

Engenharias, Ciência e Tecnologia 4

Luís Fernando Paulista Cotian
(Organizador)



Atena
Editora
Ano 2019

Luís Fernando Paulista Cotian

(Organizador)

Engenharias, Ciência e Tecnologia

4

Atena Editora

2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias, ciência e tecnologia 4 [recurso eletrônico] / Organizador
Luís Fernando Paulista Cotian. – Ponta Grossa (PR): Atena
Editora, 2019. – (Engenharias, Ciência e Tecnologia; v. 4)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7247-087-2

DOI 10.22533/at.ed.872193101

1. Ciência. 2. Engenharia. 3. Inovações tecnológicas.
4. Tecnologia. I. Cotian, Luís Fernando Paulista. II. Série.

CDD 658.5

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, Ciência e Tecnologia” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume IV apresenta, em seus 29 capítulos, conhecimentos relacionados a Modelagem, Análise e Simulação relacionadas à engenharia de produção nas áreas de Programação Matemática, Decisão Multicriterial e Teoria da Decisão e Teoria dos Jogos.

A área temática de Modelagem, Análise e Simulação trata de temas relevantes para a mecanismos que auxiliam na tomada de decisão, desde a modelagem e simulação até a análise dos resultados envolvendo assuntos relacionados a engenharia. As análises e aplicações de novos estudos proporciona que estudantes utilizem conhecimentos tanto teóricos quanto tácitos na área acadêmica ou no desempenho da função em alguma empresa.

Para atender os requisitos do mercado as organizações precisam levar em consideração a área de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, sejam eles do mercado ou do próprio ambiente interno, tornando-a mais competitiva e seguindo a legislação vigente.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos de Modelagem, Análise e Simulação e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Luís Fernando Paulista Cotian

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
A UTILIZAÇÃO DE UM SOFTWARE PARA O DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA	
<i>Douglas Freitas Augusto dos Santos</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931011	
CAPÍTULO 2	11
ALGORITMOS EVOLUTIVOS APLICADOS A OTIMIZAÇÃO OFF-LINE DE UM MAPA COGNITIVO FUZZY DE UM MISTURADOR INDUSTRIAL	
<i>Márcio Mendonça</i>	
<i>Edson Hideki Koroishi</i>	
<i>Lillyane Rodrigues Cintra</i>	
<i>Lucas Botoni de Souza</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931012	
CAPÍTULO 3	19
APLICAÇÕES MATEMÁTICAS EM MEDIDAS AGRÁRIAS: UM CONHECIMENTO ETNOMATEMÁTICO DO HOMEM DO CAMPO CONTEXTUALIZADO COM O CONTEÚDO ESCOLAR	
<i>Deonísio Hul</i>	
<i>Silton José Dziadzio</i>	
<i>Clodogil Fabiano Ribeiro dos Santos</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931013	
CAPÍTULO 4	34
AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA CONEXÃO DE UMA UNIDADE GERADORA DISTRIBUÍDA A UM ALIMENTADOR DE 13,8 KV UTILIZANDO O ATP	
<i>Jaqueline Oliveira Rezende</i>	
<i>Larissa Marques Peres</i>	
<i>Geraldo Caixeta Guimarães</i>	
<i>Marcelo Lynce Ribeiro Chaves</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931014	
CAPÍTULO 5	46
CÁLCULO FRACIONÁRIO APLICADO À GENERALIZAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE BAGAÇO DE UVA	
<i>Amanda Peruzzo da Motta</i>	
<i>Bruna de Souza Nascimento</i>	
<i>Fernanda Batista de Souza</i>	
<i>Douglas Junior Nicolin</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931015	
CAPÍTULO 6	57
CINÉTICA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO BAGAÇO DE CANA	
<i>Edvan Vinícius Gonçalves</i>	
<i>Wardleison Martins Moreira</i>	
<i>Emanuel Souza Barros</i>	
<i>Sérgio Inácio Gomes</i>	
<i>Marcos de Souza</i>	
<i>Luiz Mario de Matos Jorge</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8721931016	

CAPÍTULO 7 67

CONTAGEM AUTOMÁTICA DE OVOS DO Aedes Aegypti em palhetas de ovitrampas: um sistema para aquisição e processamento de imagens

Carlos Diego Franco da Rocha
Ayla Márcia Cordeiro Bizerra
Demétrios Araújo Magalhães Coutinho
Luiz Fernando Virginio da Silva
Michel Santana de Deus
Phablo Márcio de Paiva Souto

DOI 10.22533/at.ed.8721931017

CAPÍTULO 8 75

Controlador fuzzy Mamdani aplicado à navegação autônoma em ambiente desconhecido variante no tempo

Eduardo Vilela Pierangeli
Jordann Alessandro Rosa Almeida
Marcelo Vilela Pierangeli

DOI 10.22533/at.ed.8721931018

CAPÍTULO 9 82

Controle robusto aplicado em uma viga de material compósito visando atenuação de vibrações

Camila Albertin Xavier da Silva
Daniel Almeida Colombo
Edson Hideki Koroishi
Albert Willian Faria

DOI 10.22533/at.ed.8721931019

CAPÍTULO 10 96

Estratégias heurísticas para posicionamento de unidades de medição fasorial

Marcio André Ribeiro Guimaraens
Julio Cesar Stacchini de Souza
Milton Brown Do Coutto Filho
Breno Crespo Zeba

DOI 10.22533/at.ed.87219310110

CAPÍTULO 11 109

Estudo de caracterização e desenvolvimento da urbanização do município de Sousa-PB no período de 1984 a 2016

Márcia de Lacerda Santos
Thayse Bezerra da Silva
Maria Raiana Almeida Silva
Danielle Leal Barros Gomes

DOI 10.22533/at.ed.87219310111

CAPÍTULO 12 116

Flambagem linear e não-linear utilizando uma análise numérica pelo método dos elementos finitos

Rodrigo Villaca Santos
Leticia Barizon Col Debella

DOI 10.22533/at.ed.87219310112

CAPÍTULO 13..... 121

GEOLOGIA DA SERRA DO CARAÇA: PERFIS REAIS

Carolina Cristiano Barbosa
Ariadne Duarte Libutti Nuñez
Adriane Abreu Cadar
Alexandre Motta Tunes
Bárbara Alves Oliveira
Ulisses Cyrino Penha

DOI 10.22533/at.ed.87219310113

CAPÍTULO 14..... 132

GERENCIAMENTO DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO: PREVISÃO DE COMPORTAMENTO ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Josué Domingos da Silva Neto
Débora Cristina Almeida de Assis
Nayra Vicente Sousa da Silva
Zenilda Vieira Batista

DOI 10.22533/at.ed.87219310114

CAPÍTULO 15..... 143

INFLUÊNCIA DA INÉRCIA A TORÇÃO NO MOMENTO FLETOR DE PLACAS MACIÇAS DE CONCRETO

Leticia Barizon Col Debella
Rodrigo Villaca Santos

DOI 10.22533/at.ed.87219310115

CAPÍTULO 16..... 149

METODOLOGIA DE CONTROLE PREVENTIVO BASEADA EM ÁRVORE DE DECISÃO PARA A MELHORIA DA SEGURANÇA ESTÁTICA E DINÂMICA DO SISTEMA INTERLIGADO DA ELETRONORTE

Ubiratan Holanda Bezerra
João Paulo Abreu Vieira
Werboston Douglas de Oliveira
Daniel Augusto Martins
Dione José Abreu Vieira
Bernard Carvalho Bernardes
Benedito das Graças Duarte Rodrigues
Vilson Castro

DOI 10.22533/at.ed.87219310116

CAPÍTULO 17 166

O WATSON DA IBM

Eduardo Bruno de Almeida Donato
Amanda Moura Camilo

DOI 10.22533/at.ed.87219310117

CAPÍTULO 18..... 173

PROTÓTIPO DE UM PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE A PARTIR DA LEI DE DARCY

Guilherme Medina Cameu
Victor Araujo Figueredo Fischer
Wataru Iwamoto
Rômulo Henrique Batista de Farias

DOI 10.22533/at.ed.87219310118

CAPÍTULO 19 178

SIMULADOS ELETRÔNICOS DO PROCESSO SELETIVO DO IFPR: INSTRUMENTO DE DIVULGAÇÃO E DEMOCRATIZAÇÃO DO ENSINO

João Henrique Berssanette
Antonio Carlos de Francisco
Fabiane Ferreira
Maria Fernanda Müller Pereira da Silva

DOI 10.22533/at.ed.87219310119

CAPÍTULO 20 188

SOLARIZAÇÃO DO SOLO E BIOFUMIGAÇÃO NA VIABILIDADE DE SCLEROTIUM ROLFSSII

João Luiz Lopes Monteiro Neto
Roberto Tadashi Sakazaki
Raphael Henrique da Silva Siqueira
Carlos Abanto-Rodríguez
Sonicley da Silva Maia
Rannyonara Oliveira Rodrigues
Lucas Aristeu Anghinoni dos Santos
Beatriz Sayuri Campaner Sakazaki

DOI 10.22533/at.ed.87219310120

CAPÍTULO 21 194

SYNOPTERO: RECONSTRUINDO O MUNDO TRIDIMENSIONAL A PARTIR DO BIDIMENSIONAL

Lucas Maquedano da Silva
Marcos Cesar Danhoni Neves
Fernanda Tiemi Karia
Gabriel Francischini de Oliveira
Leandro Moraes Azevedo

DOI 10.22533/at.ed.87219310121

CAPÍTULO 22 202

TENDÊNCIAS CLIMATOLÓGICAS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS, BRASIL

Lucas Rosa de Almeida
Marcelo Vieira-Filho
Sílvia Yanagi
Marcelo Ribeiro Viola

DOI 10.22533/at.ed.87219310122

CAPÍTULO 23 217

TEORIA NA PRÁTICA: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS PRINCIPAIS PARTIDAS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Murilo Miceno Frigo
Paulo Irineu Koltermann

DOI 10.22533/at.ed.87219310123

CAPÍTULO 24 229

UM ALGORITMO ITERATED LOCAL SEARCH PARA O STABLE MATCHING PROBLEM APLICADO AO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE ALUNOS NAS ESCOLAS DA REDE PÚBLICA DE ENSINO

Robson Vieira de Oliveira
Matheus Correia Teixeira
Marco Antonio Bonelli Junior

DOI 10.22533/at.ed.87219310124

CAPÍTULO 25 242

USO DE IMAGENS SENTINEL - 2A E O ALGORITMO SVM PARA MONITORAR AS APP DE NASCENTES E CURSOS D'AGUA DO RIBEIRÃO MARANHÃO, LAVRAS, MG

Ester Afonso
Katyanne Conceição
Beatriz Campos
Franklin Inácio
Margarete Volpato
Helena Alves

DOI 10.22533/at.ed.87219310125

CAPÍTULO 26 249

UTILIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO DIFERENCIAL EM PROBLEMAS INVERSOS PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE UMA VIGA EULER-BERNOULLI

Rennan Otavio Kanashiro
Edson Hideki Koroishi
Fabian Andres Lara-Molina

DOI 10.22533/at.ed.87219310126

CAPÍTULO 27 258

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS (PIV) PARA O ESTUDO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE PAINÉIS DE MADEIRA COMPENSADA

Eduardo Hélio de Novais Miranda
Rodrigo Allan Pereira
Francisco Carlos Gomes
Roberto Alves Braga Junior
Fernando Pujaico Rivera
Lucas Henrique Pedrozo Abreu

DOI 10.22533/at.ed.87219310127

CAPÍTULO 28 264

UTILIZAÇÃO DO SENSOR PT100 NO ARDUINO PARA CAPTAÇÃO DA TMR

Mariana Espíndola Vieira
Helena Dufau
Christian Muller
Anderson Ferrugem
Antonio Silva
Rafael Soares

DOI 10.22533/at.ed.87219310128

CAPÍTULO 29 269

DINÂMICA DE ESCOAMENTOS PARTICULADOS EM DUTOS VERTICAIS

Diego Nei Venturi
Francisco José De Souza

DOI 10.22533/at.ed.87219310129

SOBRE O ORGANIZADOR 280

CONTROLE ROBUSTO APLICADO EM UMA VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO VISANDO ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Camila Albertin Xavier da Silva

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cornélio Procópio - Paraná

Daniel Almeida Colombo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cornélio Procópio – Paraná

Edson Hideki Koroishi

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cornélio Procópio – Paraná

Albert Willian Faria

Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Uberaba – Minas Gerais

RESUMO: As pesquisas em engenharia no desenvolvimento de novas técnicas de controle ativo de vibrações têm tido um aumento expressivo nos últimos anos e o uso dessas técnicas de controle com aplicação de atuadores eletromagnéticos vem apresentando resultados satisfatórios em termos de atenuação de vibração. O presente trabalho propõe o controle ativo de vibrações em uma viga de material compósito, utilizando atuadores eletromagnéticos, com intuito de obter uma redução na resposta do deslocamento do sistema. A teoria de controle utilizada foi o controle robusto, especificamente

o regulador linear quadrático resolvido por desigualdades matriciais lineares, que propõe a possibilidade da otimização de grandezas físicas através da adoção de um índice de desempenho. O atuador eletromagnético foi então linearizado utilizando uma metodologia similar a utilizadas em mancais magnéticos. A vantagem deste tipo de atuador é a aplicação da força de controle sem contato mecânico. Nas simulações numéricas obteve-se a resposta do deslocamento do sistema no domínio do tempo, na qual a vibração do sistema foi atenuada e também os resultados da função de resposta de frequência mostraram que os dois primeiros modos de vibrar foram atenuados, demonstrando assim, a eficiência da técnica proposta no controle ativo de vibrações em uma viga de material compósito.

PALAVRAS-CHAVE: Controle Ativo de Vibrações, Controle Robusto, Regulador Linear Quadrático, Material Compósito, Atuador Eletromagnético.

ABSTRACT: Engineering researches in the development of new techniques of active vibration control have had an expressive increase in recent years and the use of these control techniques with the application of electromagnetic actuators has presented satisfactory results in terms of vibration attenuation. The present work proposes the active vibration control in a beam

of composite material, using electromagnetic actuators, in order to obtain a reduction in the response of the displacement of the system. The control theory used was the robust control, specifically the linear quadratic regulator solved by linear matrix inequalities, that proposes the possibility of optimizing physical quantities by means the adoption of a performance index. The electromagnetic actuator was then linearized using a methodology similar to that used in magnetic bearings. The advantage of this type of actuator is that applies control force without mechanical contact. From numerical simulations, the system displacement response was obtained in the time domain, in which the vibration of the system was attenuated and also the results of the frequency response function showed that the two first vibration modes were attenuated, thus demonstrating the efficiency of the proposed technique in the active control of vibrations in a beam of composite material.

KEYWORDS: Active Vibration Control, Robust Control, Linear Quadratic Regulator, Composite Material, Electromagnetic Actuator

1 | INTRODUÇÃO

O controle tem se tornado de grande importância nos processos industriais e de produção, onde estas áreas vêm buscando meios de otimizar o desempenho de sistemas mecânicos. Dentre as técnicas presentes no controle moderno, tem-se o controle ativo de vibrações (AVC – do inglês *Active Vibration Control*), que nas últimas décadas tem apresentado grandes avanços e novas metodologias de controle. As pesquisas em engenharia visando o desenvolvimento destas novas metodologias, como novas técnicas de controle ativo de vibração, são impulsionadas pela necessidade de se dispor de estruturas leves associadas a um alto desempenho de operação, gerando menores custos operacionais e aumentando a competitividade (BUENO, 2007).

Entre as técnicas conhecidas de controle ativo de vibrações, o Controle Ótimo apresenta vantagens por permitir a inserção de incertezas via desigualdades matriciais lineares, resultando no projeto de controladores robustos. Este controle vem apresentando aplicações bem-sucedidas em diversas áreas. E uma das áreas de grande interesse atualmente, é o estudo de materiais compósitos, materiais os quais possuem um arranjo inovador, caracterizados por sua leveza, resistência mecânica, e a possibilidade de otimização de condições de funcionamento específico. Tais materiais podem ser formados por lâminas fibrosas em diferentes orientações, o que permite a adequação para aplicações particulares (REDDY, 1997).

No contexto destes sistemas mecânicos com ótimo desempenho, este trabalho propõe o uso do controle ativo modal de vibrações em uma viga de material compósito, utilizando atuadores eletromagnéticos cujos controladores foram projetados por meio da aplicação do Regulador Linear Quadrático (LQR – do inglês *Linear Quadratic Regulator*), com o objetivo de analisar o comportamento da resposta dinâmica, visando

à atenuação de vibrações e considerando incertezas no modelo.

2 | MODELO 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 de interesse (OGATA, 2003).

2.1. Campo de Deslocamento Mecânico

O comportamento mecânico de uma estrutura pode ser representado através da teoria de deformação de cisalhamento de primeira ordem (FSDT – do inglês *First-order Shear Deformation Theory*), representada pela equação (1):

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\psi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\psi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (1)$$

onde u_0 , v_0 e w_0 são os deslocamentos direcionais em x , y e z , respectivamente, sendo o plano ($x - y$) o plano médio do material. ψ_x e ψ_y são as rotações em torno dos eixos x e y , respectivamente, os segmentos ortogonais em relação à superfície de referência.

As variáveis mecânicas presentes na equação (1) são descritas, no Método dos Elementos Finitos, por meio de funções de forma e variáveis nodais. O elemento considerado na presente formulação é o *Serendipity*, um elemento plano com 3 nós por aresta, num total de oito nós (REDDY, 1997).

A partir da FSDT, o deslocamento mecânico em função das coordenadas nodais é dado pela equação (2):

$$\{U(\xi, \eta, z, t)\} = [A_u(z)] [N_u(\xi, \eta)] \{u_e(t)\} \quad (2)$$

onde $\{U(\xi, \eta, z, t)\} = \{u(\xi, \eta, z, t)\} \quad \{v(\xi, \eta, z, t)\} \quad \{w(\xi, \eta, z, t)\}^T$, $[A_u(z)]$ é a matriz das variáveis de espessura na direção z das variáveis nodais $(u_0, v_0, w_0, \psi_x$ e $\psi_y)$, $\{u_e(t)\}$, é o vetor que contém todas as variáveis nodais e $[N_u(\xi, \eta)]$ é a matriz das funções mecânicas da viga.

A deformação mecânica é expressa, utilizando as funções de forma e variáveis nodais, como demonstrado na equação (3):

$$\{\varepsilon(\xi, \eta, z, t)\} = [B_u(\xi, \eta, z)] \{u_e(t)\} \quad (3)$$

onde $[B_u(\xi, \eta, z)] = [D(z)][N_u(\xi, \eta)]$, e $[D(z)]$ é a matriz que contém operadores diferenciais presentes na relação deformação-deslocamento, detalhado em (FARIA, 2006).

2.2. FORMAÇÃO DA MATRIZ ELEMENTAR

De acordo com Chee (2000), as matrizes de acoplamento elementar são descritas pelas equações (4) e (5):

$$[M^e] = \int_{V_e} \rho [N_u]^T [A_u]^T [N_u] dV_e \quad (4)$$

$$[K_{uu}^e] = \sum_{k=1}^{nc} \int_{\xi=-1}^{+1} \int_{\eta=-1}^{+1} \int_{z=z_k}^{z_k+1} ([B_u]^T [c] [B_u]) J dz d\eta d\xi \quad (5)$$

onde ρ é a densidade do material, $[M^e]$ é a matriz elementar de massa e $[K_{uu}^e]$ é a matriz elementar de rigidez elástica. $[c]$ e $[B_u]$ são as matrizes, respectivamente, da rigidez elétrica de entrada e V_e é o volume elementar. J é o jacobiano da transformação (REEDY, 1997).

Com base nas equações (4) e (5), a matriz do modelo global representada na equação (6) é construída através do procedimento padrão, em que g indica as grandezas globais.

$$[M_g] \{\ddot{u}_g\} + [K_{uu}] \{u_g\} = \{F_g\} \quad (6)$$

onde $\{F_g\}$ é a força de excitação.

2.3. Redução de Modelos

A realização balanceada, consiste na descrição do modelo do sistema na forma de espaço de estados, combinando-o com as matrizes de controlabilidade e de observabilidade para cada graminiano de controlabilidade e observabilidade do sistema. O modelo reduzido é obtido negligenciando os estados associados a pequenos valores singulares (MEIROVITCH, 1990). A realização balanceada mínima do sistema é assintoticamente estável se os graminianos de controlabilidade e de observabilidade são iguais e diagonais (ZHOU; DOYLE, 1998).

Considere um sistema linear estável invariante no tempo representado na equação (7) e equação (8):

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (7)$$

$$\{y(t)\} = [C]\{x(t)\} \quad (8)$$

onde $x(t)$ corresponde ao vetor de estado, $[A]$ a matriz dinâmica $n \times n$, $[B]$ a matriz de entrada $n \times m$, $[C]$ 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.

O sistema é chamado balanceado, se as soluções respeitarem as equações de Lyapunov representadas pelas equações (9) e (10) e se $P = Q = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$.

$$[A][P] + [P][A]^T + [B][B]^T = 0 \quad (9)$$

$$[A]^T [Q] + [Q][A] + [C]^T [C] = 0 \quad (10)$$

Nas equações (9) e (10), $[P]$ e $[Q]$ são respectivamente os gramínicos de controlabilidade e observabilidade, e $\sigma_i, i = 1, 2, \dots, n$, são os valores singulares do sistema ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$).

Na realização balanceada, a fidelidade do modelo reduzido com o modelo completo (A, B, C) , depende da relação $\sigma_r \geq \sigma_{r+1}$, onde r é a ordem do modelo reduzido. A redução do sistema de espaço de estados é dada pelas equações (11) e (12):

$$\{\dot{x}(t)\} = [A_r] \{x_r(t)\} + [B_r] \{u_r(t)\} \quad (11)$$

$$\{y_r(t)\} = [C_r] \{x_r(t)\} \quad (12)$$

onde $\{x_r(t)\}$ é o vetor de estado reduzido, $\{u_r(t)\}$ o vetor reduzido de entrada, $[A_r]$ a matriz reduzida dinâmica $r \times r$, $[B_r]$ a matriz reduzida de entrada $r \times m$ e $[C_r]$ e a matriz reduzida de saída $s \times r$.

A redução do modelo através da realização balanceada é chamada de truncamento balanceado (ASSUNÇÃO; HEMERLY, 1992). A redução de modelos foi utilizada no presente trabalho a fim de garantir a controlabilidade e observabilidade do sistema.

3 | REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO

Para sistemas em malha fechada, o Regulador Linear Quadrático fornece uma metodologia para controlar o ganho de realimentação, garantindo uma boa margem de estabilidade.

O controle ótimo, no presente contexto, contribui para a minimização do índice de desempenho levando a otimização das grandezas físicas pré-definidas (OGATA, 2003). O controle da realimentação é dado pela equação (13):

$$\{u(t)\} = -[K] \{x(t)\} \quad (13)$$

onde $[K]$ o ganho é determinado com minimização do desempenho dado pela equação (14).

$$J = \int_0^{\infty} \left(\{x(t)\}^T [Q_{lqr}] \{x(t)\} + \{u(t)\}^T [R_{lqr}] \{u(t)\} \right) dt \quad (14)$$

sendo $[Q_{lqr}]$ uma matriz hermitiana definida positiva (ou semi-definida positiva) ou real simétrica das cargas de cada estado e $[Q_{lqr}]$ é uma matriz hermitiana definida positiva ou real simétrica do consumo de energia dos sinais de controle (SIMÕES, 2006).

3.1. Desigualdades Matriciais Lineares (LMIS).

A desigualdade matricial linear é um método importante que abrange diversos problemas matemáticos, seu uso é vantajoso em sistemas de controle para a determinação do ganho do controlador, devido a possibilidade de assumir parâmetros modais envolvendo incertezas. Atualmente, é tema de estudo em todo mundo, em diversas pesquisas que visam diferentes aplicações, como o controle ótimo e o controle robusto (VAN ANTWERP; BRAATZ, 2000; SILVA *et al.*, 2004).

Para um sistema de controle que faz uso do teorema de Lyapunov, primeiramente são verificadas as condições de estabilidade para posteriormente projetar o controlador com as devidas restrições criadas anteriormente. Lyapunov mostrou que o sistema representado pela equação (15) é estável se e somente existir uma matriz positiva P_{lmi} , que atenda a condição dada pela equação (16), conhecida como desigualdade de Lyapunov.

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} \quad (15)$$

$$[A]^T [P_{lmi}] + [P_{lmi}] [A] > 0 \quad (16)$$

3.2. Regulador Linear Quadrático Via LMIs

Muitos autores têm considerado aplicações de LQR, no entanto, o uso de LMIs para este controlador é pouco discutido (JOHNSON; ERKUS, 2002). O regulador linear quadrático via LMIs é ilustrado em (ERKUS; LEE, 2004). Estes autores mostraram que o problema LQR via LMI, a partir da minimização do índice de desempenho, é descrito pela equação (17):

$$\min_{X, P_{lmi}, X_{lmi}} \left(tr([Q_{lqr}] [P_{lmi}]) + tr([X_{lmi}]) + tr([Y_{lmi}] N) + tr([N]^T Y_{lmi}^T) \right) \quad (17)$$

onde N corresponde a inserção de ruído, $[X_{lmi}]$ e $[Y_{lmi}]$ e as soluções das LMIs

denotadas na matriz, e $tr()$ ao traço da matriz. A equação (17) é sujeita a condições impostas pelas equações (18) e (19):

$$[A][P] - [B][Y_{lmi}] + [P][A]^T - [Y_{lmi}]^T [B]^T + [B_w][B_w]^T < 0 \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} [X_{lmi}] & [R_{lqr}]^{1/2}[Y_{lmi}] \\ Y_{lmi}[R_{lqr}]^{1/2} & [P_{lmi}] \end{bmatrix} > 0 \quad (19)$$

sendo B_w a matriz de perturbação.

Para se obter o ganho do controlador utiliza-se a equação (20).

$$[G] = [Y][P_{lmi}]^{-1} \quad (20)$$

3.3. Projeto Do Controlador Robusto Usando LMIs

O projeto do controlador robusto presente neste trabalho foi previamente apresentado por (ASSUNÇÃO; TEIXEIRA, 2001). As condições para a estabilidade no sistema com incertezas politópicas é apresentada na equação (21).

$$\begin{bmatrix} [A_i][X] - [B_i][G] + [X][A_i]^T - [G]^T [B_i]^T < 0 \\ [X] > 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

onde $i = 1, 2, \dots, m$ e m é o número de incertezas.

4 | ATUADOR ELETROMAGNÉTICO

A metodologia para obtenção do modelo de um atuador eletromagnético foi apresentada por Moraes (2010). A figura 1 ilustra o modelo.

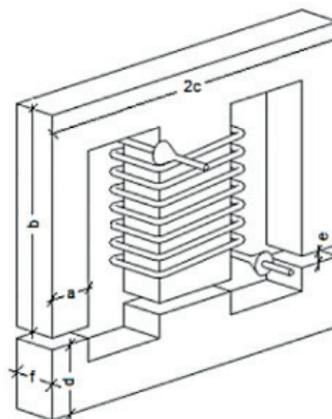


Figura 1. Eletroímã do atuador eletromagnético (MORAIS, 2010).

O esquema apresentado na figura 1 consiste em uma bobina enrolada em um núcleo de material ferromagnético. A força de atração entre os dois elementos do núcleo ferromagnético é representada pela equação (22):

$$F_{AEM} = \frac{\partial W_{cmag}}{\partial x_m} = \frac{N^2 I^2 \mu_0 a f}{2 \left((e \pm \delta) + \frac{b+c+d-2a}{\mu_r} \right)^2} \quad (22)$$

sendo δ a variável que se acrescenta ao entreferro para representar a vibração da viga na posição do AEM. Vale ressaltar que o AEM aplica apenas força de atração e, desta forma, o sinal “±” deve ser assim entendido: o valor “+” para $\delta > 0$; e “-” para $\delta < 0$.

4.1. Linearização do Atuador Eletromagnético

Analisando a equação (22), sabe-se que o atuador introduz forças eletromagnéticas que são aproximadamente proporcionais ao inverso do quadrado da distância do entreferro entre os dois elementos do circuito magnético “e”, e também ao quadrado da corrente elétrica da bobina I , caracterizando uma não linearidade.

Considerando dois atuadores em sentidos opostos, forma na qual será utilizada no presente trabalho, a função não linearizada da força eletromagnética do F_{AEM} é representada pela equação (23).

$$F_{AEM} = \frac{N^2 I_1^2 \mu_0 a f}{2 \left((e - \delta) + \frac{b+c+d-2a}{\mu_r} \right)^2} - \frac{N^2 I_2^2 \mu_0 a f}{2 \left((e + \delta) + \frac{b+c+d-2a}{\mu_r} \right)^2} \quad (23)$$

Para a obtenção dos controladores deve-se linearizar a atuação das forças eletromagnéticas na posição de equilíbrio do sistema (x_0, i_0) (LARSONNER, 2009). Para que seja possível a linearização dos sistema, é utilizada uma corrente de polarização i_b .

A força eletromagnética na forma linearizada é dada pela equação (24), na qual apresenta uma aproximação linear da relação verdadeira, precisando apenas da proximidade do ponto de operação.

$$F_{AEM} = k_i i - k_x x \quad (24)$$

sendo k_i o ganho do atuador, i a corrente elétrica, k_x a rigidez e x o deslocamento.

5 | SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O controle ativo modal é usado para o controle da estrutura compósita. Na figura 2 é ilustrada a forma esquemática da qual o controle ativo modal é utilizado, onde δ corresponde ao deslocamento, X ao estado modal, F_{exc} a força externa e i a corrente elétrica.

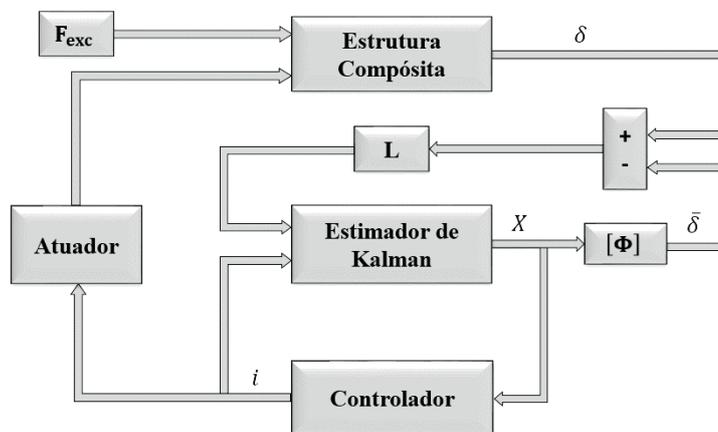


Figura 2. Controle ativo modal baseado na realimentação do controle no estado modal (adaptado de CONCEIÇÃO *et al.*, 2009).

No esquema apresentado na figura 2, a estrutura compósita, representada pela equação (6), foi então descrita na forma de espaço de estados, demonstrada nas equações (7) e (8), para as simulações numéricas, onde o estimador de Kalman determina os estados modais exigidos pelo controlador.

A viga de material compósito estudada no presente trabalho é ilustrada na Figura 3. A viga tem 306 mm de comprimento, 25,5 [mm] de largura e 1 [mm] de espessura, e é formada por 5 camadas de grafite/epóxi de espessura de 0,2 [mm]. As camadas possuem as orientações de $[45^\circ / 0^\circ / 45^\circ / 0^\circ / 45^\circ]$, em que as de orientação de 0° são paralelas ao eixo x.

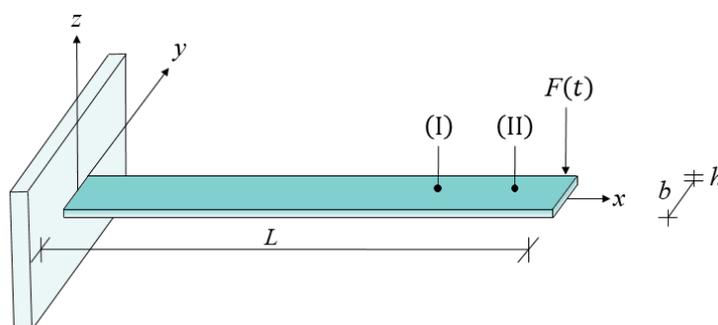


Figura 3. Viga de material compósito em engaste-livre (KOROISHI *et al.*, 2015).

As constantes de rigidez elástica da viga em material compósito, feita de grafite/epóxi (AS4/3501) dada em [GPa], são, respectivamente: $C_{11} = 173,6$; $C_{22} = C_{33} = 7,61$; $C_{12} = C_{13} = 2,48$; $C_{23} = 2,31$; $C_{44} = 1,38$; $C_{55} = C_{66} = 3.45$. A densidade de massa da viga de material compósito é $1578 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (FARIA, 2006).

Os parâmetros do atuador são apresentados na tabela 1.

μ_0 (H/m)	μ_r	N (espiras)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	f (mm)	i_b (A)
$4\pi 10^{-7}$	700	250	9,5	38	28,5	9,5	22,5	0,1

Tabela 1. Parâmetros do núcleo e da bobina (KOROISHI, 2013).

A corrente elétrica é determinada pela planta de controle e, desta forma, ela é determinada de acordo com a solicitação do sistema.

A bobina é composta de 250 espiras, em que no enrolamento foi utilizado fio de cobre do padrão AWG24. As características do fio, segundo o padrão, são apresentadas na tabela 2.

Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Resistência a 20°C (Ohm/m)	Corrente Máxima (A)
0,511	0,205	0,0842	3,5

Tabela 2. Fio de cobre AWG24 (KOROISHI, 2013).

Neste trabalho é utilizado dois atuadores eletromagnéticos (AEM1 e AEM2), ambos atuando na direção z. O esquema é representado na figura 4.



Figura 4. Posicionamento dos atuadores eletromagnéticos na viga de material compósito em engaste-livre.

Os atuadores eletromagnéticos foram posicionados na extremidade livre da viga, onde se encontram os maiores deslocamentos. Cada atuador age separadamente, aplicando apenas força de atração.

Na simulação numérica, a força de excitação de carga 1 [N] é aplicada no ponto (II) ilustrado na figura 3 e as respostas em domínio do tempo são capturadas no ponto (I). As incertezas são aplicadas considerando variações de $\pm 10\%$ na matriz [A] no modelo da estrutura compósita, sendo analisado 100 amostras dentro de intervalo de variações.

6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para análise da eficiência desta metodologia considerando a técnica de controle robusto, em termos de atenuação de vibração, foram confrontados graficamente a redução da resposta do deslocamento do sistema, a função resposta em frequência e as correntes utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos.

A figura 5 apresenta a resposta do deslocamento em domínio do tempo, em três situações, sem controle, com o controle robusto e com controle no estado determinístico.

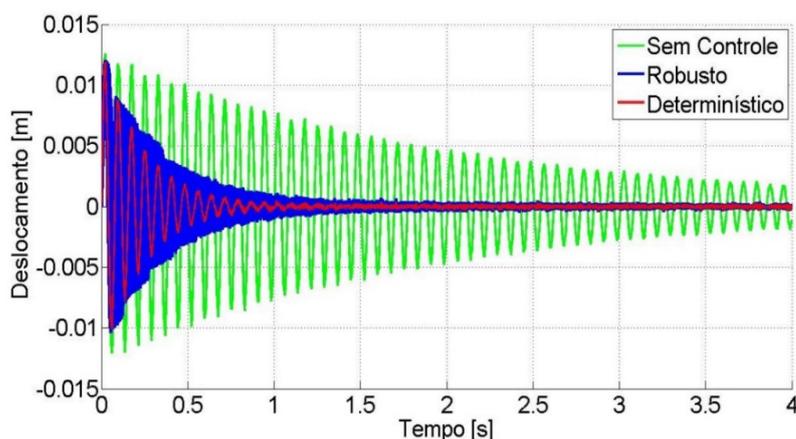


Figura 5. Resposta do deslocamento em domínio do tempo utilizando a teoria de controle robusto.

Analisando as respostas da figura 5, em termos de robustez, o controle robusto atenuou a resposta do sistema com a presença das incertezas, fato verificado pelo envelope presente na resposta, sendo o deslocamento do sistema atenuado num tempo de 1 [s], mostrando que a metodologia envolvendo a teoria de controle robusto foi eficiente para a atenuação da resposta do deslocamento do sistema.

Ainda para análise do comportamento do sistema, é obtida a função resposta em frequência (FRF) dos 3 casos, sem controle, com controle no estado determinístico e com controle robusto. A função resposta em frequência é mostrada na figura 6.

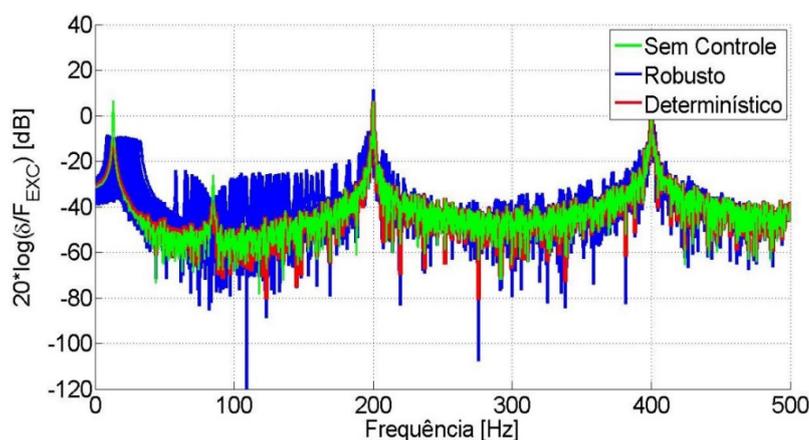


Figura 6. Função Resposta em Frequência.

Nota-se pela figura 6, a diminuição expressiva dos picos de frequência tanto para o controle robusto quanto para determinístico. Em termos de robustez, o envelope azul mostrado na figura 6, apresentou a atenuação dos dois primeiros modos, sendo o primeiro atenuado cerca de 16,8 [dB] e o segundo modo atenuado cerca de 11,7 [dB]. Os modos mais elevados não apresentaram excedentes com o uso do controle. Vale

destacar, pela análise de controlabilidade, o sistema era controlável considerando apenas os dois primeiros modos do sistema.

Com a linearização do atuador eletromagnético, foram analisadas a corrente utilizada nos atuadores eletromagnéticos, para o estado determinístico e para o controle robusto, sua resposta é mostrada pela figura 7.

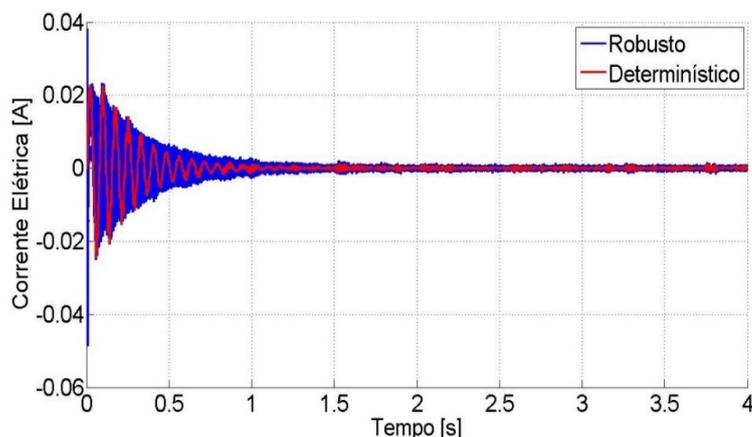


Figura 7. Corrente elétrica com a aplicação do controle robusto.

7 | CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo a atenuação de vibrações em uma viga de material compósito utilizando atuadores eletromagnéticos por meio da aplicação do controle robusto. Primeiramente obteve-se resultados por meio da aplicação do controle ótimo, sem a inserção de incertezas, no qual mostrou resultados satisfatórios, e a eficiência do sistema de controle.

Posteriormente foram inseridas as devidas incertezas para a obtenção das respostas do controle robusto, que em termos de robustez, atenuou a resposta do sistema com a presença das incertezas, num tempo de 1 [s], mostrando que metodologia envolvendo a teoria de controle robusto foi eficiente para a atenuação da resposta do deslocamento do sistema e ainda os dois primeiros modos foram atenuados cerca de 16,8 [dB] para o primeiro modo, e 11,7 [dB] para o segundo modo.

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 vigas de materiais compósitos.

REFERÊNCIAS

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

ASSUNÇÃO, E.; TEIXEIRA, M., **Projeto de Sistema de Controle via LMIs usando o MATLAB**, Escola Brasileira de Aplicações em Dinâmica e Controle - APLICON-USP, São Carlos, Brasil, 2001.

BUENO, D. D., **Controle Ativo de Vibrações e Localização Ótima de Sensores e Atuadores Piezelétricos**, Dissertação de Mestrado, Ilha Solteira, 2007.

CHEE, C.Y.K., **Static Shape Control of Laminated Composite Plate Smart Structure Using Piezoelectric Actuators**, Ph.D. Thesis, University of Sydney, Sydney, Australia, 2000.

CONCEIÇÃO, S. M.; BUENO, B. N.; CAVALINI JR, A. A.; ABREU, G. L.; MELO, G. P.; LOPES JR, V., **Model Reduction Methods for Smart Truss like Structure**, Proceedings of 8th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, Bauru, Brasil, 2009.

ERKUS, B.; LEE, Y.J., **Linear Matrix Inequalities and Matlab LMI Toolbox**, University of Southern California Group Meeting Report, Los Angeles, USA, 2004.

FARIA, A. W., **Modelagem por Elementos Finitos de Placas Compostas Dotadas de Sensores e Atuadores Piezolétricos: Implementação Computacional e Avaliação Numérica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 152 f, 2006.

JOHNSON, E.A.; ERKUS, B., **Structural Control with Dissipative Camping Devices**, Proceedings of the American Control Conference, Vol. 3, Anchorage, USA, 2002.

KOROISHI, E. H., **Controle de Vibrações em Máquinas Rotativas utilizando Atuadores Eletromagnéticos**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 225f, 2013.

KOROISHI, E. H.; LARA-MOLINA, F. A.; FARIA, A. W.; STEFFEN JR, V., **Robust Control Applied to a Composite Laminated Beam**, J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.7, No 1, pp.70-80, Jan.-Mar., 2015, doi: 10.5028/jatm.v7i1.389, 2015.

LARSONNER, R., **Principal of Active Magnetic Suspension. In: Magnetic Bearing Theory**, Design, and Application to Rotating Machinery. Springer, p. 27-67, 2009.

MEIROVITCH, L., **Dynamics and Control of Structures**. Blacksburg, Department of Engineering Science and Mechanics, 193 p, 1990.

MORAIS, T. S., **Contribuição ao Estudo de Máquinas Rotativas contendo não Linearidades**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

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

REDDY, J.N., **Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis**, Second Edition, CRC Press, London, UK, 1997.

SILVA, S.; LOPES JR, V.; ASSUNÇÃO, E., **Robust Control to Parametric Uncertainties in Smart Structures Using Linear Matrix Inequalities**, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 26, No. 4, pp. 430-437, 2004.

SIMÕES, R. C., **Controle Modal Ótimo de um Rotor Flexível Utilizando Atuadores Piezelétricos do Tipo Pilha**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 133p, 2006.

VAN ANTWERP, J.G.; BRAATZ, R.D., **A Tutorial on Linear and Bilinear Matrix Inequalities**, Journal of Process Control, Vol. 10, No. 4, pp. 363-385, 2000.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-087-2

