tornando possível e mais indicada a utilização do sistema com controlador, a fim de melhorar e não comprometer o desempenho de máquinas rotativas.

## REFERÊNCIAS

KOROISHI, E. H. **Controle de Vibrações em Máquinas Rotativas utilizando atuadores Eletromagnéticos**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14731/1/ControleVibracoesMaquinasparte1.pdf> Acesso em: 13 jul. 2019.

BORGES, A. S. **Controle Modal de Rotores com Mancais Magnéticos – Projeto Robusto**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14783/1/ControleModalRotores.pdf> Acesso em: 14 jul. 2019.

DE SOUZA, F. B. **Modelagem Estocástica e Validação Experimental de um Rotor Flexível**. 2018. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, 2018.

MARTINS, L. A.; TAKETA, E.; LARA-MOLINA, F.A.; KOROISHI, E. H. Caracterização de um absorvedor dinâmico de vibrações através de técnicas heurísticas de otimização. **Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, ABCM, 2018.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice-Hall, c2010. x, 809 p. ISBN 9788576058106.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UTFPR, pelo apoio e material que possibilitaram essa realização do trabalho. Este trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do CNPq - Brasil (Processo 163884/2018-8).