

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CAMILA ALBERTIN XAVIER DA SILVA

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÕES
EM SISTEMAS MECÂNICOS**

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2020

CAMILA ALBERTIN XAVIER DA SILVA

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÕES
EM SISTEMAS MECÂNICOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio, como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica”. Área de Concentração: Ciências Mecânicas

Orientador: Prof. Dr. Edson Hideki Koroishi.
Co-orientador: Prof. Dr. Fabian Andres Lara-Molina.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S586 Silva, Camila Albertin Xavier da

Aplicação de técnicas de controle ativo de vibrações em sistemas mecânicos / Camila Albertin Xavier da Silva. – 2020.
127 p. : il. color. ; 31 cm.

Orientador: Edson Hideki Koroishi.

Coorientador: Fabian Andres Lara Molina.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2020.

Bibliografia: p. 111-120.

1. Vibração. 2. Teoria do controle. 3. Medidas eletromagnéticas. 4. Engenharia Mecânica – Dissertações. I. Koroishi, Edson Hideki, orient. II. Molina, Fabian Andres Lara, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD (22. ed.) 620.1

Biblioteca da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio

Bibliotecário/Documentalista responsável:
Romeu Righetti de Araujo – CRB-9/1676



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Cornélio Procópio
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica



Título da Dissertação N° 043:

“Aplicação De Técnicas De Controle Ativo De Vibrações Em Sistemas Mecânicos”.

Por

Camila Albertin Xavier da Silva

Orientador: **Prof. Dr. Edson Hideki Koroishi**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** – Área de Concentração: **Ciências Mecânicas**, linha de pesquisa: **Sistemas Dinâmicos**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às 14h00 do dia 04 de MARÇO de 2020. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof.Dr. Edson Hideki Koroishi
(Orientador – UTFPR-CP)

Prof. Dr. Rodrigo Henrique Cunha Palácios
(UTFPR-CP)

Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavallini
Junior
(UFU)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Umberto Xavier da Silva Júnior e Mafalda Albertin Xavier da Silva (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por iluminar o meu caminho durante os dois anos de mestrado, o qual me deu forças para cumprir esta etapa importante da minha vida.

Ao meu pai Umberto, meus irmãos Franciellen, Amanda e Umberto, minhas tias Vanda e Claudete e a minha madrastra Fátima por todo apoio e incentivo para a realização deste trabalho.

À minha mãe Mafalda, mesmo não presente fisicamente, esteve sempre presente em meu coração, agradeço por todos seus ensinamentos que levarei comigo por toda minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edson Hideki Koroishi, pela sabedoria que me guiou durante estes anos, pelos seus conhecimentos, confiança, paciência e parceria desde 2015 até o presente momento.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Fabian Andres Lara-Molina, por todo conhecimento e sabedoria compartilhada.

Ao Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa e ao laboratório de materiais pelo desenvolvimento da viga de material compósito utilizada no presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Marco Túlio Santana Alves pelo compartilhamento de seu conhecimento e sabedoria sobre o algoritmo ERA/OKID,

Ao meu namorado, André Luis, por todo incentivo, carinho, companheirismo, e amor, por estar ao meu lado nos momentos de dificuldades e nos momentos de felicidade. Sou grata por toda sua compreensão e dedicação, e principalmente por acreditar em minha capacidade. Agradeço também a sua família, Evanice, Milton, Ana, Fernando, Maria Luísa e Francisco, por todo apoio e incentivo e por todos os momentos de descontração e cuidado.

Aos meus amigos, pelo apoio e pelos momentos divertidos, especialmente a minha amiga Raquel Alonso que me acompanhou durante esses dois anos de mestrado, dividindo comigo alegrias e angustias.

Aos meus colegas de laboratório, em especial Joana Repinaldo, William Faria e Matheus Maroni, pela ajuda durante os procedimentos experimentais, pelas experiências compartilhadas, as quais foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por toda estrutura, e pela oportunidade de realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de estudo para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo 402581/2016-4) ao apoio financeiro para realização deste trabalho.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

SILVA, Camila Albertin Xavier da. **Aplicação de Técnicas de Controle Ativo de Vibrações em Sistemas Mecânicos**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2020.

O presente trabalho propõe o controle ativo de vibração em uma viga de material compósito por meio da utilização de atuadores eletromagnéticos. A vantagem do uso destes atuadores é a aplicação da força de controle sem contato mecânico. Com o intuito de avaliar o desempenho de diferentes técnicas de controle, foram aplicadas as seguintes técnicas de controle: Controle Ótimo, especificamente o regulador quadrático linear via desigualdades matriciais lineares, controle *Fuzzy* e controle *Neuro-Fuzzy*. O modelo matemático da viga foi obtido através do algoritmo do ERA/OKID, que consiste em um método de identificação usado para identificar parâmetros modais em estruturas complexas. Com o modelo matemático, foram projetados os controladores, sendo estes responsáveis pela determinação do esforço de controle. Os atuadores eletromagnéticos são responsáveis pela aplicação dos esforços de controle para a redução da amplitude de vibração do sistema. A partir daí, foram realizadas simulações numéricas e testes experimentais, nas quais a atenuação da vibração do sistema foi obtida em ambos os procedimentos, e nos três tipos de controladores, avaliada através das respostas tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Os controladores apresentaram um tempo de acomodação no domínio do tempo em cerca de meio a um segundo e no domínio da frequência apresentaram uma atenuação do primeiro modo de vibrar em cerca de noventa por cento. Por fim, analisou-se a robustez dos controladores a partir da variação de +/- 20% inserida na matriz dinâmica do sistema, na qual os controladores se mostraram robustos, validando assim a metodologia estudada.

Palavras-chave: Controle Ativo de Vibrações; Controle Ótimo; Controle *Fuzzy*; Controle *Neuro-Fuzzy*; Atuador Eletromagnético; Material Compósito; ERA/OKID.

ABSTRACT

SILVA, Camila Albertin Xavier da. **Application of Active Vibration Control Techniques in Mechanical Systems**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

The present work proposes the active vibration control applied in a composite material beam using electromagnetic actuators. The advantage of using these actuators is the application of force control without mechanical contact. In order to evaluate the performance of different control techniques, the following control techniques were applied: Optimal Control, specifically the linear quadratic regulator via linear matrix inequalities, Fuzzy control and Neuro-Fuzzy control. The mathematical model of the beam was obtained through the ERA/OKID algorithm, which consists of an identification method used to identify modal parameters in complex structures. With the mathematical model, the controllers were designed, being responsible for determining the control effort. Electromagnetic actuators were responsible for applying control efforts to stabilize the system. From there, numerical simulations and experimental tests were carried out, in which the attenuation of the vibration of the system was obtained in both procedures, and in the three types of controllers, evaluated through the responses both in the time domain and in the frequency domain. The controllers showed an accommodation time in the time domain in about half until a second and in the frequency domain they presented an attenuation of the first mode of vibration by about ninety percent. Finally, the robustness of the controllers was analyzed from the variation of +/- 20% inserted in the dynamic matrix of the system, in which the controllers were shown robust, thus validating the studied methodology.

Keywords: Active Vibration Control; Optimal Control; Fuzzy Control; Neuro-Fuzzy Control; Electromagnetic Actuator; Composite Material; ERA/OKID.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Doença de Raynaud.....	21
Figura 1.2 – Helicóptero H130 da Helibras.....	22
Figura 2.1 – Airbus A350 XWB	26
Figura 2.2 – Classificação dos materiais compósitos segundo sua fase dispersa: particulado, reforçado por fibras e estrutural laminado	27
Figura 2.3 – Esquema de classificação dos materiais compósitos	27
Figura 2.4 – Estrutura de sanduíche (a) alma cheia (b) alma vazia.....	29
Figura 3.1 - Sistema de controle de malha aberta	32
Figura 3.2 - Sistema de controle de malha fechada com retroação.....	33
Figura 3.3 - Quatro divisões possíveis de um sistema	34
Figura 3.4 – Estrutura controlador <i>Fuzzy</i>	40
Figura 3.5 – Arquitetura ANFIS	42
Figura 4.1 - Efeito da incorporação do observador de estado no sistema sobre a resposta no domínio do tempo	54
Figura 5.1 - Bancada Experimental concepção CAD.....	59
Figura 5.2 – Foto bancada experimental.....	60
Figura 5.3 – Viga de Material Compósito	61
Figura 5.4 – Atuador Eletromagnético.....	63
Figura 5.5 – Estratégia ERA/OKID	64
Figura 5.6 - Controle ativo modal baseado na realimentação do controle no estado modal	66
Figura 5.7 – Função de Pertinência do Controle <i>Fuzzy</i> (deslocamento)	68
Figura 5.8 – Função de Pertinência do Controle <i>Fuzzy</i> (velocidade).....	68
Figura 5.9 – Superfície do Controlador <i>Fuzzy</i> para o Controle do Primeiro Modo de Vibrar	69

Figura 5.10 – Arquitetura ANFIS do controlador <i>Neuro-Fuzzy</i>	70
Figura 5.11 – Funções de Pertinência do Controle <i>Neuro-Fuzzy</i> (deslocamento)....	71
Figura 5.12 – Funções de Pertinência do Controle <i>Neuro-Fuzzy</i> (velocidade)	71
Figura 5.13 – Superfície do Controlador <i>Neuro-Fuzzy</i> para o Controle do Primeiro Modo de Vibrar	72
Figura 5.14 – Sistema de aquisição para o controle experimental	73
Figura 5.15 – Metodologia do Controle Experimental.....	74
Figura 6.1 – Resposta numérica no domínio do tempo (controle Ótimo)	77
Figura 6.2 – Resposta numérica no domínio da frequência (controle Ótimo)	78
Figura 6.3 – Corrente elétrica numérica (controle Ótimo)	78
Figura 6.4 – Carga elétrica numérica (controle Ótimo)	79
Figura 6.5 – Resposta numérica no domínio do tempo (controle <i>Fuzzy</i>)	81
Figura 6.6 – Resposta numérica no domínio da frequência (controle <i>Fuzzy</i>)	81
Figura 6.7 – Corrente elétrica numérica (controle <i>Fuzzy</i>)	82
Figura 6.8 – Carga elétrica numérica (controle <i>Fuzzy</i>)	82
Figura 6.9 – Resposta numérica no domínio do tempo (controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	84
Figura 6.10 – Resposta numérica no domínio da frequência (controle <i>NEURO-FUZZY</i>)	85
Figura 6.11 – Corrente elétrica numérica (controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	85
Figura 6.12 – Carga elétrica numérica (controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	86
Figura 6.13 – Respostas numéricas no domínio do tempo	87
Figura 6.14 – Respostas numéricas no domínio da frequência	88
Figura 6.15 – Respostas numéricas das correntes elétricas	88
Figura 6.16 – Resposta experimental no domínio do tempo (controle Ótimo)	90
Figura 6.17 – Comparação das respostas numérica e experimental (controle Ótimo)	90
Figura 6.18 – Resposta experimental no domínio da frequência (controle Ótimo)....	91

Figura 6.19 – Comparação das respostas experimentais no domínio	92
Figura 6.20 – Corrente elétrica experimental (controle Ótimo)	92
Figura 6.21 – Comparação das correntes elétricas numérica e experimental (controle Ótimo)	93
Figura 6.22 – Carga elétrica experimental (controle Ótimo)	93
Figura 6.23 – Resposta experimental no domínio do tempo (controle <i>Fuzzy</i>)	95
Figura 6.24 – Comparação das respostas numérica e experimental (controle <i>Fuzzy</i>)	95
Figura 6.25 – Resposta experimental no domínio da frequência (controle <i>Fuzzy</i>)	96
Figura 6.26 – Comparação das respostas experimentais no domínio da frequência (controle <i>Fuzzy</i>)	97
Figura 6.27 – Corrente elétrica experimental (controle <i>Fuzzy</i>)	97
Figura 6.28 – Comparação das correntes elétricas numérica e experimental (controle <i>Fuzzy</i>)	98
Figura 6.29 – Carga elétrica experimental (controle <i>Fuzzy</i>)	99
Figura 6.30 – Resposta experimental no domínio do tempo (controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	100
Figura 6.31 – Comparação das respostas numérica e experimental (controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	101
Figura 6.32 – Resposta experimental no domínio da frequência (controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	102
Figura 6.33 – Comparação das respostas experimentais no domínio da frequência (controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	102
Figura 6.34 – Corrente elétrica experimental (controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	103
Figura 6.35 – Comparação das correntes elétricas numérica e experimental (controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	103
Figura 6.36 – Carga elétrica experimental (controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	104

Figura 6.37 – Respostas experimentais no domínio do tempo	105
Figura 6.38 – Respostas experimentais no domínio da frequência	106
Figura 6.39 – Respostas experimentais das correntes elétricas	107
Figura A.1 – Bancada experimental em vista isométrica	121
Figura A.2 – Bancada experimental em vista frontal	121
Figura A.3 – Detalhes bancada experimental	122
Figura A.4 – Desenho bancada experimental	122
Figura A.5 – (a) Desenho atuador (b) Desenho perfil coluna (c) Desenho perfil base (d) Cantoneira (e) Cantoneira para engaste da viga (f) cantoneira com rasgo	123
Figura B.1 – Placa de aquisição modelo PCI-6221	124
Figura B.2 – Terminal modelo CB-68LPR	124
Figura B.3 – (a) Acelerômetro modelo 35C22 (b) Cabo modelo 030A10.....	125
Figura B.4 – (a) Condicionador de sinal modelo 480E09 (b) Cabo modelo 003A10	126
Figura B.5 – Servo-amplificador modelo 4-Q-DC	126
Figura B.6 – (a) Fonte de Alimentação PS-6000 (b) Cabos conexão banana	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Propriedade de manuseio da resina epóxi.....	61
Tabela 5.2 – Propriedades físicas da resina epóxi	62
Tabela 5.3 - Parâmetros do núcleo e da bobina.....	63
Tabela 5.4 - Fio de cobre AWG24.....	63
Tabela 5.5 – Regras Controlador <i>Fuzzy</i> para o Primeiro Modo.....	69
Tabela 5.6 – Regras Controlador <i>Neuro-Fuzzy</i> para o Primeiro Modo	72
Tabela 6.1 – Resultados numéricos da variação na matriz dinâmica (Controle Ótimo)	80
Tabela 6.2 – Resultados numéricos da variação na matriz dinâmica (Controle <i>Fuzzy</i>)	83
Tabela 6.3 – Resultados numéricos da variação na matriz dinâmica (Controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	86
Tabela 6.4 – Resultados obtidos nas simulações numéricas	89
Tabela 6.5 – Resultados experimentais da variação na matriz dinâmica (Controle Ótimo).....	94
Tabela 6.6 – Resultados experimentais da variação na matriz dinâmica (Controle <i>Fuzzy</i>).....	99
Tabela 6.7 – Resultados numéricos da variação na matriz dinâmica (Controle <i>Neuro-Fuzzy</i>)	104
Tabela 6.8 – Resultados obtidos no controle experimental	107
Tabela 6.9 – Resultados obtidos nas simulações numéricas e no controle experimental	107
Tabela A.1 – Componentes Bancada Experimental	123

LISTA DE SÍMBOLOS

$[A]$	Matriz dinâmica
$[\hat{A}]$	Matriz dinâmica identificada
$[\bar{A}]$	Matriz dinâmica com o observador incorporado
$[A_r]$	Matriz dinâmica reduzida
a, b, c, d	Parâmetros geométricos do atuador eletromagnético
a_f, b_f, c_f	Parâmetros da função <i>gbell</i>
$[B]$	Matriz de Entrada
$[\hat{B}]$	Matriz de entrada identificada
$[\bar{B}]$	Matriz dos atuadores com o observador incorporado
$[B_r]$	Matriz de entrada reduzida
B_w	Matriz de perturbação
$[C]$	Matriz de saída
$[\hat{C}]$	Matriz de saída identificada
$[C_r]$	Matriz de saída reduzida
$[D]$	Matriz de perturbação
$[\hat{D}]$	Matriz de perturbação identificada
$[E_m]$	Matriz auxiliar para determinação de $[\hat{C}]$
$[E_r]$	Matriz auxiliar para determinação de $[\hat{B}]$
F_i	Esforço de controle
f_1 e f_2	Parâmetros consequentes da regra da função de ativação
$[G]$	Matriz de ganho do controlador LQR via LMI
$[G_o]$	Matriz de ganho do observador
$[H]$	Matriz de Hankel
$[I]$	Matriz identidade
i	Corrente elétrica

J	Índice de desempenho
$[K]$	Matriz de ganho do controlador LQR
k	Tempo discreto
$[L]$	Matriz de ganho do filtro de Kalman
ℓ	Tamanho da amostra ou comprimento do vetor de dados
\ln	Operador logaritmo natural
m	Número de entradas
N	Número de espiras
$[N_r]$	Matriz de inserção de ruído
n	Ordem do sistema
$[O_m]$	Matriz nula quadrada de ordem m
$[O_r]$	Matriz nula quadrada de ordem r
p	Número de parâmetros de Markov do observador
$[P]$	Matriz de observabilidade
$[P_{lmi}]$	Matriz positiva da desigualdade de Lyapunov
$[Q]$	Matriz de controlabilidade
$[Q_{lqr}]$	Matriz hermitiana definida positiva ou real simétrica das cargas de cada estado
$[R]$	Matriz resultante da decomposição em valores singulares da matriz de Hankel
r	Número de saídas
$[R_{lqr}]$	Matriz hermitiana definida positiva ou real simétrica do consumo de energia dos sinais de controle
$[S]$	Matriz resultante da decomposição em valores singulares da matriz de Hankel
S_{co}	Subsistema completamente controlável e observável
S_o	Subsistema completamente observável e não controlável
S_c	Subsistema completamente controlável e não observável

S_u	Subsistema completamente não controlável e não observável
t	Tempo
t_0	Tempo inicial
t_f	Tempo final
$tr()$	Traço da matriz
$\{u(t)\}$	Vetor de entrada
$[U]$	Matriz dos dados de entrada do sistema
$[\tilde{U}]$	Matriz truncada de $[U]$
$[V]$	Matriz dos dados de entrada do sistema com observador
$[\tilde{V}]$	Matriz truncada de $[V]$
$[v(k)]$	Matriz de entrada no domínio do tempo discreto
$\{x(t)\}$	Vetor de estado
$\{x_r(t)\}$	Vetor de estado reduzido
$\{X_I(t)\}$	Sinais de entrada
$[X_{lmi}]$	Soluções das LMIs denotadas na matriz
$x(t)$	Vetor de estado
$\dot{x}(t)$	Derivada $x(t)$ em relação ao tempo
$\{x_r(t)\}$	Vetor de estado reduzido
w_i	Grau de aplicabilidade
\bar{w}_i	Normalização das funções de pertinência
$[Y]$	Parâmetro de Markov do sistema
$[\tilde{Y}]$	Parâmetro de Markov do sistema
$[\tilde{\tilde{Y}}]$	Matriz truncada de $[\tilde{Y}]$
$[Y_{lmi}]$	Soluções das LMIs denotadas na matriz
$\{y(t)\}$	Vetor de saída
$[y]$	Matriz dos dados de saída
$[\bar{y}]$	Matriz dos dados de saída com o observador incorporado

z_i	Função do método Takagi-Sugeno
α_i	Cargas atribuídas ao deslocamento
β_i	Cargas atribuídas a velocidade
$\delta(t)$	Vetor de deslocamento
$\bar{\delta}(t)$	Vetor de deslocamento estimado
$[\Lambda]$	Matriz diagonal de autovalores
$[\Lambda_c]$	Matriz diagonal de autovalores no domínio contínuo
λ_n	Autovalores
$\mu_A(X)$	Função de Pertinência
$[\Sigma]$	Matriz resultante da decomposição da matriz de Hankel
$[\Psi]$	Matriz de autovetores
ψ_n	Autovetores

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AEM	Atuador Eletromagnético
AVC	Controle Ativo de Vibrações
ANFIS	Sistema de Inferência <i>Neuro-Fuzzy</i> adaptativo
ERA	Algoritmo de Realização do Sistema com
ERA/OKID	Algoritmo de Realização do Sistema com Observador de estado/Filtro de Kalman
FSDT	Teoria da Deformação Cisalhante de Ordem Superior
HSDT	Teoria da Deformação de Terceira Ordem
LMI	Desigualdades Matriciais Lineares
LQR	Regulador Linear Quadrático
OKID	Identificação com Observador/Filtro de Kalman
RTM	Moldagem por Transferência de Resina
VARTRM	Moldagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	24
1.1.1	Objetivos específicos	25
2	MATERIAIS COMPÓSITOS	26
2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	27
2.1.1	Materiais compósitos reforçados por partículas	28
2.1.2	Materiais compósitos reforçados por fibras	29
2.1.3	Materiais compósitos estruturais	30
2.2	MODELAGEM DE MATERIAIS COMPÓSITOS	31
3	TEORIA DE CONTROLE	33
3.1	SISTEMAS DE CONTROLE	33
3.2	ESPAÇO DE ESTADOS	34
3.3	CONTROLABILIDADE E OBSERVABILIDADE	35
3.3.1	Controlabilidade	36
3.3.2	Observabilidade	36
3.4	CONTROLE ÓTIMO	37
3.4.1	Regulador Linear Quadrático	37
3.4.2	Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs)	38
3.4.3	Regulador Linear Quadrático via LMIs	39
3.5	CONTROLE FUZZY	40
3.6	CONTROLE NEURO-FUZZY	43
3.7	ESTIMADOR DE KALMAN	45
4	IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DINÂMICOS	46
4.1	REALIZAÇÃO DE SISTEMAS	46
4.2	ALGORITMO DE REALIZAÇÃO DE AUTOSSISTEMA – ERA	50
4.3	IDENTIFICAÇÃO COM OBSERVADOR/FILTRO DE KALMAN - OKID	54
4.4	CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE MARKOV	55
4.4.1	Parâmetros de Markov do sistema	56
4.4.2	Parâmetros de Markov do ganho do observador	58
5	METODOLOGIA	59
5.1	BANCADA EXPERIMENTAL	59
5.2	VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO	60
5.3	ATUADOR ELETROMAGNÉTICO	62
5.4	IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA	64
5.5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	65
5.6	CONTROLE EXPERIMENTAL	73
6	RESULTADOS	39
6.1	RESULTADOS NUMÉRICOS	76
6.1.1	Resultados numéricos controle Ótimo	77
6.1.2	Resultados numéricos controle Fuzzy	80
6.1.3	Resultados numéricos controle Neuro-Fuzzy	83

6.1.4	Comparativo dos resultados numéricos obtidos.....	87
6.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	89
6.2.1	Resultados experimentais controle Ótimo.....	89
6.2.2	Resultados experimentais controle Fuzzy.....	94
6.2.3	Resultados experimentais controle Neuro-Fuzzy.....	100
6.2.4	Comparativo dos resultados experimentais obtidos	105
7	CONCLUSÃO	109
	REFERÊNCIAS	111
	APÊNDICE A – BANCADA EXPERIMENTAL E COMPONENTES	121
	APÊNDICE B – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	124
B.1	Placa de aquisição.....	124
B.2	Acelerômetro	125
B.3	Condicionador de sinal	125
B.4	Servo-amplificador	126
B.5	Fonte de alimentação	127

1 INTRODUÇÃO

A vibração é definida por Rao (2008), como qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo. Este movimento oscilatório muitas vezes se torna indesejável em equipamentos e estruturas de processos industriais, uma vez que a presença de vibrações pode afetar o desempenho e funcionamento de equipamentos, e até mesmo resultar em um desgaste prematuro da estrutura.

Operadores expostos a vibração por um longo período de tempo, podem apresentar problemas relacionadas com a perda de equilíbrio, aumento da frequência cardíaca, distúrbios visuais e também a doença de Raynaud, conhecida por síndrome dos dedos brancos, doença na qual limita o fluxo sanguíneo nos dedos conforme a Figura 1.1 (CRONENWETT; JOHNSTON, 2016).



Figura 1.1 – Doença de Raynaud
Fonte: Curso Segurança do Trabalho (2013).

Um das técnicas para minimizar a presença da vibração indesejada, a fim de garantir a integridade estrutural e o desempenho mecânico de processos industriais, é o uso do controle ativo de vibrações, AVC (do inglês – *Active Vibration Control*), que nos últimos anos vem apresentando diversas aplicações nas áreas da engenharia.

Na literatura encontra-se a aplicação do controle ativos de vibrações em Mevada e Prajapati (2018) com aplicação do controle em uma viga inteligente, em

Ortega et al. (2018) com o controle de vibrações de rotores, em Nima Mahmoodi e Ahmadian (2010) com o controle de vibrações de estruturas aeroespaciais. Joana (2018) faz o uso do controle de vibrações para o controle de uma mesa de dois graus de liberdade, utilizando atuadores eletromagnéticos. Côrrea (2017) faz o uso do controle ativo de vibrações para o controle de um rotor flexível utilizando compensação distribuída paralela.

Um exemplo do uso deste controle é no helicóptero H130 da Helibras, apresentado na Figura 1.2, que utiliza o controle ativo de vibrações para anular a vibração da cabine do helicóptero. Para isto, fazem a utilização de acelerômetros para captar as amplitudes de vibração vindos do rotor, onde os sinais captados são analisados por um computador embarcado e este produz uma onda contrária, a fim de neutralizar as vibrações e gerar uma sensação de viagem estável e confortável para todos os passageiros (HELIBRAS, 2015).



Figura 1.2 – Helicóptero H130 da Helibras
Fonte: Helibras (2015).

Entre as técnicas conhecidas no controle ativo de vibrações, há três técnicas que vem apresentando grande eficiência na atenuação de vibração, sendo elas: o controle Ótimo, o controle *Fuzzy* e o controle *Neuro-Fuzzy*.

O controle Ótimo é por meio da aplicação do regulador linear quadrático, LQR (do inglês - *Linear Quadratic, Regulator*), que permite a inserção de incertezas via desigualdade matriciais lineares, o que resulta em um projeto de controle robusto. Em Xu, Li e Guo (2018) tem-se a aplicação do controle robusto para o controle de

vibrações de vigas com camadas piezelétricas, e em Higuera-Martínez e Salamanca (2015) para o controle de helicópteros de dois graus de liberdade.

O controle *Fuzzy* trabalha com informações inexatas através de informações linguísticas de especialistas humanos (CHEN, 2011), fornecendo assim uma estrutura de controle capaz de lidar com incertezas. A determinação dos parâmetros e das regras do controle *Fuzzy* pode não ser uma tarefa simples, e uma alternativa para solucionar este problema é a combinação da Lógica *Fuzzy* com o emprego das Redes Neurais Artificiais, surgindo assim, o controle *Neuro-Fuzzy*.

O controle *Neuro-Fuzzy* incorpora as vantagens das redes neurais, como a habilidade de aprendizagem e a otimização, com as vantagens da lógica nebulosa dos sistemas *Fuzzy* (SÁNCHEZ et al., 2012). Na literatura, encontra-se o uso do controlador *Neuro-Fuzzy* em diversas aplicações, como também no controle ativo de vibrações, como visto em Muradova, Tairidis e Stavroulakis (2017) com a aplicação do controle *Neuro-Fuzzy* para controle de vibrações de uma estrutura inteligente, e em Lin e Zheng (2012) para o controle de vibrações de uma treliça giratória piezelétrica inteligente. Colombo (2018) faz uso do controlador *Neuro-Fuzzy* para o controle de vibrações de uma mesa com um grau de liberdade.

Estas técnicas de controle apresentam 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 (REDDY, 1997).

Os materiais compósitos podem ser confeccionados de acordo com as necessidades mecânicas de projeto, permitindo a obtenção de estruturas mais leves e resistentes, ou combinações de propriedades mecânicas difíceis de serem obtidas nos materiais convencionais (PINHEIRO, BECKHAUSER, MENEZES, 2006).

No ramo da engenharia, os materiais compósitos têm tido sua aplicação em diversas áreas, com destaque nas indústrias aeroespaciais e automobilísticas, tendo como exemplo seu uso na confecção de fuselagens de aviões, na confecção de discos de freios em carros de formula-1 e em trens de alta velocidade. Também têm sido utilizados em sistemas de antenas, por apresentarem boas propriedades de reflexão, alta estabilidade dimensional e boa condutividade térmica (REZENDE; BOTELHO, 2000).

Para o estudo do comportamento dinâmico dos materiais compósitos, é necessária a obtenção do seu modelo matemático, o que pode se tornar algo complexo, pelo fato dos mesmos serem compostos pela combinação de dois ou mais materiais. Um dos métodos utilizados na modelagem de materiais compósitos é o método dos elementos finitos, que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. A desvantagem do método dos elementos finitos é a sua alta complexidade de implementação e o tempo requerido para o mesmo.

Um outro método alternativo na modelagem de materiais compósitos é o uso do método de identificação que utiliza o Algoritmo de Realização do Sistema com observador de estado/filtro de Kalman, conhecido como ERA/OKID (do inglês – *Eigensystem Realization Algorithm/Observer/Kalman Identification*). Este método é muito utilizado na identificação de sistemas de estruturas complexas, onde é capaz de determinar as matrizes do comportamento dinâmico da estrutura através de dados de entrada e saída do sistema (ALVES, 2005).

Neste contexto, este trabalho propõe a identificação de uma viga de material compósito, a partir do método ERA/OKID, para a aplicação de técnicas de controle ativo de vibrações por meio da utilização de atuadores eletromagnéticos, com o objetivo de analisar o comportamento da resposta dinâmica da viga, visando a atenuação de vibrações. Foram utilizadas três técnicas de controle, sendo elas: controle Ótimo, controle *Fuzzy* e controle *Neuro-Fuzzy*, a fim de obter uma avaliação do desempenho de cada controlador. Ainda para a análise da robustez dos controladores, foi analisado o comportamento dinâmico da estrutura com uma variação de -20 a +20% na matriz dinâmica. Para a validação da metodologia, foram realizados testes experimentais.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é desenvolver e aplicar o controle ativo de vibrações em uma viga de material compósito por meio dos controladores *Ótimo*, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*, e validar os resultados experimentalmente.

1.1.1 Objetivos específicos

- Identificar as matrizes do comportamento dinâmico do sistema através da técnica de identificação ERA/OKID.
- Projetar os controladores *Ótimo*, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*.
- Realizar procedimentos experimentais e analisar os resultados obtidos mediante simulações numéricas e experimentais.
- Analisar a robustez dos controladores mediante simulações numéricas e experimentais.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos por definição são ditos como materiais constituídos da associação de dois ou mais tipos de materiais distintos, visando a inclusão das características desejadas de cada tipo de material, em um só material. Sreekumar e Thomas (2008) definem materiais compósitos como materiais heterogêneos criados pela junção de dois ou mais componentes com o objetivo de obter propriedades e características específicas.

O uso de materiais compósitos é uma realidade atual nos setores de indústrias aeronáuticas e aeroespaciais, por esses materiais apresentarem um arranjo inovador, e serem caracterizados por sua leveza e resistência mecânica (GORBATIKH; WARDLE; LOMOV, 2016). Nas indústrias automobilísticas, o uso dos materiais compósitos gera a redução do peso do automóvel, aumentando assim seu desempenho e diminuindo o consumo de combustível e emissão de CO₂ (MACEDO et al., 2018) (FAN; NJUGUNA, 2016).

Exemplos das aplicações dos materiais compósitos no setor aeronáutico, são os aviões compostos de materiais compósitos em suas fuselagens. No início do século, o Boeing 787 foi o primeiro avião de grande porte com fuselagem totalmente em material compósito, sem rebites e placas metálicas. Logo, a Airbus para entrar em competitividade no mercado, seguiu a tendência com a fabricação do Airbus A350 XWB, este apresentado na Figura 1.1. O Airbus faz utilização do plástico reforçado com fibra de carbono, também conhecido como CFRP, na qual oferece uma relação-peso melhor que os metais e tem menos sensibilidade à fadiga e à corrosão (BARBOSA, 2012).



Figura 2.1 – Airbus A350 XWB
Fonte: Airbus (2015).

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

A estrutura dos materiais compósitos é classificada em dois tipos: matriz (fase contínua) e reforço (fase dispersa) (CHOUBEY; SUNEETHA; PANDEY, 2018) (TITA, 2006).

A fase matriz pode ser do tipo matriz metálica, polimérica ou cerâmica. No presente trabalho a viga de material compósito é composta pela resina epóxi, um tipo de matriz polimérica. A resina epóxi apresenta uma sucessão de propriedades, desde líquidos de baixa densidade até sólidos com alta temperatura de fusão (FINK, 2018). Ainda, segundo Abdel-Magid (2003) e Monteiro e D’Almeida (2018) os materiais compósitos com matriz epóxi apresentam uma maior estabilidade mecânica quando comparada com outros polímeros, tais como a poliuretana.

O reforço corresponde aos materiais provenientes das propriedades mecânicas, eletromagnéticas e químicas do material compósito. A fase dispersa existe em diversas formas, sendo usualmente conhecidos como: compósitos particulados, compósitos laminados e compósitos fibrosos, conforme ilustrado na Figura 2.2.

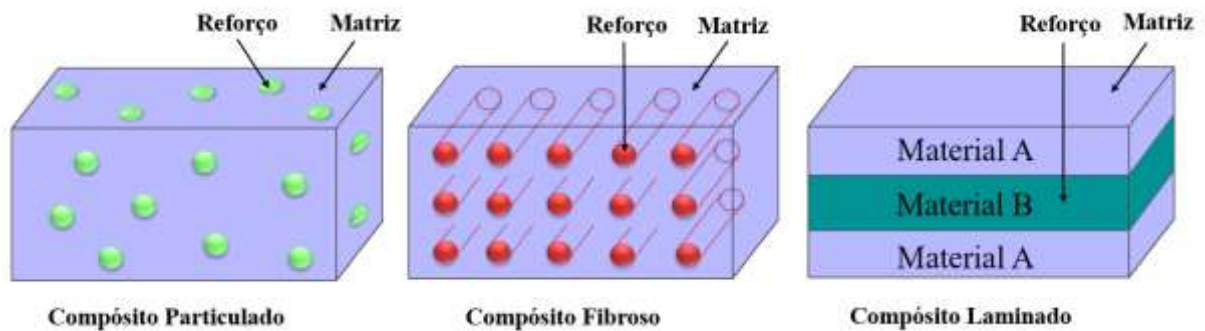


Figura 2.2 – Classificação dos materiais compósitos segundo sua fase dispersa: particulado, reforçado por fibras e estrutural laminado
Fonte: Adaptado de Callister e Rethwish (2010).

Callister Jr. e Rethwish (2010) classificam os compósitos de acordo com sua fase dispersa como: reforçados por partículas, reforçados por fibras e estruturais. Ainda há subdivisões em cada categoria e será ilustrado de forma esquemática na Figura 2.3 e detalhadas suas particularidades nas subseções a seguir.



Figura 2.3 – Esquema de classificação dos materiais compósitos
Fonte: Adaptado de Callister e Rethwish (2010).

2.1.1 Materiais compósitos reforçados por partículas

Os materiais compósitos reforçados por partículas são aqueles resultantes da

introdução de componentes que apresentam a razão de sua maior e menor dimensão menor que 3 (SALIBA JR., 2003). Na matriz polimérica, os agentes de reforços chamados de agentes de preenchimento ou *fillers*, são adicionados para melhorar propriedades do material, como rigidez, resistência abrasiva, amortecimento de vibrações, resistência a corrosão, dentre outras (FARIA, 2006).

Como visto na Figura 2.3, os compósitos reforçados por partículas são divididos em dois tipos: partículas grandes e reforçados por dispersão (nanopartículas), cujas características e vantagens são apresentadas, respectivamente em (KAMALBABU; KUMAR, 2014) e (KUNDIE; MUCHTAR, 2018).

Alguns exemplos da utilização dos materiais compósitos reforçados por partículas são a substituição do ferro fundido e do alumínio em máquinas ferramentas, em equipamentos de corte a laser, em máquinas e equipamentos médicos de precisão, dentre outros (PIRATELLI FILHO; LEVY NETO, 2003).

2.1.2 Materiais compósitos reforçados por fibras

Os materiais compósitos reforçados por fibras são caracterizados pela introdução de componentes que apresentam sua razão maior/menor dimensão maior que 3 (SALIBA JR., 2003) e podem ser divididas em duas categorias: as fibras contínuas e as fibras descontínuas. As fibras descontínuas possuem um comprimento de 5 a 25 [mm] de comprimento, enquanto as fibras contínuas são longas (MENDONÇA, 2005). Nos compósitos, as fibras usualmente utilizadas apresentam diâmetros entre 10 e 100 [μm] (SALIBA JR., 2003).

As fibras constituem de uma classe importante de reforço por proporcionarem um aumento da força da matriz, influenciando diretamente nas propriedades mecânicas. São usadas no reforço por possuírem resistências mecânicas elevadas, e também como agente sustentador de tensões que dissipam energia à frente das trincas, dando elevadas propriedades mecânicas aos compósitos (FARIA, 2006).

O desempenho de um material compósito reforçado com fibras pode ser avaliado pelo comprimento, forma, orientação e composição das fibras assim como pelas propriedades mecânicas apresentadas pela matriz. As propriedades dos

compósitos reforçados com fibras são influenciadas pelo arranjo das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e a sua distribuição. (VENTURA, 2009).

As fibras sintéticas são usualmente utilizadas na indústria, e seus principais tipos são: as fibras de vidro, as fibras de aramida e as fibras de carbono. As fibras de vidro é o tipo de fibra mais utilizado e a que apresenta menor custo no mercado. Já as fibras de aramida e carbono são caracterizadas por apresentarem alta resistência mecânica, baixa densidade e custos elevados. São usualmente utilizadas na indústria aeroespacial (VENTURA, 2009).

2.1.3 Materiais compósitos estruturais

Os compósitos estruturais são divididos em dois tipos, sendo eles: do tipo laminado e do tipo em sanduíche. O compósito do tipo laminado é constituído de sucessivas lâminas (camadas) ao longo da espessura de sua estrutura. Já os compósitos do tipo sanduíche, constituem de um tipo especial de composto, formado por um núcleo de baixa rigidez, sendo este feito de material leve com boas propriedades a compressão e por lâminas altamente resistentes à tração e anisotrópicas (BERTHELOT, 1992); (MENDONÇA, 2005). O núcleo dos materiais compósitos do tipo sanduíche, também conhecido por “alma” são classificados em dois tipos: almas cheias e almas vazias, e são ilustrados na Figura 2.4.

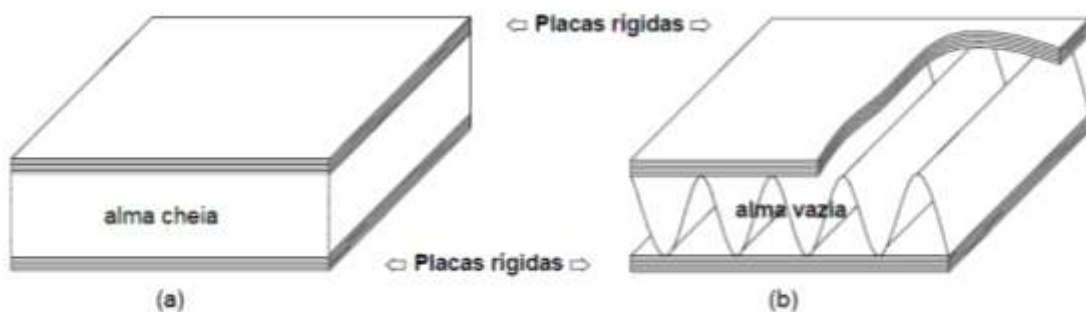


Figura 2.4 – Estrutura de sanduíche (a) alma cheia (b) alma vazia
Fonte: Faria (2006).

Em almas cheias os materiais mais utilizados são: madeiras celulares,

espumas celulares, plásticos, dentre outros. Já em almas vazias, os materiais utilizados são essencialmente em forma de colmeia de abelhas e perfis, sendo: ligas metálicas leves, papel Kraft, papel poliamida, dentre outros (FARIA, 2006).

Os compósitos estruturais têm vasta aplicação nos setores industriais, exemplos de algumas dessas aplicações são a moldagem por transferência de resina assistida a vácuo, VARTRM (do inglês - *Vaccum-Assisted Resina Transfer Molding*) e a moldagem por transferência de resina, RTM (do inglês - *Resin Transfer Molding*) (REZENDE; BOTELHO, 2000). Dentre outros setores industriais, destacam-se os setores da indústria automobilística, de materiais esportivos e na área aeroespacial.

2.2 MODELAGEM DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Para o estudo do comportamento dinâmico de um sistema formado por materiais compósitos, é preciso a obtenção de seu modelo matemático, o que consiste em construções simplificadas e abstratas que descrevem o comportamento de sistemas de interesse (OGATA, 2003).

Na literatura, um dos métodos conhecidos para obtenção do modelo matemático de materiais compósitos é o método de elementos finitos (FEM – do inglês *Finite Element Method*) junto a Teoria da Deformação Cisalhante de Ordem Superior (FSDT – do inglês *First-Order Shear Deformation Theory*). Diacenco (2010) utilizou o método de elementos finitos em conjunto com a Teoria da Deformação Cisalhante de Ordem Superior para a modelagem de materiais compósitos estruturais. Faria (2006) fez o uso do método de elementos finitos junto a Teoria da Deformação Cisalhante de Ordem Superior e a Teoria da Deformação de Terceira Ordem (HSDT – do inglês *Higher-Order Shear Deformation Theory*) para a modelagem de placas compostas dotadas de sensores e atuadores piezelétricos.

Dong et al. (2006) fez o uso da técnica de identificação que utiliza um observador/filtro de Kalman junto a ao algoritmo de Realização de Autossistema conhecido como ERA/OKID, para a identificação de estruturas inteligentes piezelétricas para o controle de vibrações da estrutura.

Diante das teorias mencionadas, o presente trabalho faz uso do método de identificação ERA/OKID para a identificação de uma viga de material compósito, esta

composta por matriz polimérica de resina epóxi, reforçada por fibras de vidro e tela de aço 1045. A teoria do método de identificação ERA/OKID é apresentada na Seção 4 deste trabalho.

A obtenção do modelo matemático da viga é necessária para o projeto e aplicação das técnicas de controle ativo de vibrações na viga de material compósito. As teorias das respectivas técnicas de controle serão mencionadas nas seções 3.4, 3.5 e 3.6.

3 TEORIA DE CONTROLE

O controle moderno se tornou uma tecnologia essencial no ambiente industrial, no qual otimiza os processos industriais por meio das técnicas de controle modernas combinadas com o uso de sensores e atuadores.

Segundo Repinaldo (2018), a técnica de controle consiste em obter os dados da saída do sistema, por meio de sensores. Com estes dados, o controlador toma as decisões necessárias, comparando as saídas com um valor pré-definido e envia os comandos necessários ao atuador, o qual ajusta uma ação para correção do erro com o intuito de melhorar o desempenho do sistema e obter uma variável de saída o mais próximo possível do desejado.

Diante deste contexto, este capítulo dedica-se a apresentação da teoria dos controles utilizados no presente trabalho, sendo eles: o controle Ótimo, o controle *Fuzzy* e o controle *Neuro-Fuzzy*.

3.1 SISTEMAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle são classificados em dois tipos fundamentais: os sistemas de controle de malha aberta e os sistemas de controle de malha fechada. Ogata (2003) apresenta a distinção detalhada desses dois tipos de malha de controle.

Para os sistemas de controle de malha aberta, o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle sobre o sistema, ou seja, em um sistema de controle de malha aberta o sinal de saída não é realimentado para a comparação com a entrada. Para obter a resposta desejada este tipo de controle utiliza um atuador, como mostra a Figura 3.1.



Figura 3.1 - Sistema de controle de malha aberta
Fonte: Adaptado de Ogata (2003).

Já os sistemas de controle de malha fechada, também conhecido como sistema de controle com realimentação (*feedback*), o sinal de erro, obtido pela diferença entre o sinal de entrada e o de realimentação, realimenta o controlador, o qual atua sobre o sistema visando a minimização deste erro. Este tipo de controle é ilustrado pela Figura 3.2.



Figura 3.2 - Sistema de controle de malha fechada com retroação
Fonte: Adaptado de Ogata (2003).

3.2 ESPAÇO DE ESTADOS

Para o projeto de controladores é essencial o uso do modelo em espaços de estados, uma vez que os ganhos dos controladores são calculados a partir das matrizes associadas a equação do movimento do sistema a ser controlado (OGATA, 2003). A representação em espaço de estados de um sistema linear invariante no tempo, é apresentada na Equação (3.1) e Equação (3.2):

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (3.1)$$

$$\{y(t)\} = [C]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} \quad (3.2)$$

onde $\{x(t)\}$ ao vetor de estados, $[A]$ a matriz dinâmica $n \times n$, $[B]$ a matriz de entrada $n \times m$, $[C]$ a matriz de saída $s \times n$, $[D]$ a matriz de perturbação, $\{u(t)\}$ ao vetor de entrada, e $\{y(t)\}$ o vetor de saída, em que n é a ordem do sistema, m o número de entradas e s o número de saídas.

3.3 CONTROLABILIDADE E OBSERVABILIDADE

No projeto de sistemas de controle, os conceitos de controlabilidade e observabilidade têm um papel importante, onde os mesmos podem determinar a existência de uma solução completa para o problema de projeto do sistema de controle, onde a solução do problema pode não existir, caso o sistema seja não controlável.

Um sistema dinâmico pode ser classificado como um dos quatro sistemas apresentados pela Figura 3.3, a partir dos conceitos de controlabilidade e observabilidade.

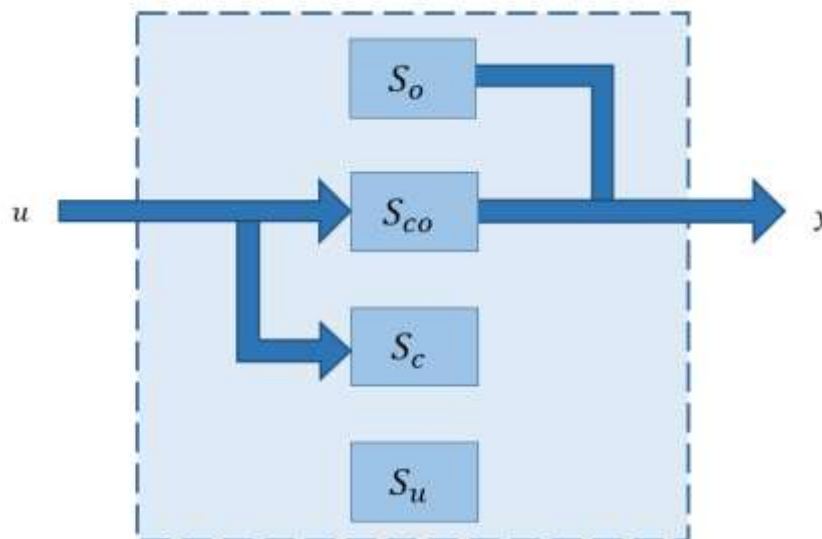


Figura 3.3 - Quatro divisões possíveis de um sistema
 Fonte: Adaptado de Koroishi (2013).

A partir da Figura 3.3, pode-se classificar o sistema em 4 tipos:

S_o = subsistema completamente observável e não controlável;

S_{co} = subsistema completamente controlável e observável;

S_c = subsistema completamente controlável e não observável;

S_u = subsistema completamente não controlável e não observável;

3.3.1 Controlabilidade

Seja o sistema apresentado pelas Equações (3.1) e (3.2), o sistema é dito controlável se, para qualquer que seja o instante inicial, seja possível transferir todo estado inicial para qualquer estado final $\{x(t)\}$ por intermédio de um vetor de excitação (MEIROVITCH, 1990).

Para analisar a controlabilidade de um sistema, é realizada a análise do posto da matriz de controlabilidade, obtida pela Equação (3.3):

$$[Q_k] = \begin{bmatrix} [B] & [A][B] & [A]^2[B] & \cdots & [A]^{k-1}[B] \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

sendo $[Q_k]$ a matriz de controlabilidade.

Para o sistema ser controlável é necessário apresentar a condição apresentada pela Equação (3.4).

$$\text{rank}([Q_k]) = n \quad (3.4)$$

Assim, as matrizes $[A]$ e $[B]$ são ditas controláveis.

3.3.2 Observabilidade

Seja um sistema representado pela Equação (3.1) e (3.2), o sistema é dito completamente observável se todo estado inicial pode ser determinado exatamente a partir da resposta $\{y(t)\}$ durante um intervalo de tempo finito $t_0 \leq t \leq t_f$ (MEIROVITCH, 1990). A partir dessa afirmação, pode-se observar que todas as variáveis $\{x(t)\}$ influenciam na resposta $\{y(t)\}$.

Para analisar a observabilidade de um sistema é, necessário calcular sua matriz de observabilidade, obtida pela Equação (3.5):

$$[P_k] = \begin{bmatrix} [C] \\ [C][A] \\ [C][A]^2 \\ \vdots \\ [C][A]^{k-1} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

sendo $[P_k]$ a matriz de observabilidade.

Para o sistema ser observável é preciso apresentar a condição da Equação (3.6).

$$\text{rank}([P_k]) = n \quad (3.6)$$

Neste caso, o par de matrizes $([A], [C])$ é dito observável.

3.4 CONTROLE ÓTIMO

No presente trabalho, o controle Ótimo faz o uso do regulador linear quadrático via desigualdades matriciais lineares. Nas seções 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3 são apresentadas as teorias do regulador linear quadrático junto a teoria das desigualdades matriciais lineares.

3.4.1 Regulador Linear Quadrático

O regulador linear quadrático (LQR - do inglês *Linear Quadratic Regulator*) tem grande importância no controle dinâmico multivariável. Ele é a base nos desenvolvimentos recentes de controle de sistemas lineares MIMO. Na literatura, são encontrados diversos trabalhos com o uso do LQR para o controle vibrações de estruturas. Mohammed e Wasmi (2018) fizeram o uso do controle Ótimo para o controle de vibrações de uma viga engastada-livre. Chen, Zheng e Wang (2012) fez o uso do regulador linear quadrático junto a atuadores piezelétricos distribuídos de

forma descontínua para o controle de vibrações de uma viga. Koroishi et al. (2015) utilizou o controle robusto com a inserção de incertezas via desigualdades matriciais lineares para o controle de máquinas rotativas.

Para sistemas em malha fechada, o LQR 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 (SIMÕES, 2006). O esforço de controle obtido por realimentação de estados é dado pela Equação (3.7):

$$\{u(t)\} = -[K]\{x(t)\} \quad (3.7)$$

onde o ganho $[K]$ é determinado com a minimização do desempenho dado pela Equação (3.8):

$$J = \int_0^{\infty} (\{x(t)\}^T [Q_{lqr}] \{x(t)\} + \{u(t)\}^T [R_{lqr}] \{u(t)\}) dt \quad (3.8)$$

onde $[Q_{lqr}]$ é uma matriz hermitiana definida positiva (ou semi-definida positiva) ou real simétrica das cargas de cada estado e $[R_{lqr}]$ é uma matriz hermitiana definida positiva ou real simétrica do consumo de energia dos sinais de controle (ASSUNÇÃO; TEIXEIRA, 2001).

3.4.2 Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs)

O uso das Desigualdades Matriciais Lineares (LMI do inglês – *Linear Matrix Inequality*) 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 diferentes aplicações, como o controle ótimo e o controle robusto (VAN ANTWERP; BRAATZ, 2000) (SILVA; LOPES; ASSUNÇÃO, 2004).

A teoria de LMIs surgiu por volta de 1890, a partir da tese de doutorado de Aleksandr Mihailovich Lyapunov, surgindo assim o Teorema de Lyapunov (BOYD et al., 1994).

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 (3.9) é estável, se e somente se, existir uma matriz positiva P_{lmi} , que atenda a condição dada pela Equação (3.10), conhecida como desigualdade de Lyapunov.

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} \quad (3.9)$$

$$[A]^T [P_{lmi}] + [P_{lmi}] [A] > 0 \quad (3.10)$$

3.4.3 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). Bueno (2007) fez o uso do LQR via LMIs para o controle de vibrações de estruturas mecânicas com atuadores e sensores acoplados. Bueno (2007) mostra que o problema LQR via LMI, se dá a partir da minimização do índice de desempenho, e é descrito pela Equação (3.11):

$$\min_{X, P_{lmi}, X_{lmi}} tr\left(\begin{bmatrix} Q_{lqr} & \\ & P_{lmi} \end{bmatrix}\right) + tr\left(\begin{bmatrix} X_{lmi} \end{bmatrix}\right) + tr\left(\begin{bmatrix} Y_{lmi} \end{bmatrix} N\right) + tr\left(\begin{bmatrix} N_r \end{bmatrix}^T Y_{lmi}^T\right) \quad (3.11)$$

onde N_r corresponde a inserção de ruído, $[X_{lmi}]$ e $[Y_{lmi}]$ as soluções das LMIs denotadas na matriz, e $tr()$ ao traço da matriz. A Equação (3.11) é sujeita a condições impostas pelas Equações (3.12) e (3.13):

$$[A][P] - [B][Y_{lmi}] + [P][A]^T - [Y_{lmi}]^T [B]^T + [B_w][B_w]^T < 0 \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} [X_{lmi}] & [R_{lqr}]^{1/2}[Y_{lmi}] \\ [Y_{lmi}][R_{lqr}]^{1/2} & [P_{lmi}] \end{bmatrix} > 0 \quad (3.13)$$

sendo B_w a matriz de perturbação.

Para se obter o ganho do controlador utiliza-se a Equação (3.14).

$$[G] = [Y][P_{lmi}]^{-1} \quad (3.14)$$

3.5 CONTROLE FUZZY

A teoria de conjuntos *Fuzzy* e os conceitos da Lógica *Fuzzy* foram apresentados por Zadeh (1965), que tem por finalidade o estudo dos princípios formais de raciocínio aproximado. Ela propõe o uso de valores intermediários na faixa de zero até um, ao invés do uso desses dois valores apenas, com preposições de verdadeiro ou falso. Essa variação de zero até um, representa a variação entre a completa falsidade e a verdade absoluta (ARTERO, 2009).

Na literatura, encontra-se o uso da Lógica *Fuzzy* em diversas áreas, como na área do controle ativo de vibrações. Ma et al. (2018) utilizou o controle *Fuzzy* para o controle de vibrações em uma estrutura engastada-livre com o uso de atuadores piezelétricos. Li et al. (2015) também fez o uso do controle *Fuzzy* para o controle de vibrações de estruturas inteligentes.

No controlador *Fuzzy* existem dois processos de grande importância, sendo eles: a fuzzificação e a defuzzificação. A fuzzificação tem a finalidade da conversão dos valores absolutos do processo para um conjunto de valores nebulosos, usando um gerador de entradas para um mecanismo de inferência. A defuzzificação é necessária para a transformação do valor *Fuzzy* em um valor real, para assim obter a resposta desejada nos sistemas reais.

A estrutura do controlador *Fuzzy* é apresentada na Figura 3.4.

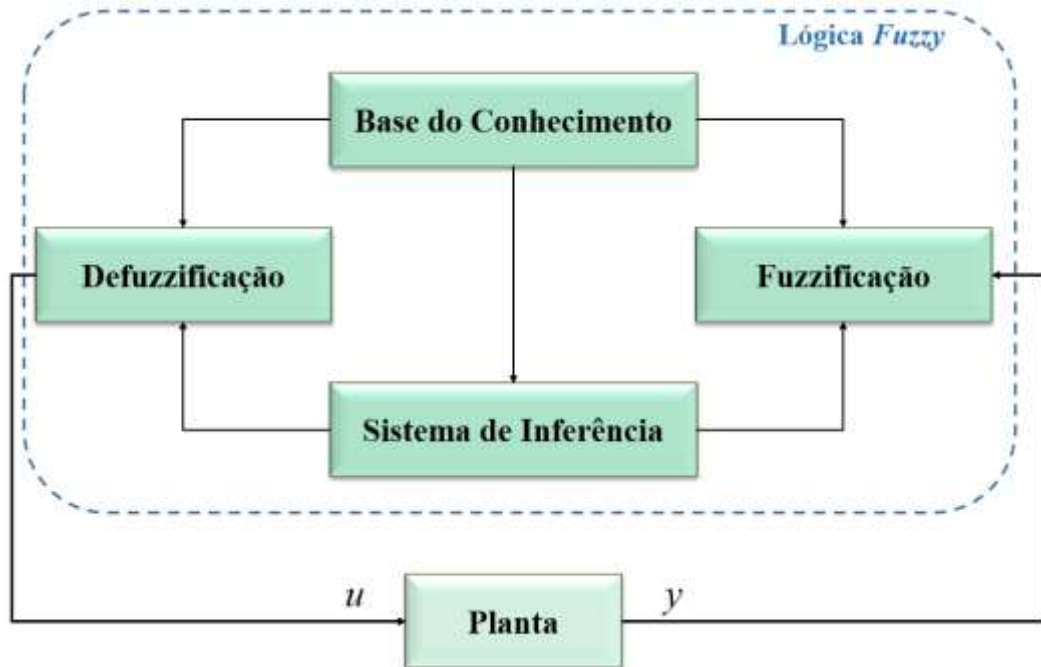


Figura 3.4 – Estrutura controlador *Fuzzy*
 Fonte: Adaptado de Passino e Yurkovich (1998).

A fuzzificação dos sinais de entrada do controlador, é a primeira etapa no presente sistema de controle.

As funções de pertinência indicam o quanto o elemento pertence a tal conjunto. As funções de pertinência podem ser do tipo triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoide, função de *bell* e entre outras. No presente trabalho, é utilizada a função de pertinência *gbell* do software Matlab® e os sinais de entrada do controlador *Fuzzy* são os sinais de deslocamento e velocidade.

Considerando os sinais de entrada como $\{X_i(t)\}$, a relevância de cada variável das funções “positiva” e “negativa”, é dada pela Equação (3.15):

$$\mu_A(X_i(t)) = \frac{1}{1 + \left| \frac{X_i(t) - c_f}{a_f} \right|^{b_f}} \quad (3.15)$$

onde a_f , b_f e c_f são parâmetros da função *gbell*.

A base de conhecimento, conforme a Figura 3.4, é responsável por relacionar as variáveis do controlador, e é onde encontra-se a base de dados e a base de regras do controlador *Fuzzy*.

A base de dados contém as informações a respeito das funções de pertinência das variáveis envolvidas, enquanto que a base de regras é proveniente dos conjuntos de regras de controle na forma de expressões linguísticas (ROSS, 2010).

As regras de controle são aquelas que ditam a ação de controle a ser aplicada no sistema.

O sistema de inferência *Fuzzy* é a etapa na qual as regras do controlador *Fuzzy* são utilizadas para simular as tomadas de decisão a partir das regras impostas. Os métodos de inferência *Fuzzy* conhecidos são: Mamdani e Takagi-Sugeno.

Na literatura, encontra-se o estudo e aplicação de ambos métodos de inferência, como em Talekar, Bhanuse e Kulkarni (2017) que fazem uma análise comparativa do uso dos dois métodos de inferência para o controle de uma viga com fissura, em Milhor (2008) que propõe o uso do controlador difuso Takagi-Sugeno para a regulação da marcha lenta em motores de ciclo Otto, e em Chiu e Chang (2011) que desenvolveram o algoritmo de controlador difuso do tipo Mamdani para o controle de um dicitelo, também conhecido como *segway*.

No presente trabalho, utilizou-se o método de Takagi-Sugeno, visto que apresenta uma boa adaptação ao controle computacional em tempo real. A função é representada na Equação (3.16):

$$z_i = \alpha_i \{x\} + \beta_i \{\dot{x}\} + r_i \quad (3.16)$$

onde α_i corresponde as cargas atribuídas ao deslocamento e β_i as cargas atribuídas a velocidade, ambas do modo i , sendo i o número de modos de vibrar.

O esforço de controle do modo i da saída do controlador é representado na Equação (3.17).

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^2 w_j z_j}{\sum_{j=1}^2 w_j} \quad (3.17)$$

O próximo passo após o sistema de inferência, é a defuzzificação. Nesta etapa, o valor da variável linguística do conjunto de inferência *Fuzzy* é transformado em uma saída numérica.

3.6 CONTROLE *NEURO-FUZZY*

O sistema *Neuro-Fuzzy* baseia-se na arquitetura denominada Sistema de Inferência Adaptativo Neuro-Difuso (ANFIS) desenvolvida por Jang e Sun (1995), a qual consiste na previsão e aproximação de funções a partir de dados de entradas, do tipo, do número das funções de pertinência e dos dados de saída, a fim de otimizar os parâmetros da Lógica *Fuzzy*.

Na literatura, Kherraz, Hamermain e Achour (2015) utilizou o sistema *Neuro-Fuzzy* para o controle e manipulação de um robô flexível, Couzon e Der Hagopian (2007) utilizaram o sistema *Neuro-Fuzzy* para o controle de vibrações de um rotor suspenso. Repinaldo (2018) utilizou o controle *Neuro-Fuzzy* para a atenuação de vibrações de um sistema de 2 graus de liberdade.

Jang (1993) propôs um Sistema de Inferência *Neuro-Fuzzy* Adaptativo, ANFIS (do inglês – *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*), que consiste em uma rede neural artificial composta por multicamadas, interligadas através de pesos, conexões unidirecionais e aprendizado supervisionado. As camadas constituem cada etapa de processamento, até a obtenção da saída análoga e desejada.

O funcionamento da arquitetura ANFIS é exemplificado na Figura 3.5. O modelo esquemático, apresentado pela Figura 3.5, considera duas variáveis de entrada, x e y , uma variável de saída, f , e 5 camadas de neurônios. O sistema de inferência adotado é do tipo Takagi-Sugeno e as funções de pertinências são do tipo *gbell*.

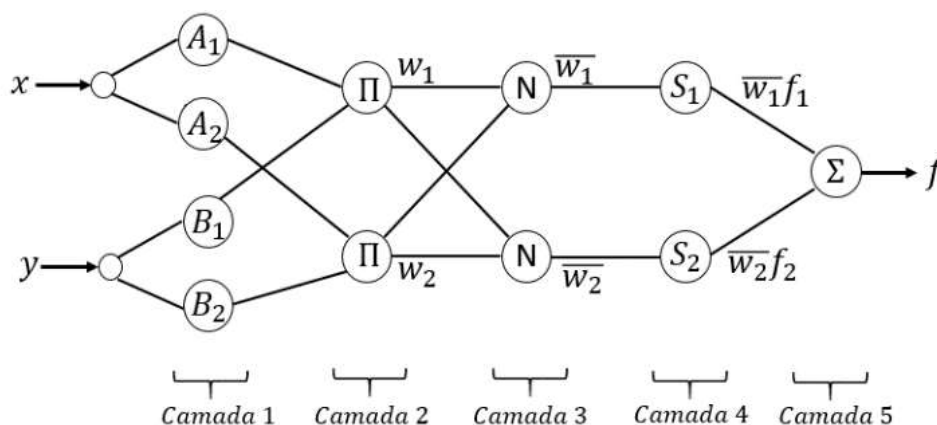


Figura 3.5 – Arquitetura ANFIS

Fonte: Jang e Sun (1995).

Na camada 1 calcula-se o grau de pertinência das entradas x e y (deslocamento e velocidade) baseada na função de pertinência escolhida, conforme a Equação (3.18).

$$\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(x), \quad i = 1, 2 \quad (3.18)$$

Na camada 2, cada neurônio executa a operação de interseção entre as funções de pertinência, conforme a Equação (3.19), resultando no grau de aplicabilidade (w_i) de uma regra.

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(x), \quad i = 1, 2 \quad (3.19)$$

Na camada 3 são realizadas as normalizações das funções de pertinência. Calcula-se a razão entre a aplicabilidade da i -ésima regra e o somatório das aplicabilidades de todo o sistema de regras em cada nó. As saídas dos nós desta camada são calculadas, conforme a Equação (3.20).

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (3.20)$$

Na camada 4 encontra-se os parâmetros consequentes da regra com função de ativação. Admitindo que os valores f_1 e f_2 correspondem aos parâmetros a serem ajustados (combinações lineares das entradas), tem-se a Equação (3.21).

$$\begin{aligned} f_1 &= p_1x + q_1y + r_1 \\ f_2 &= p_2x + q_2y + r_2 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Na camada 5, o nó calcula a saída do sistema e juntamente com os nós das camadas 3 e 4, promove a defuzzificação ou a soma total de todos os sinais de entrada, conforme a Equação (3.22).

$$\sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad i = 1, 2 \quad (3.22)$$

Os parâmetros de cada camada de neurônios são atualizados de acordo com dados de treinamento e do procedimento de aprendizagem. A regra de aprendizagem do tipo híbrida, combina o método de gradiente descendente nos parâmetros antecedentes com o método dos mínimos quadrados para estimar ou identificar parâmetros consequentes.

3.7 ESTIMADOR DE KALMAN

O estimador de Kalman tem a função de determinar os estados modais utilizados pelo controlador. Para sua aplicação, os modelos precisam estar descritos na forma de espaço de estados. É utilizado quando se deseja minimizar os efeitos de ruídos nos sinais de entrada e saída do sistema, e também para estimar os estados e saídas do sistema (WELCH; BISHOP, 1995).

O Estimador de Kalman é representado na Equação (3.23):

$$\{\dot{x}_r(t)\} = [A_r]\{x_r(t)\} + [B_r]\{u(t)\} + [L]\{\delta(t) - \bar{\delta}(t)\} \quad (3.23)$$

onde $\{x_r(t)\}$ é o vetor de estado reduzido, $\{u_r(t)\}$ o vetor de entrada reduzido, $[A_r]$ a matriz dinâmica reduzida rxr , $[B_r]$ a matriz de entrada reduzida rxm , $[L]$ a matriz de ganho, determinada através do comando “lqe.m” no software Matlab®, $\delta(t)$ é o vetor de deslocamento e $\bar{\delta}(t)$ o vetor de deslocamento estimado.

As matrizes reduzidas apresentadas na Equação (3.23), foram obtidas através da realização balanceada, que consiste em uma técnica de redução de modelos. Diante disto, a teoria de realização de sistemas é apresentada na Seção 4.2.

4 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DINÂMICOS

Para a compreensão dos fenômenos físicos de um sistema dinâmico, sob condições de contorno estabelecidas, é necessário a obtenção do seu modelo matemático. Esta representação matemática é obtida através de métodos de identificação de sistema dinâmico.

Os estudos em engenharia visando a identificação de sistemas dinâmicos têm apresentado grande desenvolvimento nos últimos anos, onde os algoritmos de identificação têm se tornado cada vez mais precisos, e atendendo cada vez mais as diversas áreas da engenharia.

Na literatura, uns dos métodos de identificação utilizados na modelagem de sistemas mecânicos é o método de elementos finitos. Como mencionados na Seção 2.4, o método de elementos finitos em conjunto com a FSDT é usado na modelagem de materiais compósitos, como visto em Diacenco (2010) e em Faria (2006), que ainda faz o uso da HSDT. Ainda na literatura, encontra-se o algoritmo de identificação ERA/OKID, usado tanto para a identificação de estruturas compósitas inteligentes, como visto em Dong, Peng e Meng (2006), quanto para a identificação de uma espaçonave em órbita, visto em Xie, Liu e Cai (2018).

A realização de sistemas, consiste na descrição do modelo do sistema na forma de espaço de estados. Os métodos no domínio do tempo para identificação de parâmetros modais são baseados na matriz função de transferência, que fornece os parâmetros de Markov (ALVES, 2005). Através dos parâmetros de Markov é possível a construção da matriz de Hankel, a qual é a base para a realização do modelo em espaço de estados.

4.1 REALIZAÇÃO DE SISTEMAS

A teoria e os conceitos da realização têm grande importância na identificação de sistemas. Nela se dá a descrição do modelo do sistema na forma de espaço de estados, combinando-o com as matrizes de controlabilidade e de observabilidade para cada gramianianos de controlabilidade e observabilidade do sistema.

O sistema linear das Equações (3.1) e (3.2) é representado no domínio do tempo discreto, segundo as Equações (4.1) e (4.2).

$$\{x(k+1)\} = [A]\{x(k)\} + [B]\{u(k)\} \quad (4.1)$$

$$\{y(k)\} = [C]\{x(k)\} + [D]\{u(k)\} \quad (4.2)$$

Tais equações, são utilizadas para determinar a resposta do sistema para qualquer entrada.

Considerando o sistema discreto das Equações (4.1) e (4.2), aplica-se sobre o sistema uma entrada impulsiva $u = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$, sob condições iniciais nulas, ou seja, $x(0) = 0$ (ALVES, RIBEIRO, 2004), logo têm-se as Equações (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), que resulta na Equação (4.7).

$$k = 0 \Rightarrow \begin{cases} \{x(1)\} = [A]\{x(0)\} + [B]\{u(0)\} = [B] \\ \{y(0)\} = [C]\{x(0)\} + [D]\{u(0)\} = [D] \end{cases} \quad (4.3)$$

$$k = 1 \Rightarrow \begin{cases} \{x(2)\} = [A]\{x(1)\} + [B]\{u(1)\} = [A][B] \\ \{y(1)\} = [C]\{x(1)\} + [D]\{u(1)\} = [C][B] \end{cases} \quad (4.4)$$

$$k = 2 \Rightarrow \begin{cases} \{x(3)\} = [A]\{x(2)\} + [B]\{u(2)\} = [A]^2 [B] \\ \{y(2)\} = [C]\{x(2)\} + [D]\{u(2)\} = [C][A][B] \end{cases} \quad (4.5)$$

$$k = 3 \Rightarrow \begin{cases} \{x(4)\} = [A]\{x(3)\} + [B]\{u(3)\} = [A]^3 [B] \\ \{y(3)\} = [C]\{x(3)\} + [D]\{u(3)\} = [C][A]^2 [B] \end{cases} \quad (4.6)$$

$$k = \dots \Rightarrow \begin{cases} \{x(k+1)\} = [A]\{x(k)\} + [B]\{u(k)\} = [A]^k [B] \\ \{y(k)\} = [C]\{x(k)\} + [D]\{u(k)\} = [C][A]^{k-1} [B] = [Y_k] \end{cases} \quad (4.7)$$

Sendo u o sinal de excitação, e y o sinal medido, tem-se a expressão para resposta impulsiva Y , representada pela Equação (4.8).

$$[Y_0] = [D], \quad [Y_1] = [C][B], \quad [Y_2] = [C][A][B], \quad \dots, \quad [Y_k] = [C][A]^{k-1}[B] \quad (4.8)$$

A sequência de matrizes apresentadas pela Equação (4.8) é conhecida como matrizes dos Parâmetros de Markov. Conforme Alves (2005), os parâmetros de Markov são usados como base para a identificação de modelos discretos no domínio do tempo, representados pelas matrizes constantes $[A]$, $[B]$, $[C]$ e $[D]$. Como $[Y_0] = [D]$, apenas as matrizes $[A]$, $[B]$, $[C]$ precisam ser determinadas na identificação.

Na prática a obtenção dos parâmetros de Markov se dá a partir da montagem da matriz da Equação (4.9). Tal construção da matriz $[Y_k]$ é fundamental para a implementação computacional do método de identificação.

$$[Y_k] = \begin{bmatrix} y_k^{(1,1)} & y_k^{(1,2)} & \dots & y_k^{(1,j)} \\ y_k^{(2,1)} & y_k^{(2,2)} & \dots & y_k^{(2,j)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_k^{(i,1)} & y_k^{(i,2)} & \dots & y_k^{(i,j)} \end{bmatrix}_{m \times r} \quad (4.9)$$

onde m e r são respectivamente os números de saídas e entradas, sendo $i = 1, \dots, m$ e $j = 1, \dots, r$. Assim, cada linha representa i -ésima saída, e cada coluna a j -ésima entrada.

Assim pode-se dizer que realização é o processo de construção do modelo discreto, na forma apresentada pelas Equações (4.1) e (4.2), em espaços de estados a partir de dados experimentais (JUANG; PAPPA, 1985).

A realização de sistemas pode ser obtida através da matriz de Hankel, onde esta é composta pelos parâmetros de Markov. A Equação (4.10) apresenta a matriz de Hankel, cuja dimensão é $\alpha m \times \beta r$:

$$[H(k-1)] = \begin{bmatrix} Y_k & Y_{k+1} & \dots & Y_{k+\beta-1} \\ Y_{k+1} & Y_{k+2} & \dots & Y_{k+\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k+\alpha-1} & Y_{k+\alpha} & \dots & Y_{k+\alpha+\beta-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [C][A]^{k-1}[B] & [C][A]^k[B] & \dots & [C][A]^{k+\beta-2}[B] \\ [C][A]^k[B] & [C][A]^{k+1}[B] & \dots & [C][A]^{k+\beta-1}[B] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [C][A]^{k+\alpha-2}[B] & [C][A]^{k+\alpha-1}[B] & \dots & [C][A]^{k+\alpha+\beta-3}[B] \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

onde $[H]$ é a matriz de Hankel, α o parâmetro que compõe o número de linhas e β o número que compõe o número de colunas.

Sendo n o número de ordem do sistema, e $\alpha \geq n$ e $\beta \geq n$, a matriz de Hankel $H(k-1)$ apresenta posto n , comprovado através da Equação (4.11).

$$[H(k-1)] = [P_\alpha][A]^{k-1}[Q_\beta] \quad (4.11)$$

Como a ordem do sistema é n , a mínima dimensão em que a matriz $[A]$ apresenta é $n \times n$. E também se o sistema é controlável e observável, suas matrizes de controlabilidade e observabilidade tem posto n . Consequentemente a matriz de Hankel tem posto n .

A realização mínima do sistema, é a menor dimensão possível em espaço de estados do sistema, entre todos os sistemas realizáveis. É assintoticamente estável se os gramianos de controlabilidade e de observabilidade são iguais e diagonais (ZHOU; DOYLE, 1998). Desta forma, as realizações mínimas apresentam o mesmo grupo de autovalores.

Adotando uma matriz $[A]$ de ordem n , onde se tem $(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n)$ como o grupo de autovetores linearmente independentes e $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ como o grupo de autovalores. A matriz diagonal de autovalores $[\Lambda]$ e matriz de autovetores $[\Psi]$ são apresentadas nas Equações (4.12) e (4.13).

$$[\Lambda] = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (4.12)$$

$$[\Psi] = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n] \quad (4.13)$$

Desta forma, tem-se que a realização $[A, B, C]$ pode ser transformada para a realização $[\Lambda, \Psi^{-1}B, C\Psi]$. Onde na matriz diagonal $[\Lambda]$ tem-se os amortecimentos modais e frequências naturais amortecidas, na matriz $[\Psi]^{-1}[B]$ contém a amplitude modal inicial e na matriz $[C][\Psi]$ tem-se a forma dos modos nos pontos de sensores. Com as informações que a realização $[\Lambda, \Psi^{-1}B, C\Psi]$ engloba, todos os parâmetros modais de um sistema dinâmico podem ser identificados.

A partir deste ponto é necessário a transformação do modelo discreto para o modelo contínuo, uma vez que, os amortecimentos modais e as frequências naturais amortecidas desejadas estão contidas nas partes real e imaginárias da matriz de autovalores no domínio contínuo.

Para a transformação do modelo discreto para o modelo contínuo utiliza-se a relação apresentada pela Equação (4.14):

$$[\Lambda_c] = \frac{\ln(\Lambda)}{\Delta t} \quad (4.14)$$

onde $[\Lambda_c]$ é a matriz diagonal de autovalores no domínio contínuo.

A transformação apresentada na Equação (4.14) pode assumir diferentes valores, visto que a parte imaginária de um logaritmo natural de um número complexo pode ser ajustada através da adição de qualquer número múltiplo de 2π . Consequentemente, quaisquer duas frequências distintas de múltiplo de $2\pi/\Delta t$ não podem ser distinguidas quando observadas no tempo de amostragem. Assim, na prática é necessário um intervalo de tempo de amostragem pequeno ou a utilização de um filtro, a fim de interpretar as frequências do sistema físico.

4.2 ALGORITMO DE REALIZAÇÃO DE AUTOSSISTEMA – ERA

O Algoritmo de Realização de Autossistema (do inglês – *Eigensystem Realization Algorithm*), conhecido como ERA, foi desenvolvido por Juang e Pappa (1985), a fim de atender a engenharia aeroespacial, ramo da engenharia em que se tem estruturas e sistema bastante complexos.

O ERA é um algoritmo de identificação, onde o mesmo determina as matrizes que representam o comportamento dinâmico do sistema em espaço de estados. Para tal feito, é necessário apenas dados de entrada e de saída do sistema. O ERA pode também ser empregado para redução de modelos dinâmicos e no projeto de controladores.

O Algoritmo de Realização de Autossistema é bastante empregado no estudo de estruturas mecânicas. Inicialmente teve sua aplicação em estruturas aeroespaciais por Juang e Pappa (1985). Yamaguchi, Kida e Kasai (1995) utilizou o ERA para a identificação modal de uma estrutura espacial em órbita. Ainda na área aeroespacial tem-se aplicações como Lim, Phan e Longman (1998), Szibor e Marques (2003), Rebolho, Belo e Marques (2014). Há também aplicações em sistemas vibratórios

como Salazar (2000), Alves e Ribeiro (2004), Abreu et al. (2012) e Yao e Jaiman (2017). Na área de engenharia civil tem-se aplicações como Lus et al. 2002 e Yang et al. (2019). Na área de materiais compósitos tem o estudo de Moaveni, Conte e Callafon (2008), no qual o mesmo utiliza do ERA para identificar parâmetros modais da viga compósita em seus estados danificados.

A formulação básica do ERA se dá inicialmente com a decomposição da matriz de Hankel, esta apresentada na Equação (4.10), usando a decomposição de valores singulares, assim tem-se a Equação (4.15):

$$[H(0)] = [R][\Sigma][S]^T \quad \text{para } k = 1 \quad (4.15)$$

onde as matrizes $[R]$ e $[S]$ são as matrizes resultantes da decomposição da matriz $[H]$ e suas colunas são ortonormais. A matriz $[\Sigma]$ também é uma matriz resultante da decomposição da matriz de Hankel e é uma matriz retangular, conforme as Equações (4.16) e (4.17):

$$[\Sigma] = \begin{bmatrix} \Sigma_n & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$[\Sigma_n] = \text{diag}[\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \sigma_{i+1}, \dots, \sigma_n] \quad (4.17)$$

em que $\sigma_i = (1, 2, \dots, n)$, logo $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_i \geq \sigma_{i+1} \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$.

Considerando as matrizes $[R_n]$ e $[S_n]$, compostas pelas n primeiras colunas das matrizes $[R]$ e $[S]$, pode-se definir a matriz $[H(0)]$ conforme a Equação (4.18).

$$[H(0)] = [R_n][\Sigma_n][S_n]^T \quad (4.18)$$

Como as matrizes $[R]$ e $[S]$ são ortonormais, a propriedade apresentada pela Equação (4.19) é válida para as matrizes $[R_n]$ e $[S_n]$.

$$[R_n]^T [R_n] = [I_n] = [S_n]^T [S_n] \quad (4.19)$$

Utilizando a matriz de Hankel da Equação (4.11) e adotando $k = 1$, a partir de então, iguala-se a mesma com a Equação (4.18) e fatora-se $[\Sigma_n]$, consequentemente obtém-se a expressão apresentada na Equação (4.20).

$$[P_\alpha][Q_\beta] = [R_n][\Sigma_n][S_n]^T \Rightarrow [P_\alpha][Q_\beta] = [R_n][\Sigma_n]^{1/2} \cdot [\Sigma_n]^{1/2}[S_n]^T \quad (4.20)$$

Assim, a partir da Equação (4.20), pode-se extrair as relações apresentadas pelas Equações (4.21) e (4.22).

$$[P_\alpha] = [R_n][\Sigma_n]^{1/2} \quad (4.21)$$

$$[Q_\beta] = [\Sigma_n]^{1/2}[S_n]^T \quad (4.22)$$

Assumindo $k = 2$ na Equação (4.11), e posteriormente substituindo as matrizes das Equações (4.21) e (4.22), tem-se conforme as Equações (4.23) e (4.24).

$$[H(1)] = [P_\alpha][A][Q_\beta] \quad (4.23)$$

$$[H(1)] = [R_n][\Sigma_n]^{1/2}[A][\Sigma_n]^{1/2}[S_n]^T \quad (4.24)$$

A partir daqui, já é possível determinar a matriz identificada $[\hat{A}]$, a partir da seguinte manipulação matemática: pré e pós multiplicar ambos os membros da Equação (4.24) por $[R_n]^T$ e $[S_n]$; aplicar a propriedade da Equação (4.19) e; isolar a matriz $[A]$. Assim, tem-se a partir da Equação (4.25) a matriz identificada $[\hat{A}]$ que corresponde a matriz $[A]$.

$$[\hat{A}] = [\Sigma_n]^{-1/2}[R_n]^T[H(1)][S_n][\Sigma_n]^{-1/2} \quad (4.25)$$

As matrizes $[B]$ e $[C]$ são determinadas mediante o uso de matrizes auxiliares apresentadas pelas Equações (4.26) e (4.27):

$$[E_m] = \begin{bmatrix} [I_m] \\ [O_m] \\ \vdots \\ [O_m] \end{bmatrix}_{m(\beta-1) \times m} \quad (4.26)$$

$$[E_r] = [[I_r] \quad [O_r] \quad \cdots \quad [O_r]]_{r \times r(\alpha-1)} \quad (4.27)$$

onde $[I_m]$ e $[I_r]$ são matrizes identidades de ordem m e r , e $[O_m]$ e $[O_r]$ são matrizes quadradas nulas de ordem m e r .

A matriz identificada $[\hat{B}]$ é determinada a partir da multiplicação da matriz de controlabilidade, Equação (3.3), com a Equação (4.26), conforme a Equação (4.28).

$$[\hat{B}] = [Q_\beta][E_m] = [B]_{\beta \times m} \cdot [I_m] \quad (4.28)$$

No entanto, como na prática não se dispõe da matriz de controlabilidade para que a matriz identificada $[\hat{B}]$ seja calculada, é necessário empregar a matriz de controlabilidade na forma apresentada na Equação (4.22), pois provém da decomposição da matriz de Hankel, cuja a mesma é construída a partir de dados experimentais. Logo, tem-se a Equação (4.29).

$$[\hat{B}] = [\Sigma_n]^{1/2} [S_n]^T [E_m] \quad (4.29)$$

Similar ao cálculo para a identificação da matriz $[\hat{B}]$, identifica-se a matriz $[\hat{C}]$ multiplicando a matriz auxiliar da Equação (4.27) com a matriz de observabilidade, Equação (3.5), logo tem-se a Equação (4.30).

$$[\hat{C}] = [E_r][P_\alpha] = [I_r] \cdot [C]_{r \times n} \quad (4.30)$$

Substituindo então, a matriz de observabilidade pela sua forma apresentada na Equação (4.21), tem-se a Equação (4.31).

$$[\hat{C}] = [E_r][R_n][\Sigma_n]^{1/2} \quad (4.31)$$

A matriz identificada $[\hat{D}]$, conforme a Equação (4.8) é simplesmente o parâmetro de Markov quando tem-se $k = 1$, logo é representada pela Equação (4.32).

$$[\hat{D}] = [Y_0] \quad (4.32)$$

4.3 IDENTIFICAÇÃO COM OBSERVADOR/FILTRO DE KALMAN - OKID

O OKID (do inglês - *Observer / Kalman Identification*), conhecido como identificação com observador/filtro de Kalman, é uma técnica de identificação criada principalmente para atender a engenharia aeroespacial, em estruturas levemente amortecidas. Tais estruturas apresentam uma taxa de decaimento do sinal de saída muito baixo, quando excitadas (ALVES, 2005)

Em termos da engenharia de controle de vibrações, é desejável que o sistema se estabilize em um tempo de acomodação pequeno. No entanto, o tempo de acomodação das estruturas levemente amortecidas é muito grande, neste contexto é necessário a introdução de um observador de estado, a fim introduzir um amortecimento artificial no sistema, antecipando assim, a estabilização do sinal de saída. A introdução deste amortecimento artificial, irá contribuir também com a redução do esforço computacional, uma vez que, diminui o comprimento do vetor de dados adquiridos, conseqüentemente, tem-se uma melhor precisão dos resultados obtidos (ALVES, 2005).

A Figura 4.1 ilustra o efeito da incorporação do observador de estado no sistema sobre a resposta no domínio do tempo.

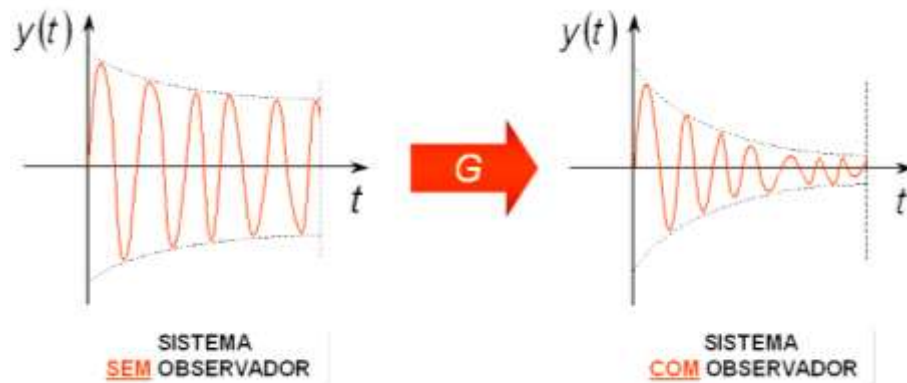


Figura 4.1 - Efeito da incorporação do observador de estado no sistema sobre a resposta no domínio do tempo
 Fonte: Alves (2005).

Quando incorporado o observador, matematicamente, faz com que o sistema se torne um novo, e conseqüentemente os parâmetros de Markov obtidos, serão desse novo sistema. No entanto, o que interessa, são os parâmetros de Markov do sistema verdadeiro. O OKID então, permite a recuperação dos parâmetros de Markov do sistema verdadeiro e também os parâmetros de Markov do ganho do observador.

O OKID é aplicável a qualquer sistema, independentemente de sua taxa de amortecimento e também é capaz de obter, a partir de qualquer tipo de sinal de entrada, a resposta impulsiva do sistema verdadeiro, resposta na qual é indispensável para alimentar o algoritmo do ERA. Assim, o OKID tem se mostrado eficiente e robusto (BERNAL; GUNES, 2000).

Na literatura há grandes estudos da aplicação do OKID na área de identificação de estruturas aeroespaciais, como em Fan, Liu e Cai (2019) que fez o uso do OKID em conjunto com o ERA para identificação de satélites com antena e membrana em grande escala.

O equacionamento do observador é encontrado em maiores detalhes em Alves (2005).

4.4 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE MARKOV

Os parâmetros de Markov do observador concebem tanto os parâmetros de

Markov do sistema como os parâmetros de Markov do ganho do observador. Como visto na Seção 4.3, os parâmetros de Markov do sistema são utilizados para calcular as matrizes $[A]$, $[B]$, $[C]$ e $[D]$, matrizes fundamentais na identificação de sistema quando usada a técnica de identificação ERA. Já os parâmetros de Markov do ganho do observador são utilizados para determinar a matriz do ganho do observador $[G_o]$.

4.4.1 Parâmetros de Markov do sistema

É necessário recuperar os parâmetros de Markov do sistema verdadeiro $[Y]$, visto que, com a incorporação de um observador, faz com que se tenha um novo sistema e conseqüentemente os parâmetros de Markov do observador $[\bar{Y}]$.

A partir da Equação (4.33), tem-se os parâmetros de Markov do observador de Alves (2005):

$$[\bar{Y}] = \begin{bmatrix} [\bar{Y}_0] & [\bar{Y}_1] & [\bar{Y}_2] & \cdots & [\bar{Y}_p] \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

onde tem-se:

$$[\bar{Y}_0] = [D] \quad (4.34)$$

$$[\bar{Y}_k] = [C][\bar{A}]^{k-1}[\bar{B}] = [C] \cdot ([A] + [G_o][C])^{k-1} \cdot ([B] + [G_o][D]) - [C] \cdot ([A] + [G_o][C])^{k-1} \cdot [G_o] \quad (4.35)$$

$$\underline{\underline{\Delta}} \begin{bmatrix} [\bar{Y}_k^{(1)}] & -[\bar{Y}_k^{(2)}] \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4.36)$$

Assim sendo, $[\bar{Y}_k^{(1)}] \underline{\underline{\Delta}} [C]([A] + [G_o][C])^{k-1}([B] + [D][G_o])$, e $[\bar{Y}_k^{(2)}] \underline{\underline{\Delta}} [C]([A] + [G_o][C])^{k-1}[G_o]$.

Inserindo-se a Equação (4.36), na Equação (4.33), tem-se a Equação (4.37).

$$[\bar{Y}] = \begin{bmatrix} [\bar{Y}_0] & \begin{bmatrix} [\bar{Y}_1^{(1)}] - [\bar{Y}_1^{(2)}] \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} [\bar{Y}_2^{(1)}] - [\bar{Y}_2^{(2)}] \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} [\bar{Y}_p^{(1)}] - [\bar{Y}_p^{(2)}] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Agora inicia-se o processo que a cerca $\left[\bar{Y}_k^{(1)} \right]$ e $\left[\bar{Y}_k^{(2)} \right]$ para o prosseguimento do algoritmo.

Considerando então o primeiro parâmetro de Markov $[Y_1]$ tem-se a Equação (4.38).

$$[Y_1] = [C][B] = [C] \cdot ([B] + [G_o][D]) - ([C][G_o]) \cdot [D] = [\bar{Y}_1^{(1)}] - [\bar{Y}_1^{(2)}][D] \quad (4.38)$$

O segundo parâmetro de Markov $[Y_2]$ é obtido, segundo as Equações (4.39) e (4.40).

$$[\bar{Y}_2^{(1)}] = [C][A][B] = [C] \cdot ([A] + [G_o][C]) \cdot ([B] + [G_o][D]) = [Y_2] + [\bar{Y}_1^{(2)}][Y_1] - [\bar{Y}_2^{(2)}][D] \quad (4.39)$$

$$[Y_2] = [\bar{Y}_2^{(1)}] - [\bar{Y}_1^{(2)}][Y_1] - [\bar{Y}_2^{(2)}][D] \quad (4.40)$$

O terceiro parâmetro de Markov $[Y_3]$ é obtido a partir das Equações (4.41) e (4.42).

$$[\bar{Y}_3^{(1)}] = [C][A]^2[B] = [C] \cdot ([A] + [G_o][C])^2 \cdot ([B] + [G_o][D]) = [Y_3] + [\bar{Y}_1^{(2)}][Y_2] - [\bar{Y}_2^{(2)}][Y_1] + [\bar{Y}_3^{(2)}][D] \quad (4.41)$$

$$[Y_3] = [\bar{Y}_3^{(1)}] - [\bar{Y}_1^{(2)}][Y_2] - [\bar{Y}_2^{(2)}][Y_1] - [\bar{Y}_3^{(2)}][D] \quad (4.42)$$

Logo, tem-se por indução matemática a relação geral entre os parâmetros de Markov do sistema real e do observador, conforme as Equações (4.43), (4.44) e (4.45).

$$[D] = [Y_0] = [\bar{Y}] \quad (4.43)$$

$$[Y_k] = [\bar{Y}_k^{(1)}] - \sum_{i=1}^k [\bar{Y}_i^{(2)}][Y_{k-i}] \quad \text{para } k = 1, \dots, p \quad (4.44)$$

$$[Y_k] = -\sum_{i=1}^k [\bar{Y}_i^{(2)}][Y_{k-i}] \quad \text{para } k = p+1, \dots, \infty \quad (4.45)$$

Com os parâmetros de Markov obtidos, é possível então montar a matriz de Hankel, matriz base para a obtenção das matrizes $[A]$, $[B]$, $[C]$ e $[D]$ do sistema, a partir da aplicação do algoritmo ERA.

4.4.2 Parâmetros de Markov do ganho do observador

A obtenção dos parâmetros de Markov do ganho do observador é similar aos procedimentos adotados para obtenção dos parâmetros de Markov do sistema, na qual os cálculos acercam a inserção dos termos $[\bar{Y}_k^{(1)}]$ e $[\bar{Y}_k^{(2)}]$.

A relação geral dos parâmetros do ganho do observador são dadas, respectivamente, pelas Equações (4.46), (4.47) e (4.48).

$$[Y_1^o] = [C][G_o] = [\bar{Y}_1^{(2)}] \quad (4.46)$$

$$[Y_k^o] = [\bar{Y}_k^{(2)}] - \sum_{i=1}^{k-1} [\bar{Y}_i^{(2)}][Y_{k-i}^o] \quad \text{para } k = 2, \dots, p \quad (4.47)$$

$$[Y_k^o] = -\sum_{i=1}^p [\bar{Y}_i^{(2)}][Y_{k-i}^o] \quad \text{para } k = p+1, \dots, \infty \quad (4.48)$$

Segundo Alves (2005), o número de parâmetros de Markov do observador calculados, p , deve ser escolhido tal que satisfaça a condição $mp > n$, onde m é o número de saídas. Como o número p determina o número máximo de parâmetros de Markov independentes do sistema, o termo mp representa então, o limite superior da ordem do sistema identificado.

Vale ressaltar que como o OKID é a identificação com observador ou filtro de Kalman, a metodologia para calcular ambos os ganhos do observador e do filtro de Kalman é a mesma. A relação entre os ganhos do observador e do filtro de Kalman é expressa pela Equação (4.49).

$$[L] = -[G_o] \quad (4.49)$$

5 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento das simulações numéricas e dos procedimentos experimentais do controle ativo de vibrações da viga de material compósito.

5.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental consiste em uma viga de material compósito engastada verticalmente em um perfil de alumínio, onde o mesmo é sustentado por duas colunas de perfis de alumínio, conforme as Figuras 5.1 e 5.2.

O conjunto de perfis de alumínio são fixados por meio de cantoneiras de perfil “L” de 38,1 [mm] de largura e 0,125 [mm] de espessura e parafusos “T” de 8 [mm].



Figura 5.1 - Bancada Experimental concepção CAD
Fonte: Autoria Própria.

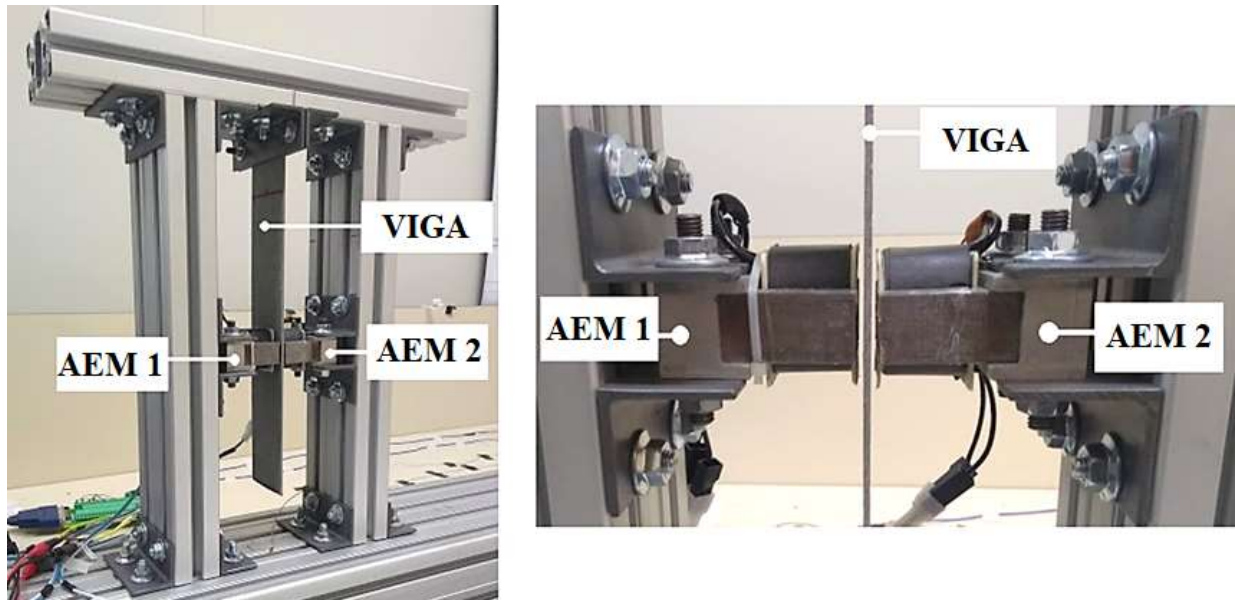


Figura 5.2 – Foto bancada experimental
Fonte: Autoria Própria.

A viga de material compósito apresenta 310 [mm] de comprimento, 59,30 [mm] de largura e 3 [mm] de espessura e é formada por resina epóxi, fibra de vidro e tela de aço 1045.

Dois atuadores eletromagnéticos (AEM1 e AEM2) são posicionados na estrutura, para a aplicação do controle experimental. Cada atuador possui um “*gap*” (lacuna) de 1,5 [mm] da viga.

Os detalhes e dimensionamento dos componentes da estrutura é apresentado no Apêndice A.

5.2 VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO

A viga de material compósito utilizada no presente trabalho é composta por matriz polimérica de resina epóxi e reforçada por 4 camadas de fibras de vidro e 3 camadas de telas de aço 1045. A Figura 5.3 apresenta as dimensões da viga.

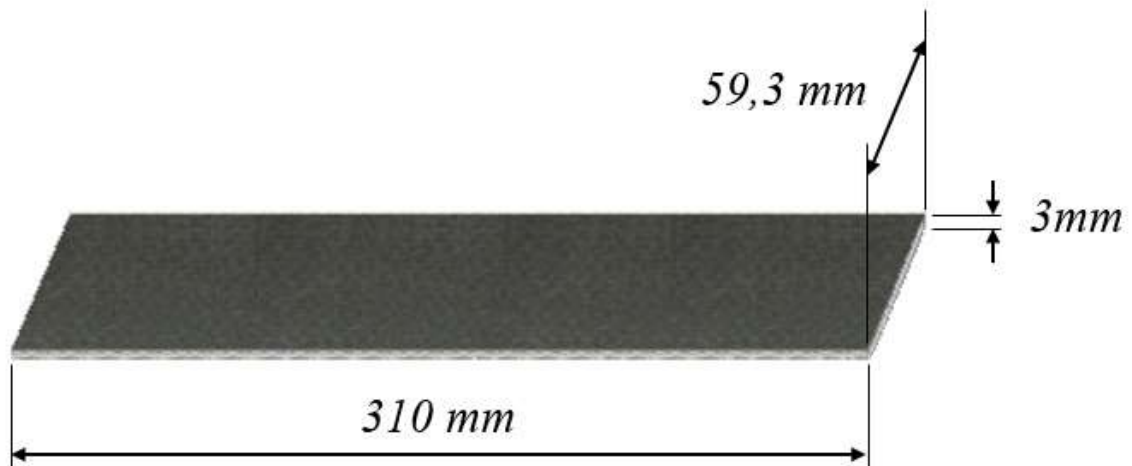


Figura 5.3 – Viga de Material Compósito
Fonte: Autoria Própria.

A viga de material compósito foi confeccionada no laboratório de materiais compósitos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio, sob supervisão do Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa. A viga foi produzida utilizando o sistema de resina epóxi AR-260 com o endurecedor AH-30 da fabricante Barracuda *Composites*, na qual a mistura utilizada no presente trabalho apresenta uma proporção três por um (para três unidades de resina foi utilizado uma unidade de endurecedor). Este sistema apresenta cura rápida e baixa viscosidade (BARRACUDA, 2018). Para minimizar problemas estruturais e de acabamento causados pela presença de bolhas de ar na mistura, a mesma é submetida a uma câmara de vácuo.

As propriedades de manuseio da resina epóxi são apresentadas na Tabela 5.1 e suas propriedades físicas na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 – Propriedade de manuseio da resina epóxi

Parâmetros	Valor	Valor (SI)	Método
Densidade da resina (lbs/gal)	9,6	1150 (kg/m ³)	ASTM E-201
Densidade do endurecedor (lbs/gal)	8,2	983 (kg/m ³)	ASTM E-201
Viscosidade da resina a 25°C (cps)	1200	1,2 (Ns/m ²)	ASTM D-2393
Viscosidade do endurecedor a 25°C (cps)	50	0,05 (Ns/m ²)	ASTM D-2393
Viscosidade mista a 25°C (cps)	580	0,25 (Ns/m ²)	ASTM 2393
Taxa de mistura por peso 100 A	100A : 33B	100A : 33B	Calculado
Gek time a 25°C (cps) (150g massa, min.)	30	0,03	ASTM D-2471

Fonte: Barracuda (2018).

Tabela 5.2 – Propriedades físicas da resina epóxi

Parâmetros	Valor	Valor (SI)	Método
Cor	Amarelo palha	Amarelo palha	Visual
Dureza Shore D	82	82	ASTM D-2240
Resistência à tração (psi)	11400	78,6 (Mpa)	ASTM D-638
Módulo de tensão (psi)	419000	2,89 (GPa)	ASTM D-638
Resistência ao alongamento (%)	7,0	7,0	ASTM D-638
Resistência à compressão (psi)	14800	102 (Mpa)	ASTM D-695
Resistência à flexão (psi)	19200	132,38 (GPa)	ASTM D-790
Módulo de flexão (psi)	469000	3,23 (GPa)	ASTM D-790
HDT – Cura Temperatura ambiente (°C)	58	58	ASTM D-648
HDT – Cura Temperatura de pós-cura (°C)	78	78	ASTM D-648
Impacto Izod, com entalhe (ft-lb/in)	1,18	53,38 (J/m)	ASTM D-256

Fonte: Barracuda (2018).

Na montagem da viga, a mesma é reforçada com fibras de vidro e tela de aço 1045. A presença da tela de aço faz com que a viga apresente propriedades ferromagnéticas, possibilitando assim, a aplicação do controle a partir da utilização de atuadores eletromagnéticos.

5.3 ATUADOR ELETROMAGNÉTICO

O projeto do atuador eletromagnético foi uma adaptação do modelo apresentado por Moraes (2010). No presente trabalho o atuador eletromagnético é formado por um núcleo composto por várias lâminas de material ferromagnético, onde no mesmo encontra-se uma bobina composta por 250 espiras de fio de cobre AWG24. O atuador então proporciona um direcionamento do fluxo de campo magnético junto a viga de material compósito, sendo esta composta por telas de aço 1045. Os atuadores eletromagnéticos agem separadamente, aplicando apenas força de atração. A Figura 5.4 apresenta uma ilustração do atuador eletromagnético.

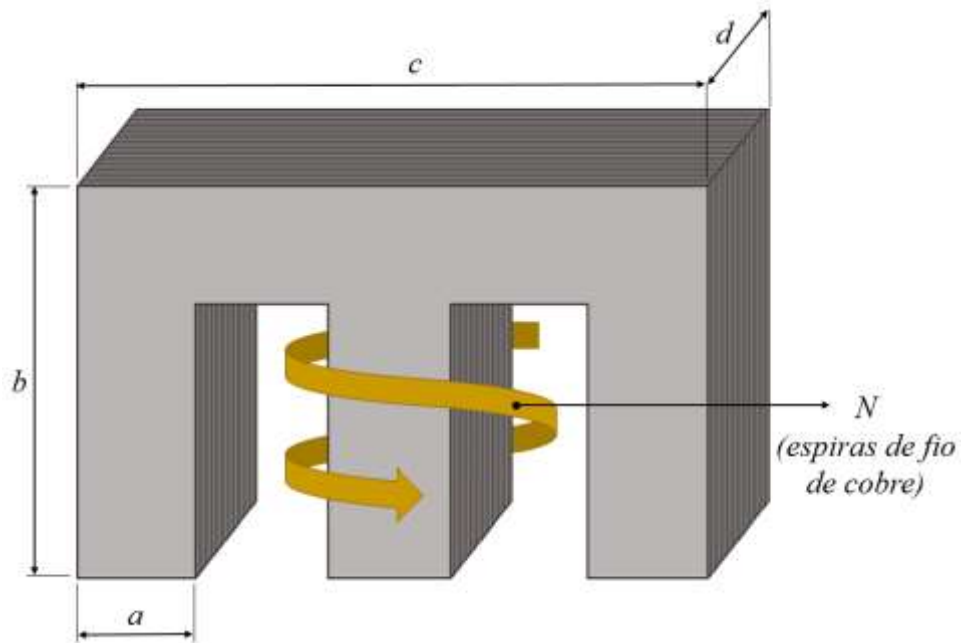


Figura 5.4 – Atuador Eletromagnético
Fonte: Autoria Própria.

Os parâmetros do atuador eletromagnético utilizado no presente trabalho são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Parâmetros do núcleo e da bobina

Parâmetros	Valor
N (espiras)	250
a (mm)	9,5
b (mm)	38
c (mm)	57
d (mm)	9,5

Fonte: Koroishi (2013).

A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros do fio de cobre AWG24.

Tabela 5.4 - Fio de cobre AWG24

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

Fonte: Koroishi (2013).

As várias lâminas de material ferromagnético que compõem o núcleo, reduzem a perda por correntes parasitas, também conhecidas como corrente de Foucault, estas responsáveis pela perda da potência do atuador e conseqüentemente na redução da força eletromagnética. Segundo Brauer (2014), as lâminas são empilhadas usualmente para formar uma geometria planar ou bidimensional. Como o atuador apresenta simetria, o fluxo eletromagnético é igual em ambos os lados do atuador.

5.4 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

Para a identificação do modelo do sistema é utilizada a técnica de identificação ERA/OKID, sendo esta capaz de identificar as matrizes do comportamento dinâmico do sistema a partir de dados da entrada e saída do sistema.

A estratégia do algoritmo é apresentada em forma de fluxograma na Figura 5.5.

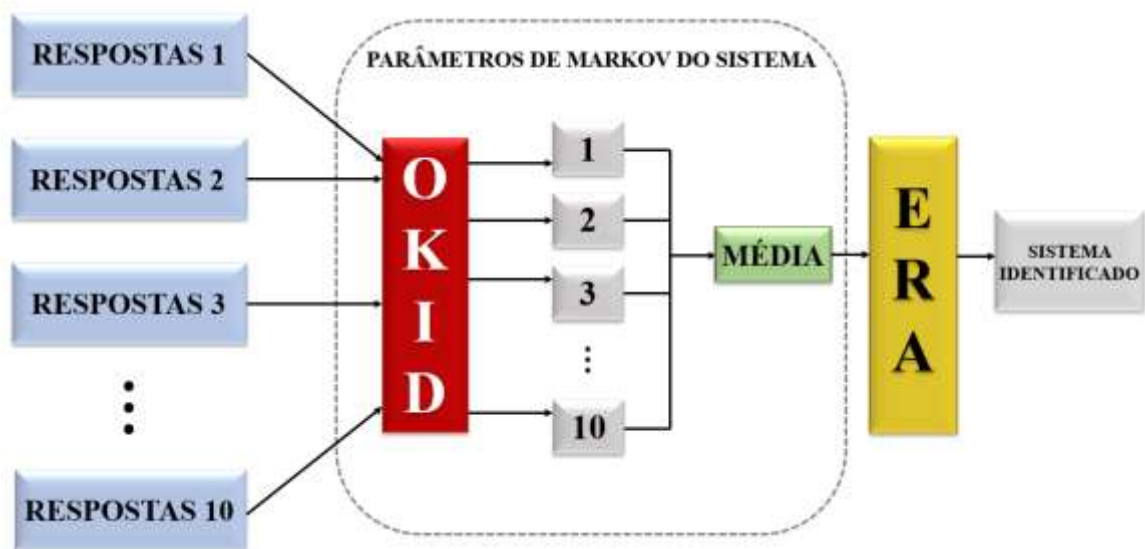


Figura 5.5 – Estratégia ERA/OKID
Fonte: Adaptado de Alves (2005).

Conforme a Figura 5.5, a estratégia do algoritmo se dá em alimentar o OKID com as respostas obtidas das entradas e saídas do sistema, o OKID por sua vez calcula os parâmetros de Markov do sistema relativo a cada resposta, e

posteriormente calcula a média dos parâmetros de Markov do sistema. A média dos parâmetros de Markov “alimenta” o algoritmo ERA, que, por conseguinte, faz a identificação do sistema.

Para “alimentar” o algoritmo ERA/OKID, foram coletadas 10 respostas da entrada e saída do sistema, sendo a entrada um pulso de corrente de 0,5 [A] de um dos atuadores eletromagnéticos e a saída a resposta do deslocamento do sistema.

Para coletar as respostas, foi utilizado um acelerômetro da fabricante PCB Piezotronics®, este posicionado na extremidade livre da viga, a fim de obter o sinal de saída do sistema. O sinal do acelerômetro é então transmitido a um condicionador de sinais do modelo 480E09 da PCB Piezotronics®. Para o pulso de corrente é utilizado um dos atuadores eletromagnéticos, nele é conectado um amplificador do modelo 4-Q-Dc Servo-Amplificador da Maxon Motor®, que tem por finalidade a conversão do sinal de tensão da placa de aquisição para corrente elétrica que alimenta os atuadores. O amplificador também é conectado a uma fonte de alimentação do modelo PS-6000 da Icel®. Para a aquisição dos dados é utilizada a placa PCI-6221, da *National Instrument*®, na qual possui uma taxa de aquisição de 500 [Hz] e um tempo de resposta de 2 [ms]. A placa de aquisição é conectada a um computador desktop, e para isto, é utilizado uma entrada analógica para o sinal do acelerômetro e uma saída, referente a tensão de saída que alimenta o amplificador. As respostas então são obtidas no *software* Matlab/Simulink®.

5.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A partir das matrizes identificadas através do algoritmo ERA/OKID, é realizada as simulações numéricas do controle ativo modal para o controle da estrutura. A simulação numérica é realizada no *software* Matlab/Simulink®, para posteriormente serem validadas pelo controle experimental.

Para isso, são projetados os controladores Ótimo, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy* em conjunto com a utilização de atuadores eletromagnéticos, a fim de garantir a estabilização da viga de material compósito.

O modelo do sistema obtido a partir do algoritmo ERA/OKID é reduzido para o número de modos controláveis e observáveis. No presente trabalho os dois

primeiros modos de vibrar são controláveis e observáveis, logo a matriz dinâmica reduzida $[A_r]$ apresenta ordem (4×4) , a matriz de entrada reduzida $[B_r]$ ordem (4×1) , a matriz de saída $[C_r]$ ordem (4×1) .

A metodologia utilizada nas simulações numéricas é apresentada de forma esquemática na Figura 5.6 onde δ corresponde ao deslocamento, X ao estado modal e i a corrente elétrica.

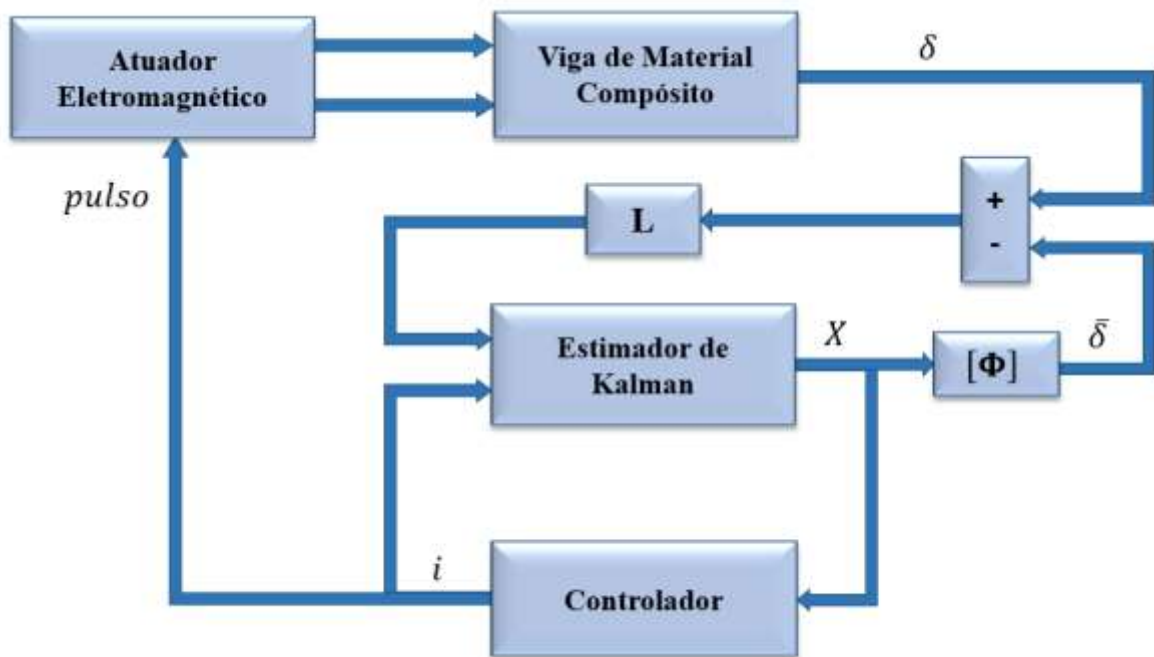


Figura 5.6 - Controle ativo modal baseado na realimentação do controle no estado modal
Fonte: Adaptado de Koroishi et al. (2015).

No esquema apresentado na Figura 5.6, a viga de material compósito, é submetida a um pulso de corrente, gerando um deslocamento δ na viga. Com a viga descrita na forma de espaço de estados, o estimador de Kalman determina os estados modais exigidos pelo controlador, e estima os estados e saídas do sistema. O atuador eletromagnético minimiza as amplitudes de vibração ao longo do tempo, a partir da aplicação da força eletromagnética. A corrente elétrica é determinada pela planta de controle, de acordo com a solicitação do sistema.

A fim de analisar a robustez do sistema de controle, é considerada uma variação de -20% a 20% na matriz dinâmica $[A]$.

Como dito anteriormente foram projetados três controladores, sendo eles: controle Ótimo, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*. Nas simulações numéricas os controladores foram considerados apenas para o primeiro modo de vibrar. O segundo modo de vibrar mesmo dito controlável e observável, os controladores não atuaram.

O controle Ótimo faz utilização do LQR via LMIs. O ganho do controlador é determinado com base nas matrizes $[A]$, $[B]$, $[Q_{lqr}]$ e $[R_{lqr}]$. Os valores das matrizes $[Q_{lqr}]$ e $[R_{lqr}]$ são ajustados conforme a influência que ambos têm na atenuação de vibração da viga. Os valores das matrizes $[Q_{lqr}]$ e $[R_{lqr}]$ são apresentados na Equação (5.1) e na Equação (5.2). Koroishi (2013) considerou que o aumento dos parâmetros tem influência direta na atenuação de vibração do sistema. No entanto, um aumento expressivo pode causar desestabilização do sistema.

$$[Q_{lqr}] = 500000 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$[R_{lqr}] = [2000] \quad (5.2)$$

Os valores do ganho $[G]$ determinados pelo LQR via LMIs são apresentados pela Equação (5.3).

$$[G] = [7,1780 \quad 20,4520 \quad 0 \quad 0] \quad (5.3)$$

Para o projeto do controle *Fuzzy*, são definidos os conjuntos de entradas, saídas e regras para cada modo dito controlável e observável. Os valores das entradas que são os deslocamentos e velocidades modais, são transformados no domínio *Fuzzy* pelas funções de pertinência, que no presente trabalho utilizou duas funções de pertinência do tipo *gbell*, as quais são apresentadas nas Figuras 5.7 e 5.8.

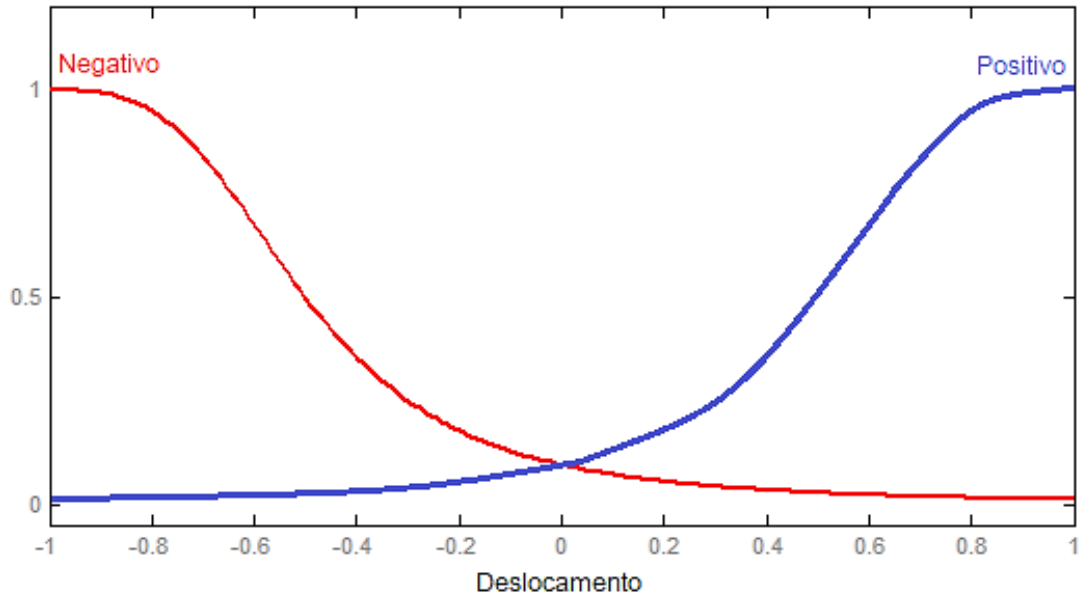


Figura 5.7 – Função de Pertinência do Controle *Fuzzy* (deslocamento)
 Fonte: A autoria Própria.

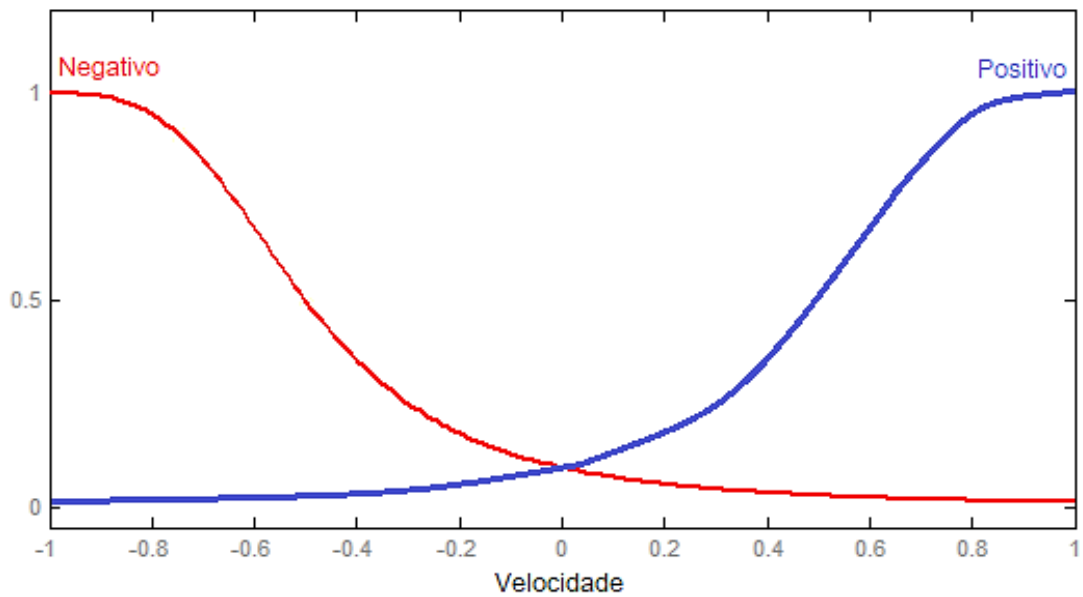


Figura 5.8 – Função de Pertinência do Controle *Fuzzy* (velocidade)
 Fonte: A autoria Própria.

As regras do controlador *Fuzzy* para o controle do primeiro modo de vibrar são apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Regras do Controlador *Fuzzy* para o Primeiro Modo

Regras	Deslocamento	Velocidade	Saída
1	Positivo	Positivo	z_2
2	Positivo	Negativo	z_1
3	Negativo	Positivo	z_1
4	Negativo	Negativo	z_2

Fonte: Autoria Própria.

Os valores correspondentes das saídas da Tabela 5.5 são apresentadas nas Equações (5.4) e (5.5), que correspondem ao sistema de inferência proposto por Takagi-Sugeno.

$$z_1 = [0 \quad 0 \quad 0] \quad (5.4)$$

$$z_2 = [5,1 \quad -40,1 \quad 0] \quad (5.5)$$

A superfície *Fuzzy* gerada a partir dos parâmetros de entrada e saída é apresentada na Figura 5.9.

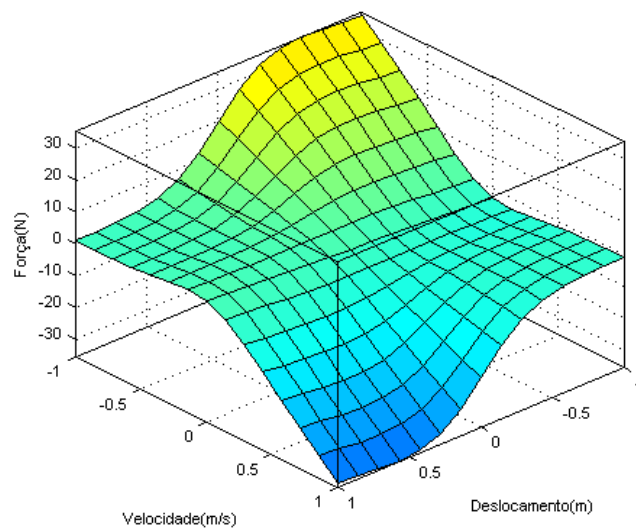


Figura 5.9 – Superfície do Controlador *Fuzzy* para o Controle do Primeiro Modo de Vibrar
Fonte: Autoria Própria.

O controle Ótimo é utilizado como base de treinamento para o projeto do controlador *Neuro-Fuzzy*, no qual consiste em otimizar parâmetros do controle *Fuzzy* através das redes neurais artificiais, baseando-se no conjunto de entrada-saída desejado. Assim, os dados desejados de entrada-saída (deslocamento, velocidade e força de controle) do controle Ótimo são utilizados para o armazenamento e treinamento do controle *Neuro-Fuzzy*.

Para a realização do treinamento utilizado a *Toolbox ANFIS* do *software Matlab®*, foram considerados: função de pertinência do tipo *gbell*, treinamento do tipo híbrido, erro de tolerância igual a zero, 100 épocas para o treinamento da rede e a combinação do método gradiente descendente com a dos mínimos quadrados.

A arquitetura da rede de neurônios gerada pelo ANFIS é apresentada na Figura 5.10.

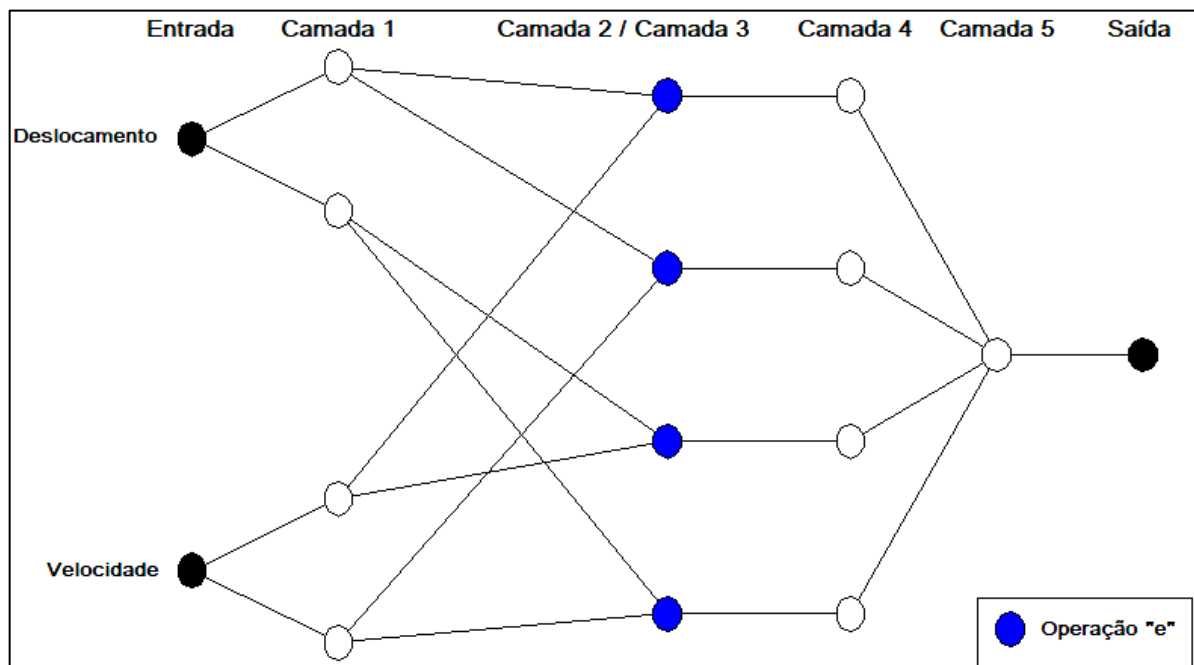


Figura 5.10 – Arquitetura ANFIS do controlador *Neuro-Fuzzy*
Fonte: Autoria Própria

As funções de pertinência geradas do tipo *gbell* são apresentadas na Figura 5.11 e Figura 5.12.

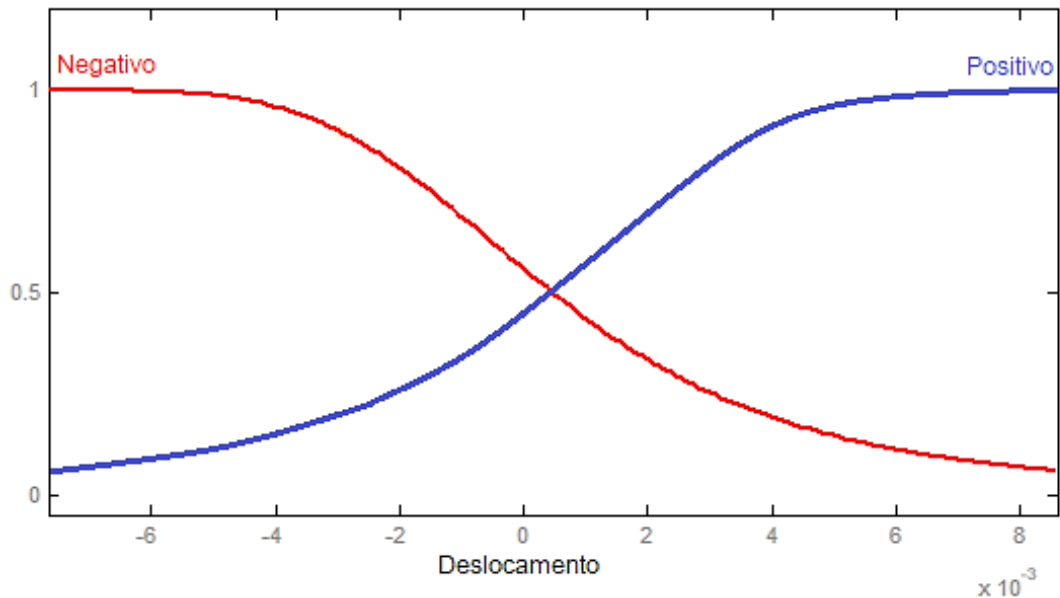


Figura 5.11 – Funções de Pertinência do Controle *Neuro-Fuzzy* (deslocamento)
Fonte: Autoria Própria.

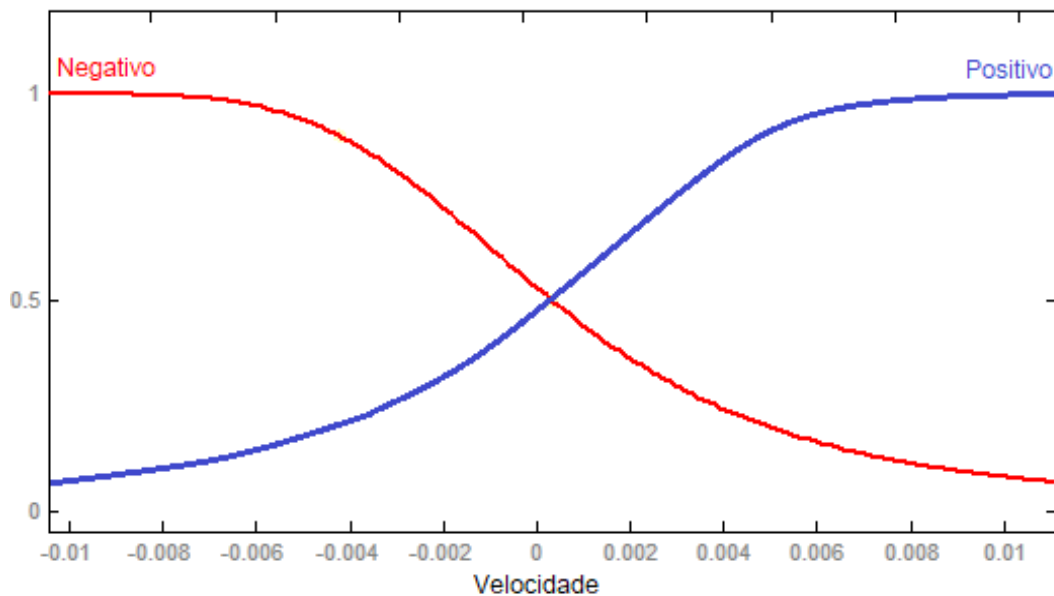


Figura 5.12 – Funções de Pertinência do Controle *Neuro-Fuzzy* (velocidade)
Fonte: Autoria Própria.

As regras do controlador projetadas para o controle do primeiro modo de vibrar seguindo as funções de pertinência da Figura 5.11 e Figura 5.12, são apresentadas na Tabela 5.6 e os valores correspondentes das saídas da Tabela 5.6 são apresentadas nas Equações (5.6) a (5.9).

Tabela 5.6 – Regras do Controlador *Neuro-Fuzzy* para o Primeiro Modo

Regras	Deslocamento	Velocidade	Saída
1	Positivo	Positivo	z_1
2	Positivo	Negativo	z_2
3	Negativo	Positivo	z_3
4	Negativo	Negativo	z_4

Fonte: Autoria Própria.

$$z_1 = [-7,094 \quad -20,34 \quad 0,001403] \quad (5.6)$$

$$z_2 = [-7,116 \quad -20,35 \quad -0,0004663] \quad (5.7)$$

$$z_3 = [-7,12 \quad -20,3 \quad -0,0009159] \quad (5.8)$$

$$z_4 = [-7,043 \quad -20,25 \quad -0,002449] \quad (5.9)$$

A superfície *Fuzzy* gerada a partir do controle *Neuro-Fuzzy* é apresentada na Figura 5.13.

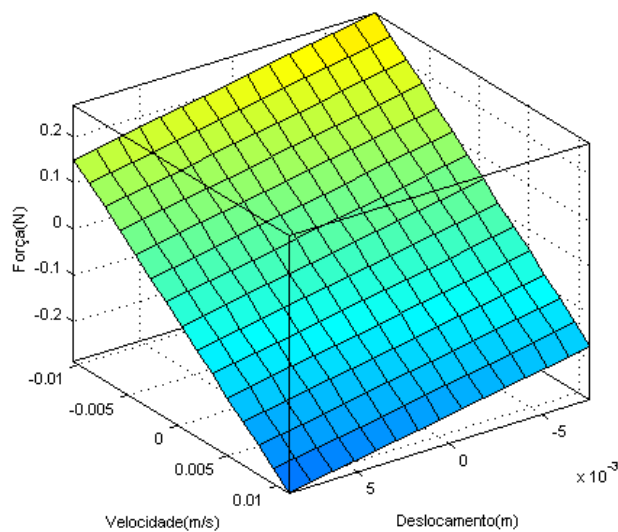


Figura 5.13 – Superfície do Controlador *Neuro-Fuzzy* para o Controle do Primeiro Modo de Vibir

Fonte: Autoria Própria.

5.6 CONTROLE EXPERIMENTAL

Para a validação do projeto dos controladores mencionados nas simulações numéricas para o controle da viga de material compósito é aplicado o controle experimental, para cada tipo de controle. Nesta seção serão apresentados a metodologia desenvolvida para o controle experimental e os equipamentos utilizados. A Figura 5.14 apresenta a bancada experimental e os equipamentos utilizados para aquisição de dados.

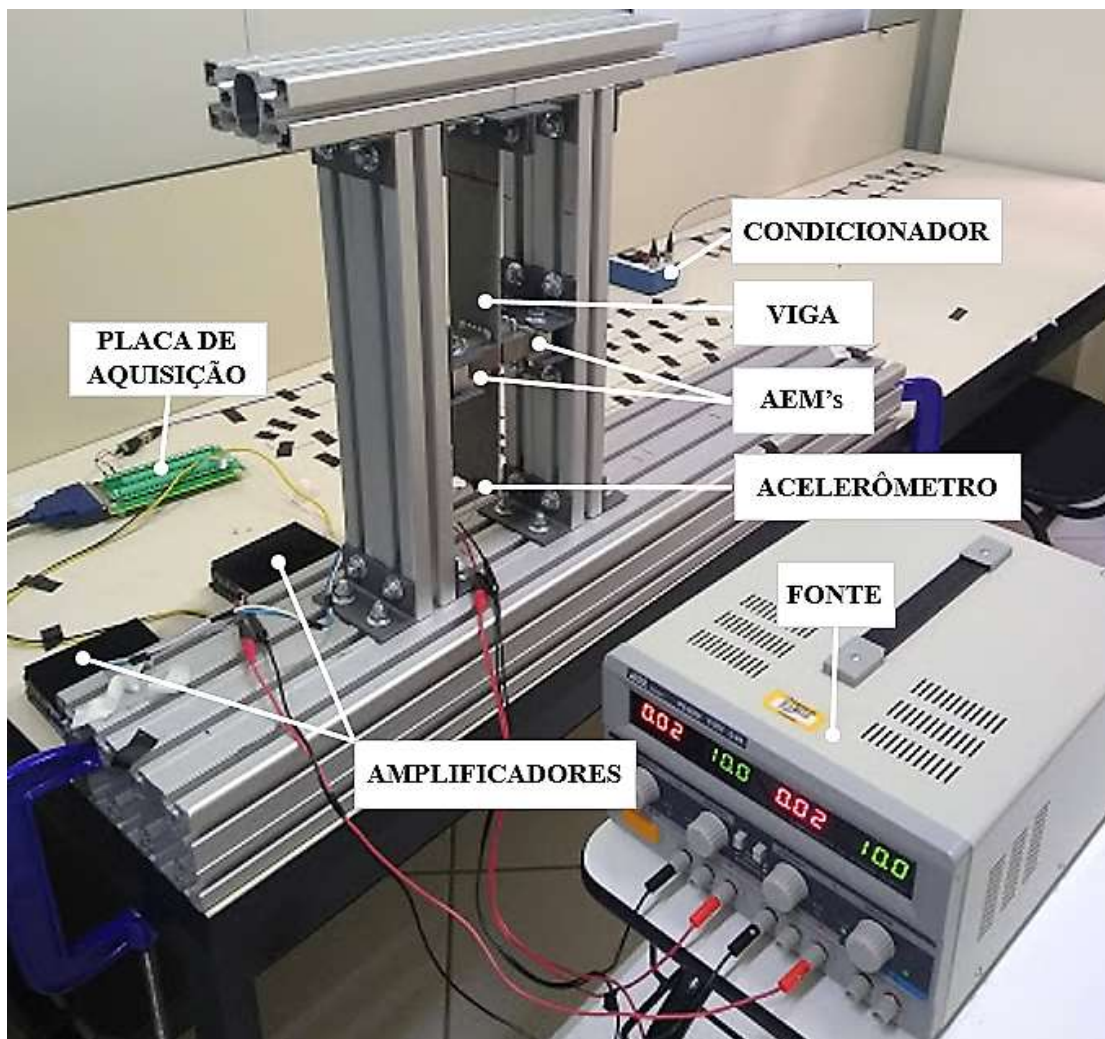


Figura 5.14 – Sistema de aquisição para o controle experimental
Fonte: Autoria Própria.

Como visto na Figura 5.14, os equipamentos utilizados para a aquisição de dados do controle experimental da viga de material compósito são: uma placa de aquisição de dados, dois amplificadores, um condicionador de sinal, um acelerômetro e uma fonte de alimentação.

A metodologia desenvolvida para o controle experimental é apresentada na Figura 5.15 em uma forma esquemática.

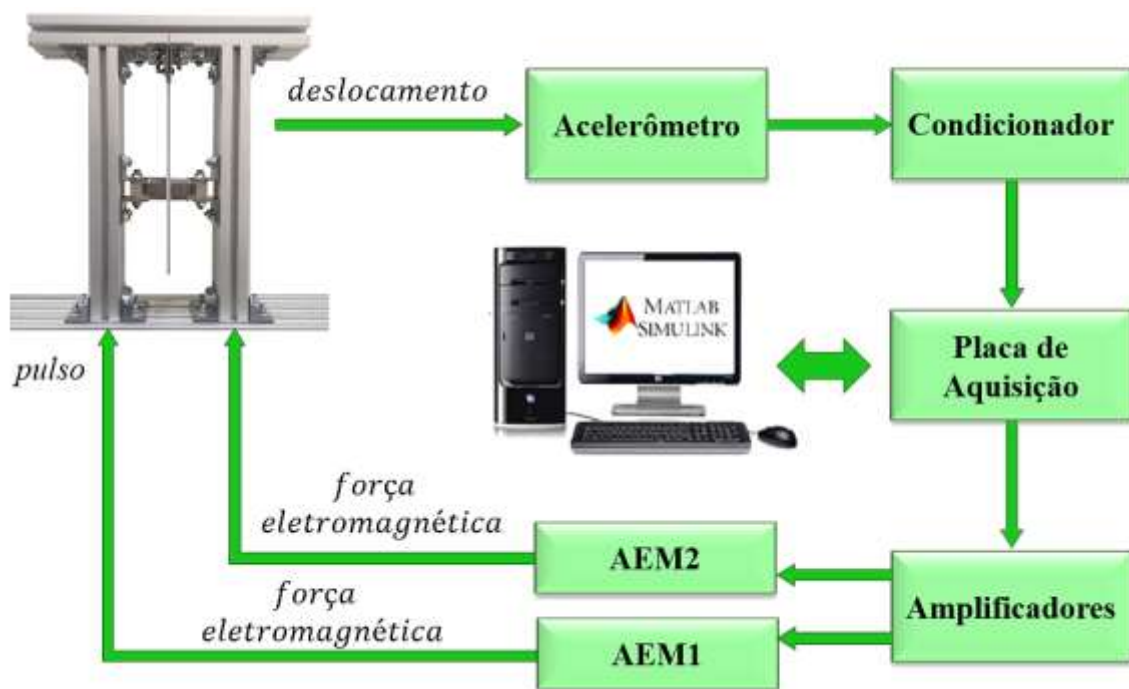


Figura 5.15 – Metodologia do Controle Experimental
Fonte: Autoria Própria.

Como visto no esquema apresentado na Figura 5.14, a aquisição de dados é feita através de uma placa de aquisição, onde a mesma é conectada a um computador *desktop*.

Os modelos dos equipamentos utilizados, suas especificações e os detalhes das conexões do teste experimental são apresentados no Apêndice B.

A excitação da estrutura é feita através de um pulso de corrente elétrica no valor de 0,5 [A] em um dos atuadores eletromagnéticos, com o objetivo de gerar um deslocamento na viga.

Os projetos dos controladores empregados no controle experimental foram os mesmos projetados nas simulações numéricas, sendo eles: controle Ótimo, *Fuzzy* e

Neuro-Fuzzy. Para analisar a robustez do sistema de controle experimental, é considerada uma variação de -20% a 20% na matriz dinâmica $[A]$. As respostas do controle experimental é uma média de 10 respostas experimentais.

6 RESULTADOS

O modelo identificado do sistema utilizando o ERA/OKID foi de ordem igual a 60, e posteriormente foi reduzido para o número de modos controláveis e observáveis. As matrizes que compõe o modelo reduzido considerando os modos controláveis e observáveis são apresentados pelas Equações (6.1), (6.2) e (6.3).

$$[A_r] = \begin{bmatrix} 0,0968 & 120,0848 & -1,1196 & -0,1748 \\ -120,0848 & -1,4115 & 2,1085 & 1,3598 \\ 1,1196 & 2,1085 & -4,1458 & -640,3872 \\ -0,1748 & -1,3598 & 640,3872 & 0,4177 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$[B_r] = \begin{bmatrix} 0,5079 \\ 1,9334 \\ -1,981 \\ 0,6139 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$$[C_r] = [-0,05079 \quad 1,9334 \quad -1,9381 \quad -0,6139] \quad (6.6)$$

A partir das matrizes identificadas foi possível projetar os controladores e o estimador de estado. Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas e no controle experimental, onde suas metodologias foram apresentadas nas seções 5.5 e 5.6

Os resultados têm como objetivo validar o projeto dos controladores Ótimo, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy* e comparar o desempenho dos mesmos.

6.1 RESULTADOS NUMÉRICOS

Para a análise da eficiência das metodologias mencionadas na Seção 4.5 em termos de atenuação de vibração, foi confrontado graficamente o comportamento da estrutura com a aplicação de controle e sem a aplicação do controle, analisando as respostas do deslocamento no domínio do tempo e no domínio da frequência, as

correntes elétricas e as cargas elétricas totais utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos. Ainda para analisar a robustez dos controladores foram analisadas as respostas do comportamento do sistema com variação de -20% a 20% na matriz dinâmica [4].

6.1.1 Resultados numéricos controle Ótimo

A resposta numérica do deslocamento do sistema com a aplicação do controle Ótimo por meio de simulações numéricas é apresentada na Figura 6.1. Junto a Figura 6.1, também é apresentada a resposta numérica do sistema sem aplicação de controle para a comparação do tempo de acomodação em ambos os casos.

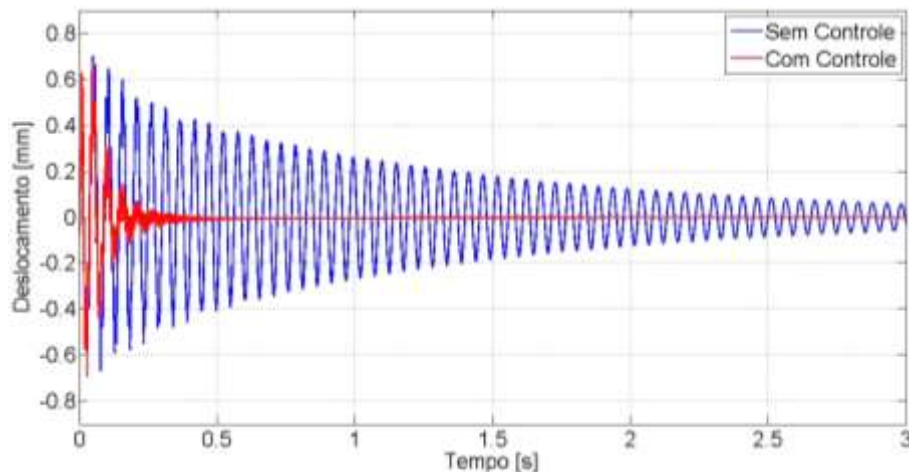


Figura 6.1 – Resposta numérica no domínio do tempo (controle Ótimo)
Fonte: Autoria própria.

A partir da análise da Figura 6.1, pode-se observar que o controle Ótimo estabilizou o deslocamento do sistema, num tempo de acomodação de aproximadamente 0,5 [s], um resultado muito favorável em termos de controle ativo de vibrações.

Ainda para a análise do comportamento do sistema, é obtida a resposta no domínio da frequência, com o intuito de analisar a redução no primeiro modo de vibrar. A Figura 6.2 apresenta a resposta em frequência numérica do sistema com aplicação

do controle Ótimo e sem aplicação do controle.

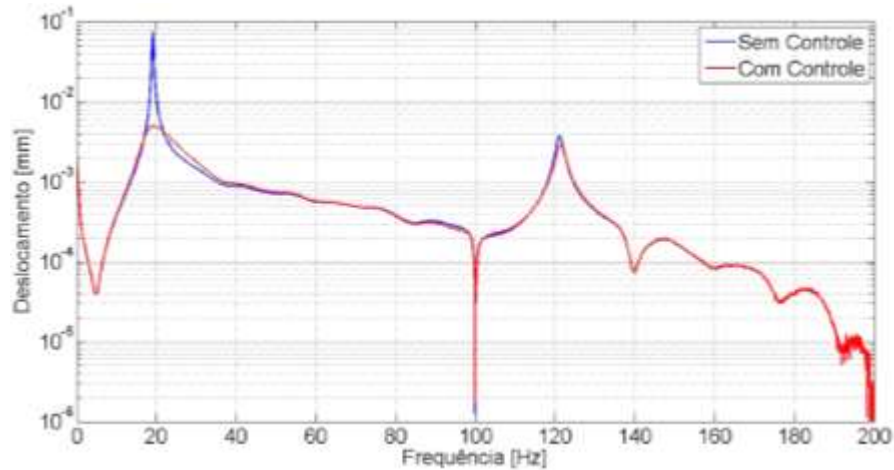


Figura 6.2 – Resposta numérica no domínio da frequência (controle Ótimo)
Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 6.2, o primeiro modo de vibrar, modo no qual foi considerado no projeto do controlador, apresentou grande atenuação, cerca de 0,0693 [mm], equivalente a 93,42% de redução no primeiro modo.

As correntes utilizadas por cada atuador eletromagnético, sendo estas requeridas conforme a resposta do deslocamento, foram analisadas graficamente e são apresentadas na Figura 6.3.

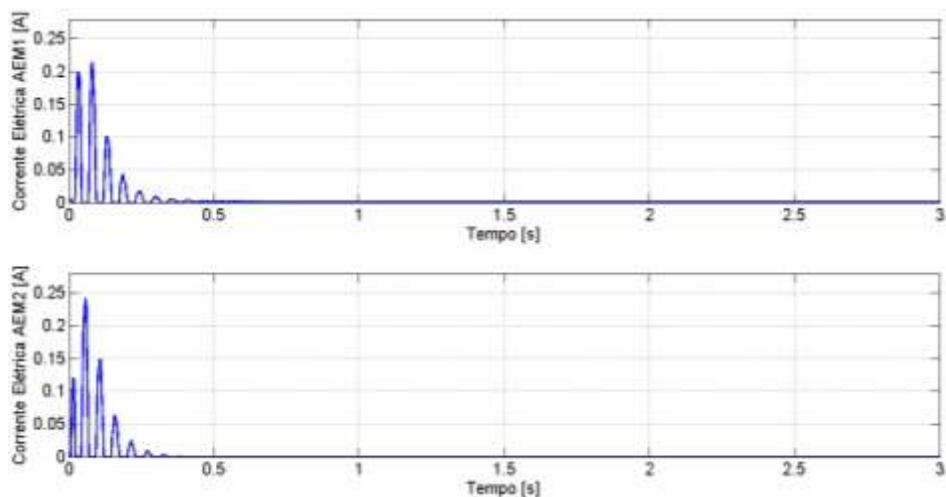


Figura 6.3 – Corrente elétrica numérica (controle Ótimo)
Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 6.3, as correntes elétricas são requeridas até a estabilização do deslocamento, onde as correntes apresentaram maiores picos nos maiores deslocamentos. É possível observar as alternâncias dos picos entre as respostas obtidas dos dois atuadores, e seus maiores picos em torno de 0,20 a 0,25 [A].

A partir das respostas das correntes em domínio do tempo é possível analisar a carga elétrica total utilizadas por cada atuador eletromagnético. Para tal, é calculada a área da curva gerada pelas correntes, conforme é apresentada na Figura 6.4, o valor da área então retorna o valor da carga elétrica total.

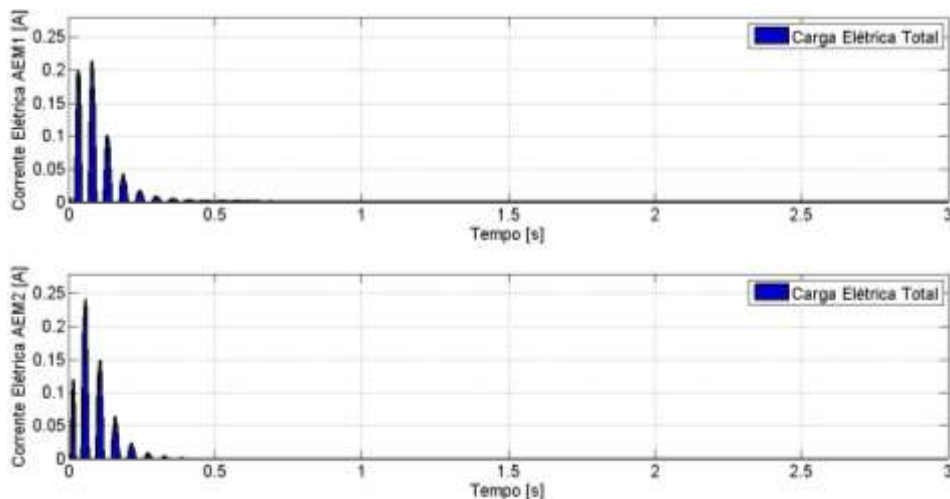


Figura 6.4 – Carga elétrica numérica (controle Ótimo)
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6.4, as áreas nas repostas das correntes elétricas correspondem a carga elétrica total de cada atuador eletromagnético, que apresentaram 0,0110 [C] para o AEM1 e 0,0087 [C] para o AEM2.

A fim de analisar a robustez do controle Ótimo foram projetados uma variação de -20% a +20% na matriz dinâmica [A], num intervalo de 5%. Os resultados obtidos em cada simulação são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Resultados numéricos da variação na matriz dinâmica (Controle Ótimo)

Varição na matriz [A]	Tempo de acomodação	Redução do 1º modo	Carga Elétrica Total AEM1	Carga Elétrica Total AEM1
+20%	0,66 [s]	91,29%	0,0107 [C]	0,0089 [C]
+15%	0,61 [s]	92,02%	0,0106 [C]	0,0087 [C]
+10%	0,59 [s]	92,67%	0,0105 [C]	0,0085 [C]
+ 5%	0,57 [s]	93,20%	0,0106 [C]	0,0084 [C]
0%	0,56 [s]	93,42%	0,0110 [C]	0,0087 [C]
- 5%	0,70 [s]	93,12%	0,0116 [C]	0,0091 [C]
- 10%	0,91 [s]	93,12%	0,0123 [C]	0,0097 [C]
- 15%	1,13 [s]	91,68%	0,0130 [C]	0,0103 [C]
- 20%	1,31 [s]	90,65%	0,0139 [C]	0,0110 [C]

Fonte: Autoria Própria.

Como visto na Tabela 6.1, o tempo de acomodação no intervalo de +20% apresentou resultados próximos ao resultado sem variação, já no intervalo de -20% houve uma variação de aproximadamente 0,74 [s], variação na qual pode-se dizer pequena, visto que o tempo de acomodação de 1,31 [s] é satisfatório. As reduções do primeiro modo apresentaram uma variação de cerca de 2 a 3%, resultado também satisfatório, visto que 90,65% de redução do primeiro modo é um ótimo resultado em termos de atenuação de vibração. As cargas elétricas total também apresentaram pequenas variações. Logo, a partir dos resultados da Tabela 6.1, pode-se notar que o controle apresenta robustez com a presença de variações na matriz dinâmica.

6.1.2 Resultados numéricos controle *Fuzzy*

Os resultados numéricos obtidos a partir do controle *Fuzzy* foram analisados assim como no controle Ótimo, logo foram analisadas as repostas numéricas: do sistema em domínio do tempo, da resposta no domínio da frequência, das correntes elétricas utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos e das cargas elétricas totais dos atuadores eletromagnéticos.

A resposta numérica do deslocamento a partir da aplicação do controle *Fuzzy* é apresentada na Figura 6.5.

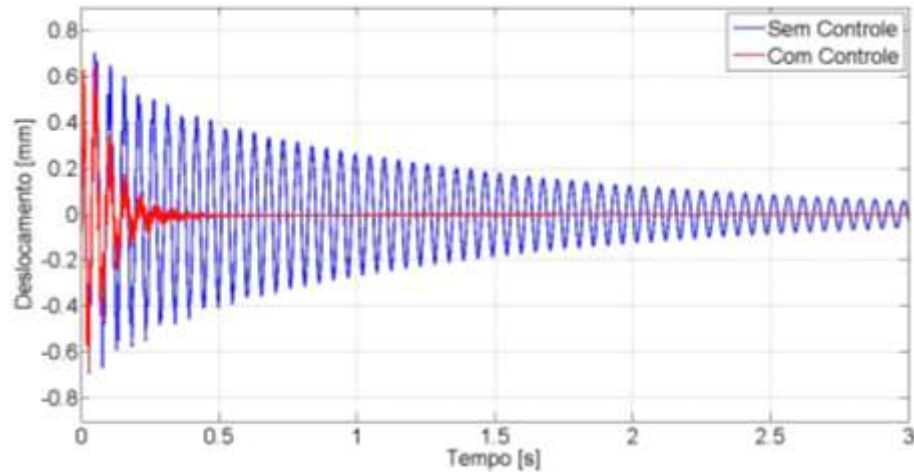


Figura 6.5 – Resposta numérica no domínio do tempo (controle *Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

Como visto da Figura 6.5, o controle *Fuzzy* estabilizou o deslocamento num tempo de acomodação de aproximadamente 0,5 [s], resultado similar ao do controle Ótimo, mostrando assim, a eficiência do controle *Fuzzy* em termos de atenuação de vibrações.

É obtida então, a resposta no domínio da frequência numérica para análise do comportamento do sistema, a qual é apresentada pela Figura 6.6.

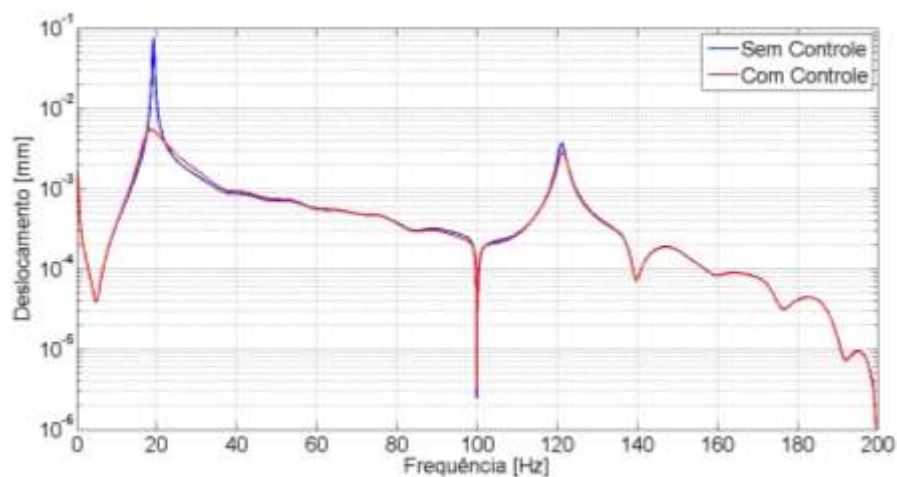


Figura 6.6 – Resposta numérica no domínio da frequência (controle *Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 6.6, o primeiro modo de vibrar apresentou uma atenuação considerável, cerca de 0,0687 [mm], equivalente a 92,63% de redução no primeiro

modo.

As correntes utilizadas por cada atuador eletromagnético (AEM1 e AEM2) são apresentadas na Figura 6.7. A partir das respostas das correntes em domínio do tempo é analisado a carga elétrica total utilizadas por cada atuador eletromagnético. É calculada então a área da curva gerada pelas correntes, conforme o gráfico apresentado na Figura 6.8, logo este valor indica a carga elétrica total.

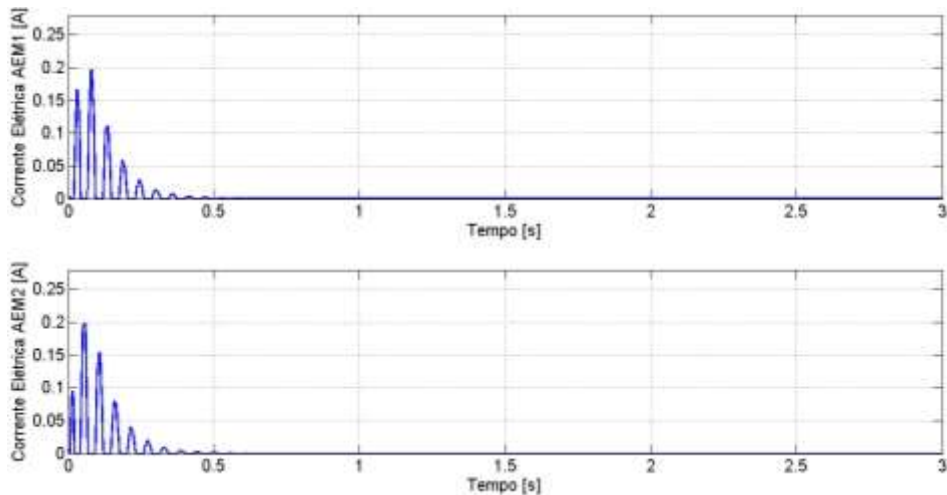


Figura 6.7 – Corrente elétrica numérica (controle *Fuzzy*)
 Fonte: Autoria própria.

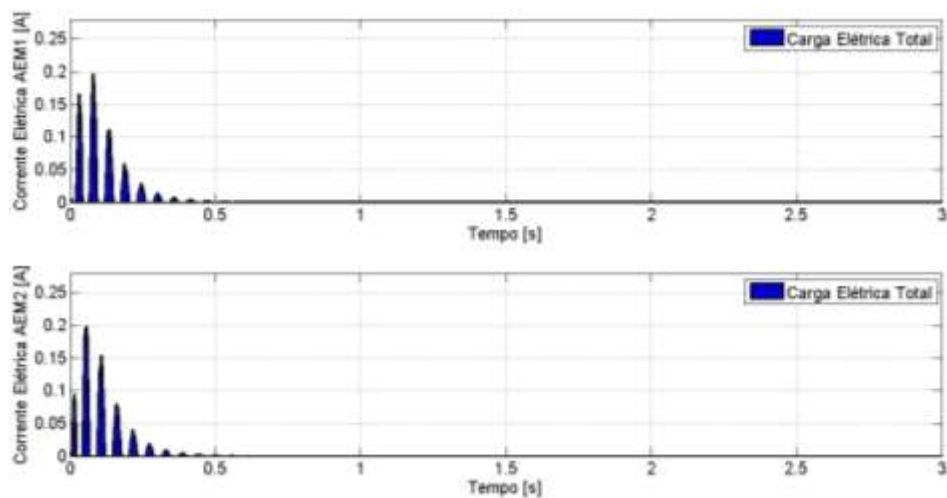


Figura 6.8 – Carga elétrica numérica (controle *Fuzzy*)
 Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6.7 observa-se que as correntes elétricas acompanham o deslocamento até a estabilização do sistema. Os maiores picos de corrente se

encontram em torno de 0,2 [A] em cada atuador eletromagnético.

As áreas dos gráficos das correntes elétricas da Figura 6.8, sendo estas a carga elétrica total de cada atuador, correspondem a 0,0098 [C] para o AEM1 e 0,0092 [C] para o AEM2.

Para a análise da robustez do controle *Fuzzy*, também foi considerada uma variação de -20% a +20% na matriz dinâmica [A], num intervalo de 5%. Os resultados obtidos em cada simulação são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Resultados numéricos da variação na matriz dinâmica (Controle *Fuzzy*)

Variação na matriz[A]	Tempo de acomodação	Redução do 1º modo	Carga Elétrica Total AEM1	Carga Elétrica Total AEM2
+20%	0,63 [s]	91,02%	0,0087 [C]	0,0082 [C]
+15%	0,59 [s]	91,66%	0,0087 [C]	0,0081 [C]
+10%	0,57 [s]	92,23%	0,0088 [C]	0,0082 [C]
+ 5%	0,56 [s]	92,66%	0,0091 [C]	0,0085 [C]
0%	0,57 [s]	92,63%	0,0098 [C]	0,0092 [C]
- 5%	0,64 [s]	91,79%	0,0110 [C]	0,0104 [C]
- 10%	0,79 [s]	90,21%	0,0125 [C]	0,0118 [C]
- 15%	0,99 [s]	87,94%	0,0143 [C]	0,0136 [C]
- 20%	1,34 [s]	84,72%	0,0165 [C]	0,0157 [C]

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 6.2, o tempo de acomodação apresenta uma maior variação em cerca de 0,81 [s], na qual pode ser vista como uma variação aceitável, pois o tempo de acomodação de 1,34 [s] é um tempo eficaz em termos de atenuação de vibrações. As reduções no primeiro modo apresentaram uma variação de aproximadamente 8%. A menor redução do pico, sendo de 84,72% é um resultado bastante satisfatório e eficiente. As cargas elétricas totais apresentaram pequenas variações. Logo, a partir dos resultados da Tabela 6.2, pode-se notar que o controle *Fuzzy* apresenta robustez com a presença de variações na matriz dinâmica.

6.1.3 Resultados numéricos controle *Neuro-Fuzzy*

Os resultados numéricos obtidos a partir do controle *Neuro-Fuzzy* foram

analisados assim como no controle Ótimo e no controle *Fuzzy*. Como o controle *Neuro-Fuzzy* é projetado a partir de dados de treinamento do controle Ótimo, as respostas de ambos os controladores são similares.

O deslocamento do sistema utilizando o *Neuro-Fuzzy* é apresentado na Figura 6.9.

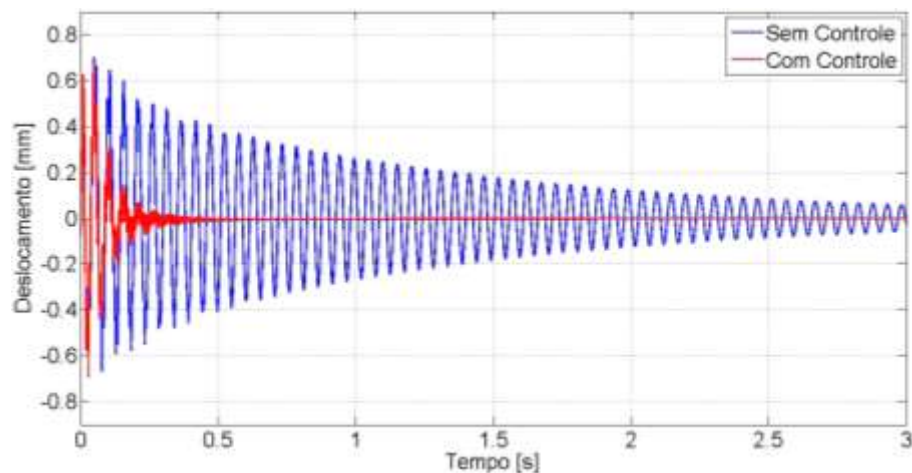


Figura 6.9 – Resposta numérica no domínio do tempo (controle *Neuro-Fuzzy*)

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6.9 observa-se a estabilização do sistema num tempo de acomodação de aproximadamente 0,5 [s], resultado similar aos do controle Ótimo, e controle *Fuzzy*, logo o controle *Neuro-Fuzzy* apresenta eficiência na atenuação de vibrações.

A resposta no domínio da frequência numérica é apresentada pela Figura 6.10. A resposta é obtida para análise da redução do primeiro modo, visto que o controle foi projetado para o controle do primeiro modo de vibrar.

Em seguida, as correntes elétricas utilizadas por cada atuador eletromagnético (AEM1 e AEM2) são apresentadas na Figura 6.11.

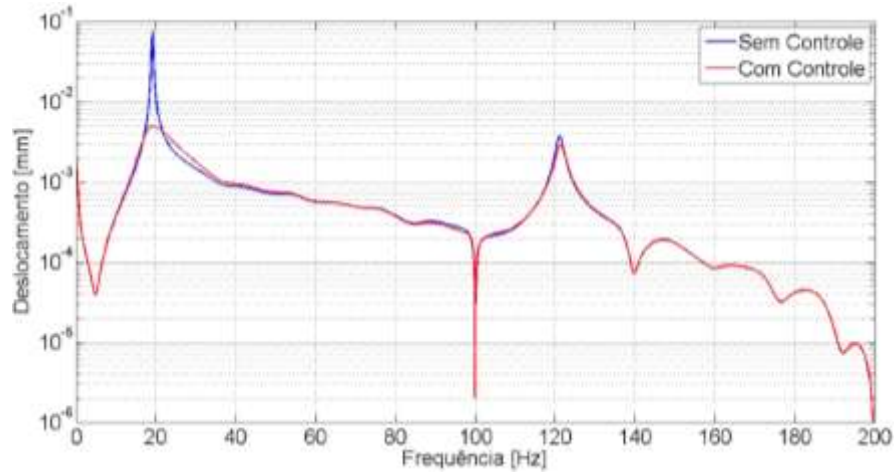


Figura 6.10 – Resposta numérica no domínio da frequência (controle *Neuro-Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

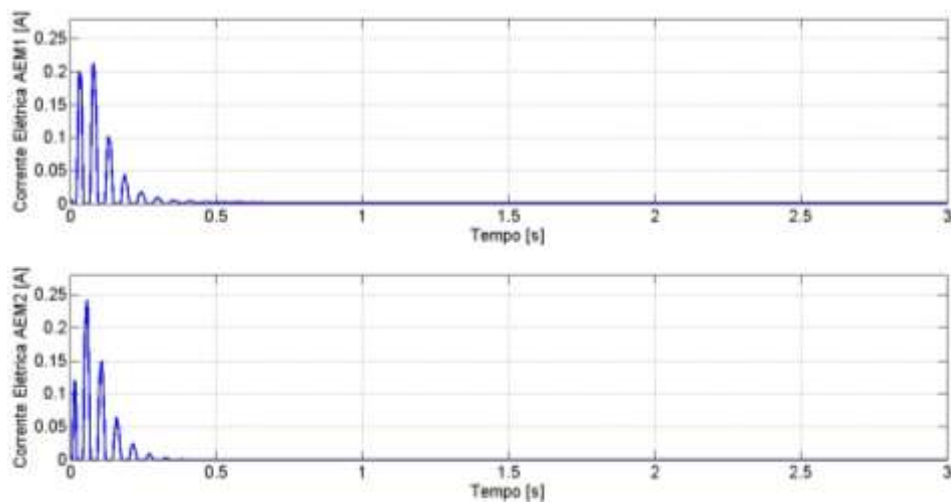


Figura 6.11 – Corrente elétrica numérica (controle *Neuro-Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 6.10, o primeiro modo de vibrar apresentou grande atenuação, apresentando uma redução em cerca de 0,0693 [mm], equivalente a 93,42% de redução no primeiro modo.

Na Figura 6.11 observa-se o acompanhamento das correntes elétricas junto ao deslocamento até a estabilização do sistema. Os maiores picos de corrente se encontram em torno de 0,2 a 0,25 [A].

As cargas elétricas totais de cada atuador eletromagnético são calculadas a partir da área das curvas geradas pelas correntes elétricas, mostradas na Figura 6.12.

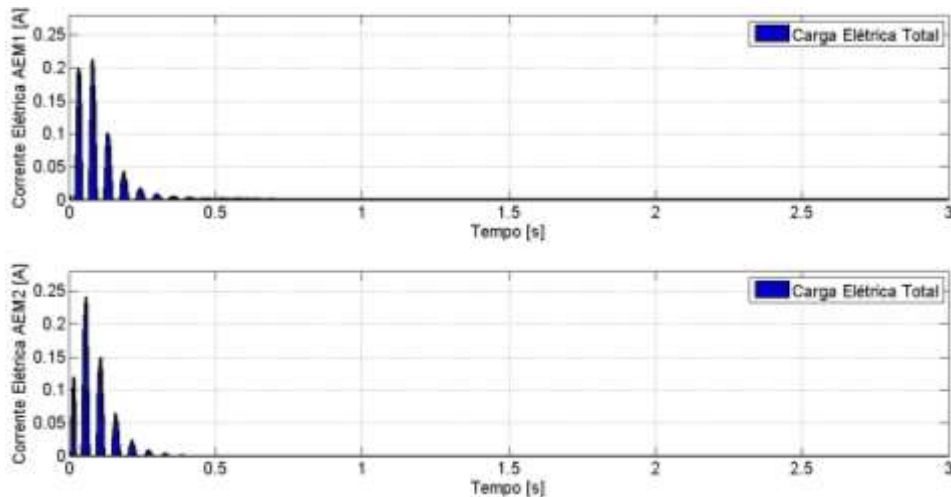


Figura 6.12 – Carga elétrica numérica (controle *Neuro-Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

As cargas elétricas totais de cada atuador obtidas pela área do gráfico da Figura 6.12, foram cerca de 0,0110 [C] para o AEM1 e 0,0087 [C] para o AEM2.

Para a análise da robustez do controle *Neuro-Fuzzy*, também foi considerado uma variação de -20% a +20% na matriz dinâmica $[A]$, num intervalo de 5%. Os resultados obtidos em cada simulação são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Resultados numéricos da variação na matriz dinâmica (Controle *Neuro-Fuzzy*)

Varição na matriz $[A]$	Tempo de acomodação	Redução do 1º modo	Carga Elétrica Total AEM1	Carga Elétrica Total AEM2
+20%	0,62 [s]	91,31%	0,0108 [C]	0,0089 [C]
+15%	0,60 [s]	92,02%	0,0106 [C]	0,0087 [C]
+10%	0,59 [s]	92,67%	0,0106 [C]	0,0085 [C]
+ 5%	0,57 [s]	93,20%	0,0106 [C]	0,0084 [C]
0%	0,56 [s]	93,42%	0,0110 [C]	0,0087 [C]
- 5%	0,63 [s]	93,13%	0,0116 [C]	0,0091 [C]
- 10%	0,91 [s]	92,50%	0,0123 [C]	0,0097 [C]
- 15%	1,09 [s]	91,66%	0,0131 [C]	0,0103 [C]
- 20%	1,28 [s]	90,66%	0,0139 [C]	0,0110 [C]

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 6.3, o maior tempo de acomodação é em cerca de 1,28 [s], um tempo considerável eficaz em termos de atenuação de vibrações. As reduções no primeiro modo apresentaram uma variação em cerca de 2 a 3%, sendo a menor redução em 90,66%, uma redução bastante expressiva do primeiro modo. As cargas

elétricas totais apresentaram pequenas variações. Logo, a partir dos resultados da Tabela 6.3, pode-se notar que o controle *Neuro-Fuzzy* apresenta robustez com a presença de variações na matriz dinâmica.

6.1.4 Comparativo dos resultados numéricos obtidos

A Figura 6.13 apresenta as respostas do sistema considerando a aplicação de cada controlador e sem a aplicação dos mesmos.

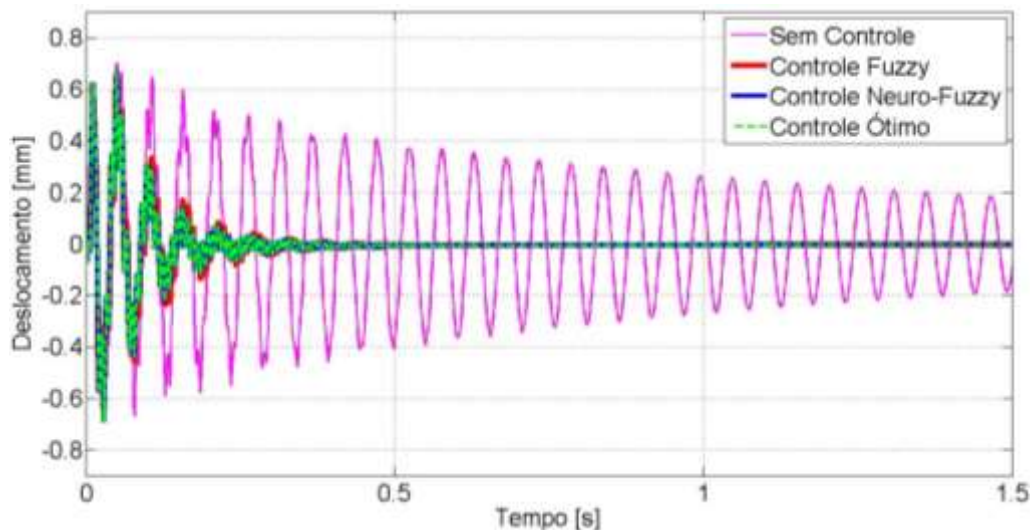


Figura 6.13 – Respostas numéricas no domínio do tempo
Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 6.16, os deslocamentos apresentaram a atenuação de vibração num mesmo tempo de acomodação, em cerca de 0,5 [s]. O controle *Fuzzy* apresentou alguns picos maiores em relação aos dos controladores Ótimo e *Neuro-Fuzzy*.

As respostas no domínio da frequência são apresentadas na Figura 6.14.

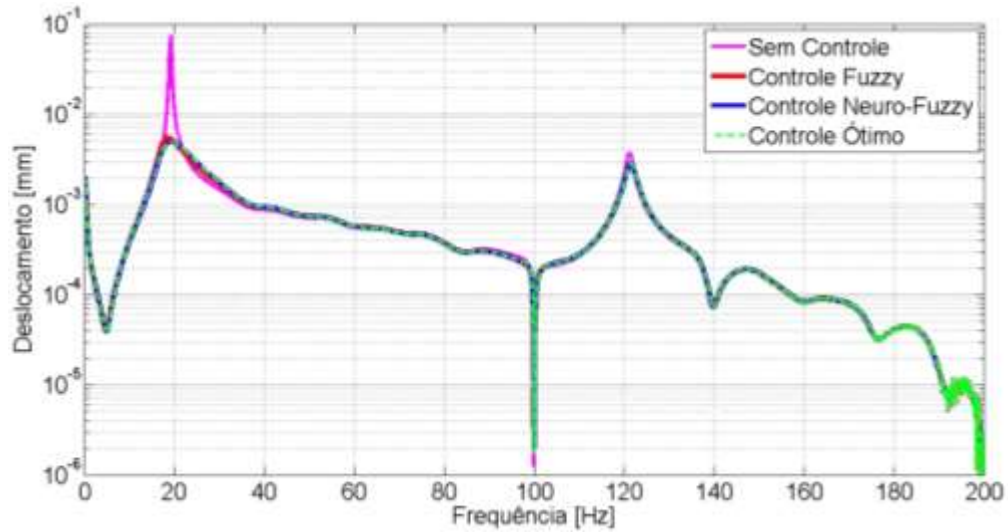


Figura 6.14 – Respostas numéricas no domínio da frequência
Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 6.14, todos os controladores apresentaram atenuações expressivas do primeiro modo. O Controle *Fuzzy* apresentou uma mínima diferença em relação aos outros controladores, onde o mesmo atenuou o primeiro modo em cerca de 92,63% e os outros em 93,42%.

As correntes elétricas utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos (AEM1 e AEM2) na aplicação de cada controlador, são apresentadas na Figura 6.15.

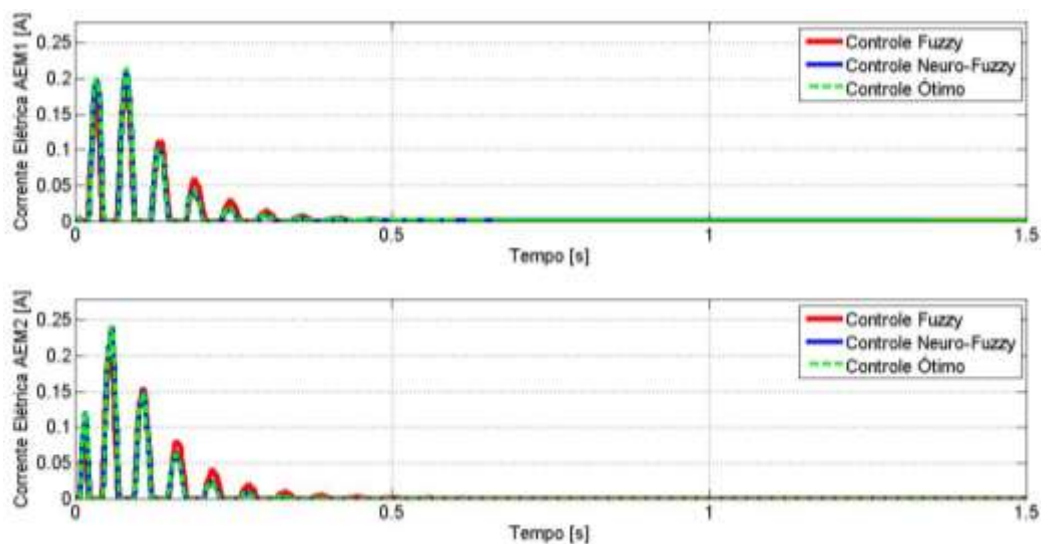


Figura 6.15 – Respostas numéricas das correntes elétricas.
Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 6.15, as correntes elétricas dos controles Ótimo e *Neuro-Fuzzy* apresentaram os maiores picos em relação ao controle *Fuzzy* em até 0,1 [s], e nos segundos em diante o controle *Fuzzy* apresentou maiores picos em relação aos mesmos.

A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos por cada controlador, em termos de tempo de acomodação, da redução do primeiro modo e das cargas elétricas totais de cada atuador eletromagnético.

Tabela 6.4 – Resultados obtidos nas simulações numéricas

Controlador	Tempo de acomodação	Redução do 1º modo	Carga Elétrica Total AEM1	Carga Elétrica Total AEM1
Ótimo	0,56 [s]	93,42%	0,0110 [C]	0,0087 [C]
<i>Fuzzy</i>	0,57 [s]	92,63%	0,0098 [C]	0,0092 [C]
<i>Neuro-Fuzzy</i>	0,56 [s]	93,42%	0,0110 [C]	0,0087 [C]

Fonte: Autoria Própria.

6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a validação dos resultados obtidos nas simulações numéricas, foi realizado o controle experimental conforme a metodologia mencionada na Seção 5.6.

Serão apresentados os mesmos resultados analisados nas simulações numéricas, sendo eles: as respostas no domínio do tempo, as respostas no domínio da frequência, as correntes elétricas utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos e as cargas elétricas totais utilizadas pelos controladores. E também as respostas obtidas com a variação de -20% a 20% na matriz dinâmica [A], a fim de analisar a robustez dos controladores.

6.2.1 Resultados experimentais controle Ótimo

A resposta experimental do sistema com a aplicação do controle Ótimo é apresentada na Figura 6.16. Na Figura 6.16 também é apresentada a resposta

experimental do sistema sem aplicação de controle.

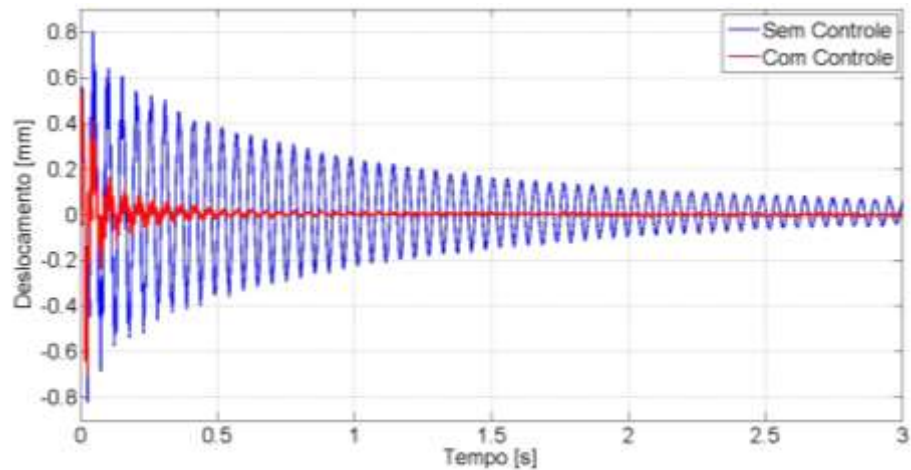


Figura 6.16 – Resposta experimental no domínio do tempo (controle Ótimo)
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6.16 observa-se a estabilização do sistema num tempo de acomodação de aproximadamente 1,0 [s], onde no intervalo entre 0,5 a 1,0 [s] há presença de pequenas oscilações até a estabilização do sistema, o que pode ser proveniente da presença ruídos externos.

Para uma melhor avaliação dos resultados, a Figura 6.17 apresenta a comparação dos resultados numérico e experimental.

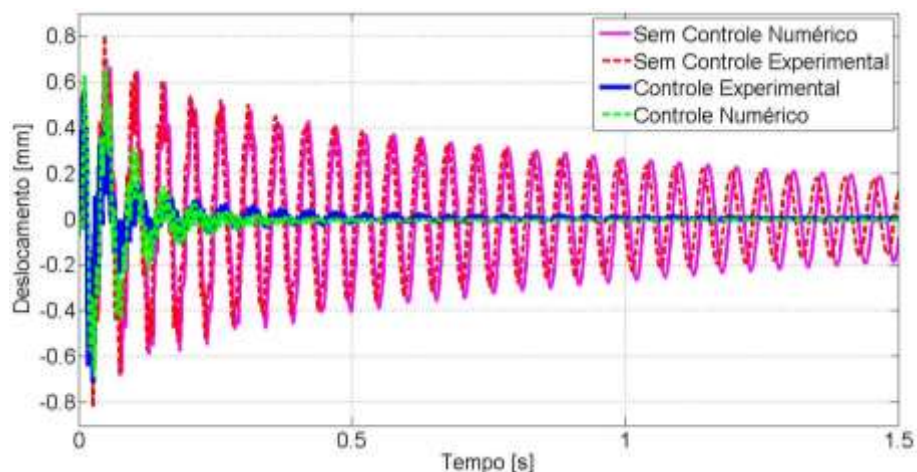


Figura 6.17 – Comparação das respostas numérica e experimental (controle Ótimo)
Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 6.17, os resultados do controle experimental comparados aos resultados do controle numérico são aproximados, havendo apenas pequenas oscilações na resposta do controle experimental. Como os resultados no controle experimental são muito próximos aos resultados do controle numérico, pode-se dizer que as metodologias propostas tanto para o controle numérico quanto para o controle experimental são eficazes, onde ambas foram eficientes na atenuação do deslocamento da viga de material compósito, num tempo de acomodação de 0,5 a 1,0 [s].

A resposta no domínio da frequência experimental obtida a partir da aplicação do controle ótimo e sem a aplicação do controle é apresentada na Figura 6.18, para a análise da redução do primeiro modo de vibrar.

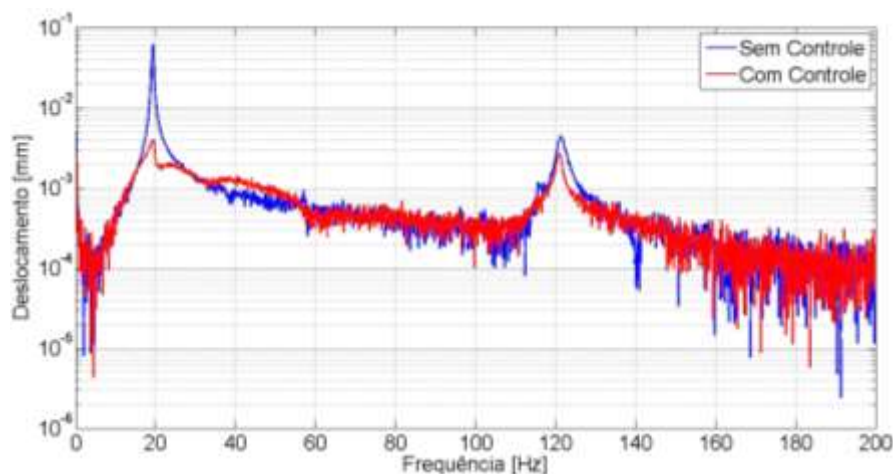


Figura 6.18 – Resposta experimental no domínio da frequência (controle Ótimo)

Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 6.18, o primeiro modo de vibrar apresentou uma expressiva atenuação em cerca de 0,0576 [mm], equivalente a 93,54% de redução no primeiro modo.

A comparação dos resultados das funções respostas em frequência do controle experimental e do controle numérico são apresentadas na Figura 6.19.

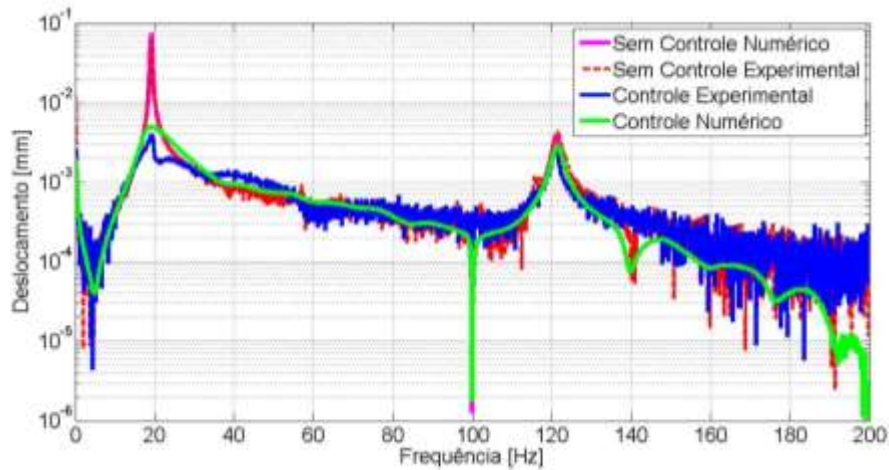


Figura 6.19 – Comparação das respostas experimentais no domínio da frequência (controle Ótimo)
 Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 6.19, o controle experimental e o controle numérico apresentaram resultados aproximados, onde ambos foram eficazes na atenuação do primeiro modo.

As correntes utilizadas por cada atuador eletromagnético, sendo estas requeridas conforme a resposta do deslocamento, são apresentadas na Figura 6.20.

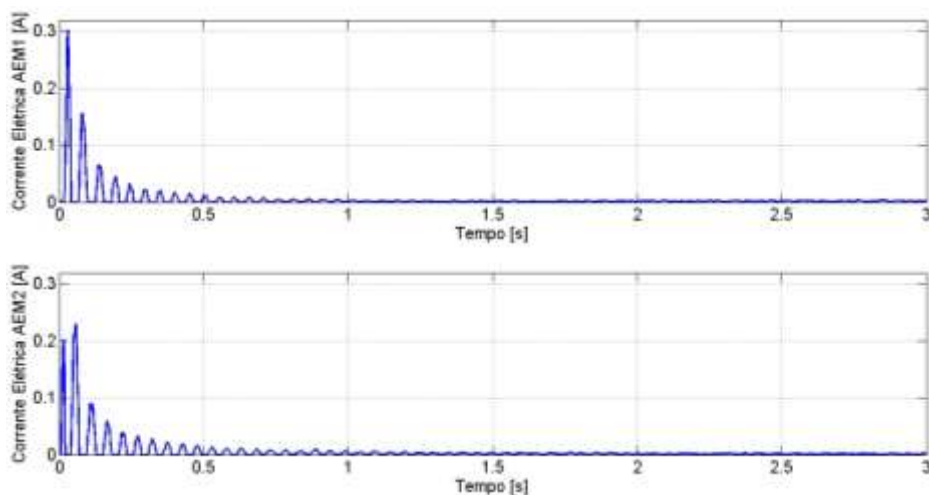


Figura 6.20 – Corrente elétrica experimental (controle Ótimo)
 Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6.20 observa-se que os maiores valores das correntes elétricas são em torno de 0,25 a 0,30 [A], onde os mesmos correspondem aos instantes dos

maiores deslocamentos.

A comparação dos resultados das correntes elétricas utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos do controle experimental e do controle numérico são apresentadas na Figura 6.21.

As cargas elétricas totais do controle experimental de cada atuador eletromagnético são calculadas a partir da área das curvas geradas pelas correntes elétricas, conforme a Figura 6.22.

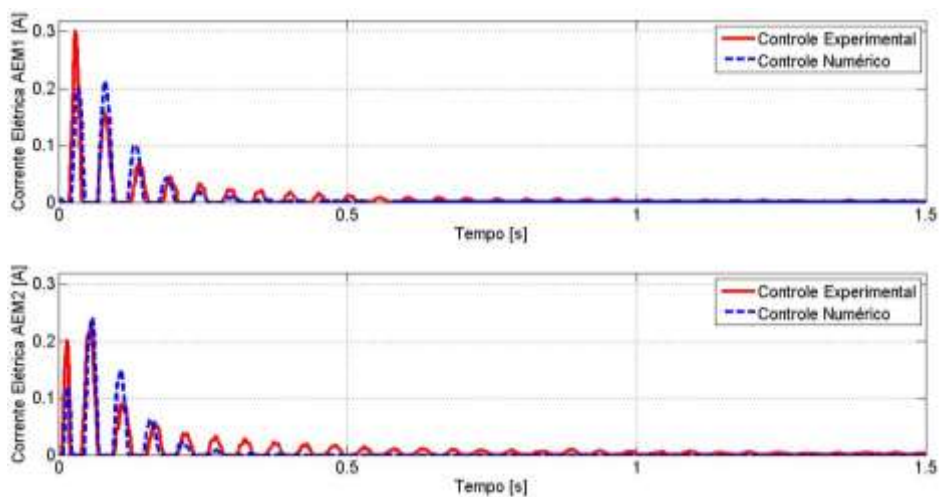


Figura 6.21 – Comparação das correntes elétricas numérica e experimental (controle Ótimo)
Fonte: Autoria própria.

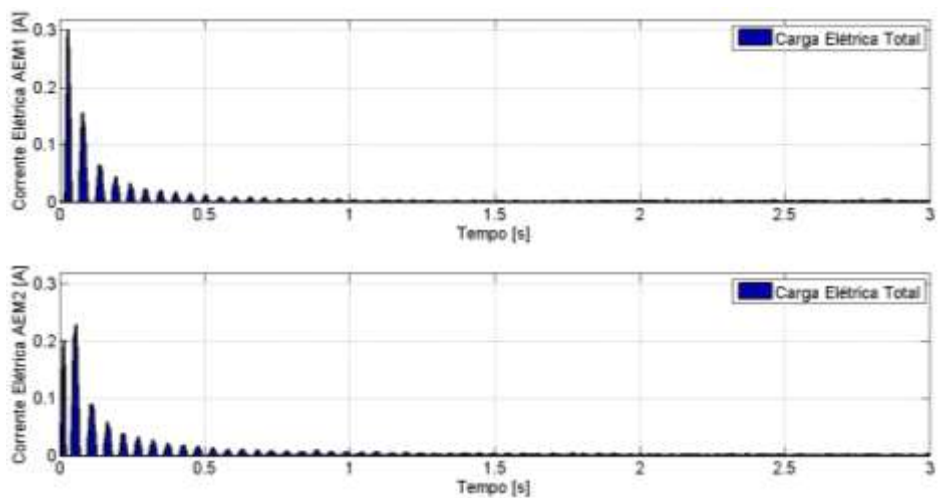


Figura 6.22 – Carga elétrica experimental (controle Ótimo)
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6.21 observa-se que há pequenas diferenças nos picos das correntes elétricas, sendo os maiores picos do controle numérico em 0,25 [A] e do controle experimental em 0,30 [A].

As cargas elétricas totais de cada atuador obtidas pela área do gráfico da Figura 6.22, foram cerca de 0,0259 [C] para o AEM1 e 0,0337 [C] para o AEM2.

Os resultados obtidos com a variação de -20% a +20% na matriz dinâmica[A], num intervalo de 5% são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Resultados experimentais da variação na matriz dinâmica (Controle Ótimo)

Variação na matriz [A]	Tempo de acomodação	Redução do 1º modo	Carga Elétrica Total AEM1	Carga Elétrica Total AEM2
+20%	1,30 [s]	91,58%	0,0259 [C]	0,0337[C]
+15%	1,13 [s]	92,22%	0,0252 [C]	0,0350 [C]
+10%	1,05 [s]	92,94%	0,0194 [C]	0,0415 [C]
+ 5%	0,98 [s]	93,29%	0,0209 [C]	0,0357 [C]
0%	0,93 [s]	93,54%	0,0261 [C]	0,0271 [C]
- 5%	0,97 [s]	93,42%	0,0229 [C]	0,0302 [C]
- 10%	0,98 [s]	92,92%	0,0207 [C]	0,0336 [C]
- 15%	0,99 [s]	92,84%	0,0296 [C]	0,0269 [C]
- 20%	1,07 [s]	91,65%	0,0261 [C]	0,0310 [C]

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 6.5, a maior variação do tempo de acomodação é em cerca de 0,37 [s], consideravelmente pequena, visto que o tempo de acomodação de 1,30 [s] é eficaz em termos de atenuação de vibração. As reduções no primeiro modo apresentaram uma variação em cerca de 2%, sendo a menor redução em 91,58%, uma redução bastante expressiva do primeiro modo. As cargas elétricas totais apresentaram pequenas variações. Logo, a partir dos resultados da Tabela 6.5, pode-se notar que o controle experimental do controle Ótimo apresentou resultados robustos com a presença de variações na matriz dinâmica.

6.2.2 Resultados experimentais controle *Fuzzy*

A resposta experimental do sistema a partir da aplicação do controle *Fuzzy* é

apresentada na Figura 6.23.

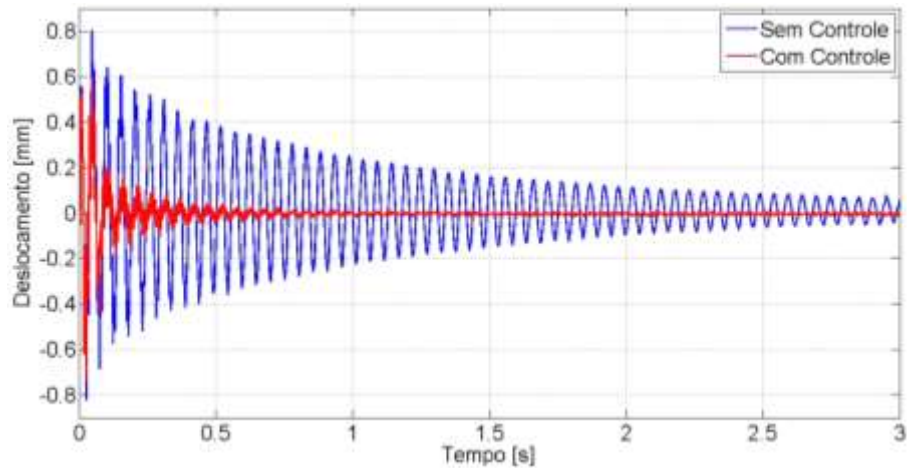


Figura 6.23 – Resposta experimental no domínio do tempo (controle *Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

Como visto da Figura 6.23, o controle *Fuzzy* estabilizou o deslocamento num tempo de acomodação de aproximadamente 1,0 [s], onde também apresentou no intervalo entre 0,5 a 1,0 [s] presença de pequenas oscilações até a estabilização do sistema, o que também pode ser proveniente da presença ruídos externos.

A Figura 6.24 apresenta a comparação dos resultados do deslocamento do controle experimental com os resultados do controle numérico.

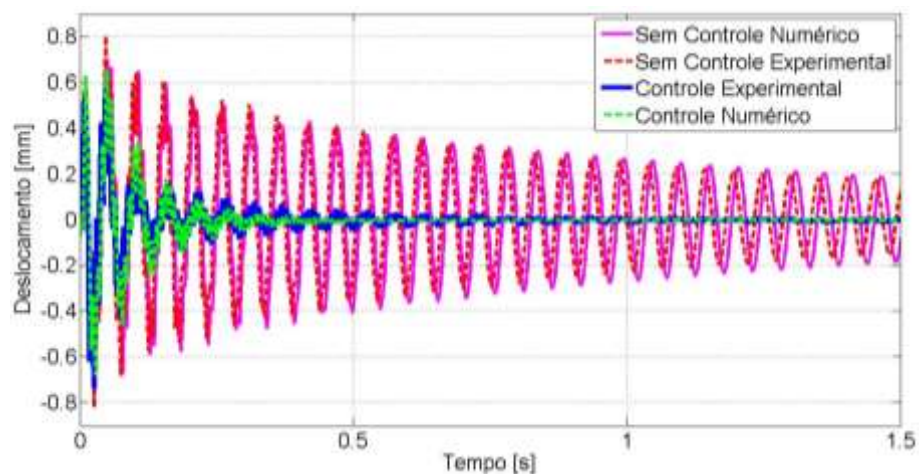


Figura 6.24 – Comparação das respostas numérica e experimental (controle *Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 6.24, os resultados obtidos no controle experimental comparados aos resultados do controle numérico apresentaram certa similaridade, onde no resultado do controle experimental há apenas pequenas oscilações na resposta. Como no controle Ótimo, o controle *Fuzzy* se mostra eficaz na atenuação do deslocamento da viga de material compósito, atenuando a viga em um tempo de acomodação de 0,5 a 1,0 [s].

A resposta no domínio da frequência experimental a partir da aplicação do controle *Fuzzy* é apresentada na Figura 6.25.

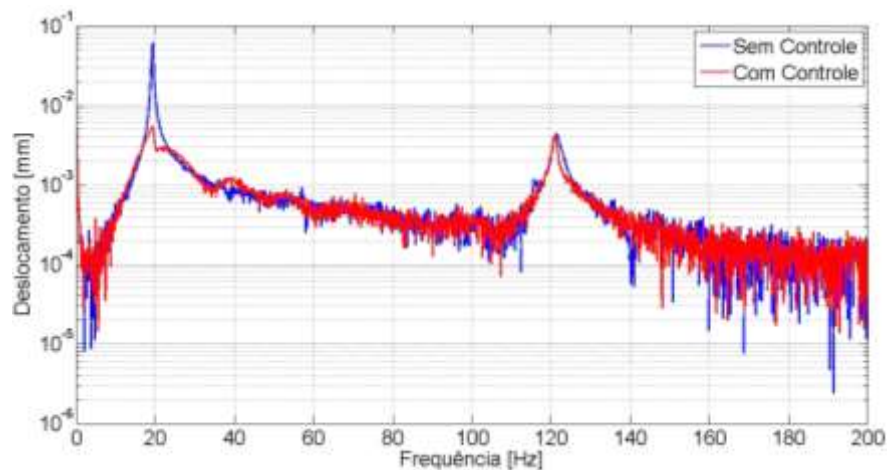


Figura 6.25 – Resposta experimental no domínio da frequência (controle *Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 6.25, observa-se a atenuação expressiva do primeiro modo vibrar, cerca de 0,0562 [mm], equivalente a 91,31% de redução do primeiro modo.

Os resultados das funções respostas em frequência do controle experimental e do controle numérico são apresentadas na Figura 6.26.

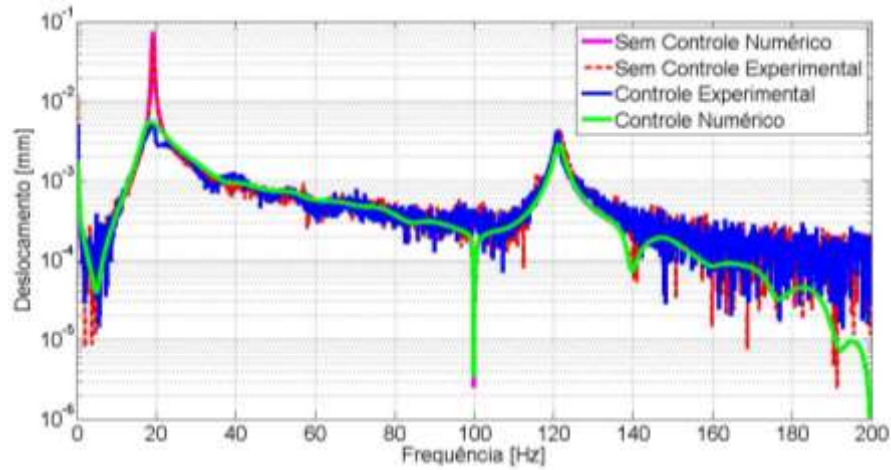


Figura 6.26 – Comparação das respostas experimentais no domínio da frequência (controle *Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 6.26, o controle experimental e o controle numérico foram eficazes na atenuação do primeiro modo, onde ambos apresentaram resultados aproximados.

As correntes elétricas utilizadas por cada atuador eletromagnético, são apresentadas na Figura 6.27.

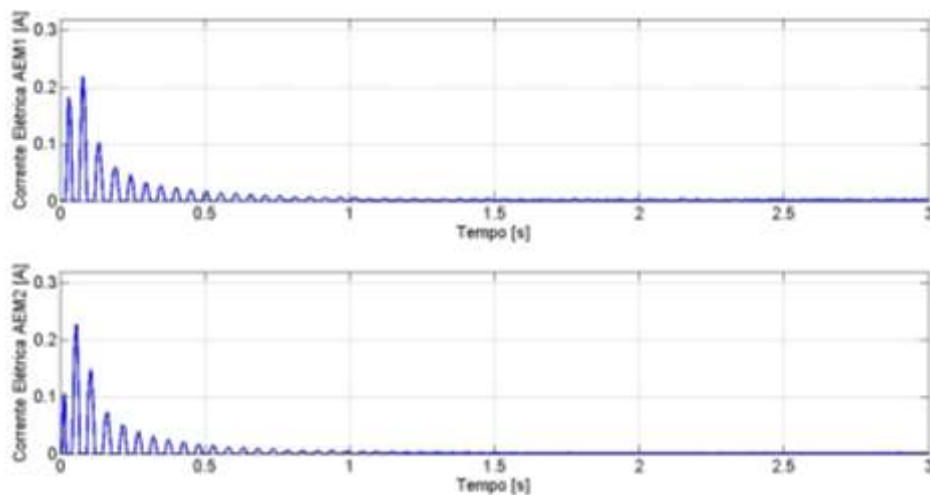


Figura 6.27 – Corrente elétrica experimental (controle *Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

As correntes elétricas conforme a Figura 6.27, apresentaram maiores picos em torno de 0,25 [A], e é possível observar que as correntes elétricas são requeridas

até a estabilização da viga.

Os resultados das correntes elétricas utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos no controle experimental e no controle numérico são apresentados na Figura 6.28.

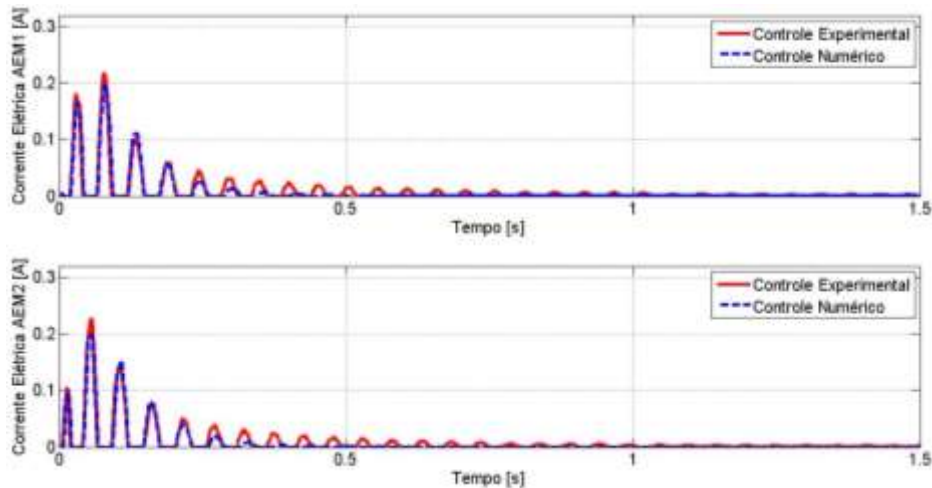


Figura 6.28 – Comparação das correntes elétricas numérica e experimental (controle *Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 6.28, as respostas do controle experimental junto ao do controle numérico apresentaram pequenas variações uma outra, e em alguns picos apresentaram certa coincidência, sendo os maiores picos em 0,20 e 0,25 [A].

As áreas das curvas geradas pelas correntes elétricas do controle experimental são apresentadas na Figura 6.29, onde as mesmas correspondem as cargas elétricas totais de cada atuador eletromagnético.

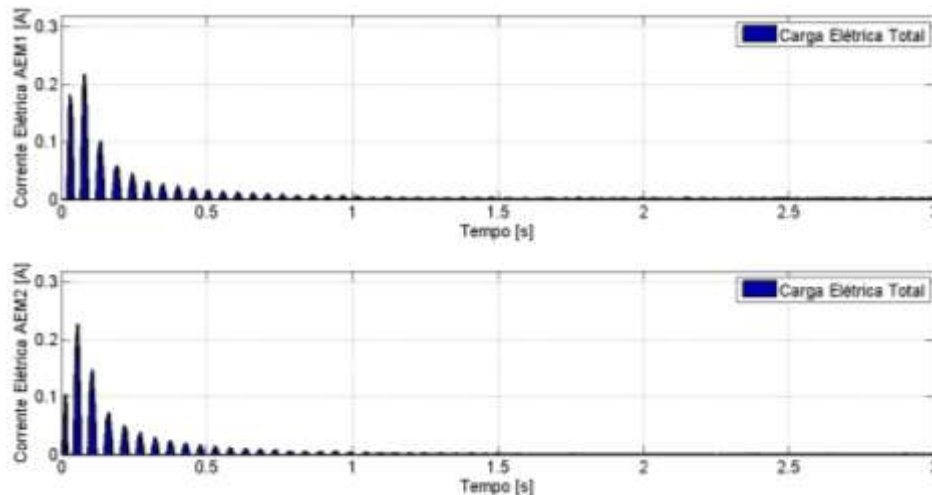


Figura 6.29 – Carga elétrica experimental (controle *Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

As cargas elétricas totais de cada atuador obtidas pela área do gráfico da Figura 6.29, foram cerca de 0,0226 [C] para o AEM1 e 0,0213 [C] para o AEM2.

Para a análise da robustez do controlador é obtido então, as respostas experimentais da viga, considerando uma variação de -20% a +20% na matriz dinâmica [A], num intervalo de 5%. As respostas do tempo de acomodação, da redução do primeiro modo e das cargas elétricas em cada atuador eletromagnético são apresentadas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Resultados experimentais da variação na matriz dinâmica (Controle *Fuzzy*)

Varição na matriz [A]	Tempo de acomodação	Redução do 1º modo	Carga Elétrica Total AEM1	Carga Elétrica Total AEM2
+20%	1,94 [s]	82,03%	0,0294 [C]	0,0320 [C]
+15%	1,68 [s]	84,96%	0,0267 [C]	0,0284 [C]
+10%	1,40 [s]	87,78%	0,0267 [C]	0,0249 [C]
+ 5%	1,17 [s]	89,84%	0,0233 [C]	0,0242 [C]
0%	0,98 [s]	91,31%	0,0226 [C]	0,0213 [C]
- 5%	1,04 [s]	91,31%	0,0214 [C]	0,0204 [C]
- 10%	1,10 [s]	89,99%	0,0213 [C]	0,0226 [C]
- 15%	1,42 [s]	87,21%	0,0243 [C]	0,0238 [C]
- 20%	1,43 [s]	84,92%	0,0214 [C]	0,0267 [C]

Fonte: Autoria Própria.

Observa-se na Tabela 6.6, que o maior tempo de acomodação é em torno de

1,43 [s], tempo consideravelmente satisfatório em termos de atenuação de vibrações. As reduções no primeiro modo apresentaram uma menor redução em cerca de 84,92%, uma redução bastante expressiva do primeiro modo. As cargas elétricas totais apresentaram pequenas variações. Logo, a partir dos resultados da Tabela 6.6, pode-se notar que o controle experimental do controle *Fuzzy* apresentou resultados robustos com a presença de variações na matriz dinâmica.

6.2.3 Resultados experimentais controle *Neuro-Fuzzy*

Os resultados experimentais obtidos a partir do controle *Neuro-Fuzzy* foram analisados assim como no controle Ótimo e no controle *Fuzzy*.

A resposta experimental do sistema a partir da aplicação do controle *Neuro-Fuzzy* é apresentada na Figura 6.30.

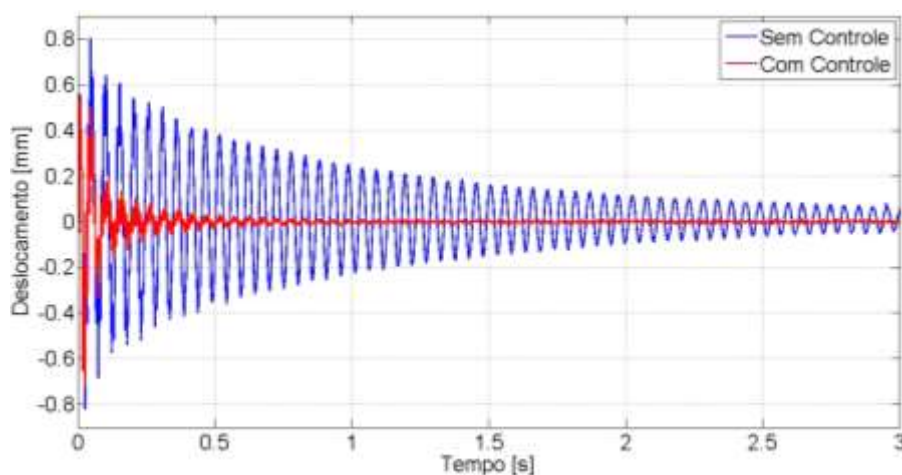


Figura 6.30 – Resposta experimental no domínio do tempo (controle *Neuro-Fuzzy*)

Fonte: Autoria própria.

Como visto da Figura 6.30, o controle *Neuro-Fuzzy* estabilizou o deslocamento num tempo de acomodação de aproximadamente 1,0 [s], onde também apresentou no intervalo entre 0,5 a 1,0 [s] presença de pequenas oscilações até a estabilização do sistema, o que também pode ser proveniente da presença ruídos externos.

Na Figura 6.31 é apresentada a comparação dos resultados do sistema do controle experimental com os resultados do controle numérico.

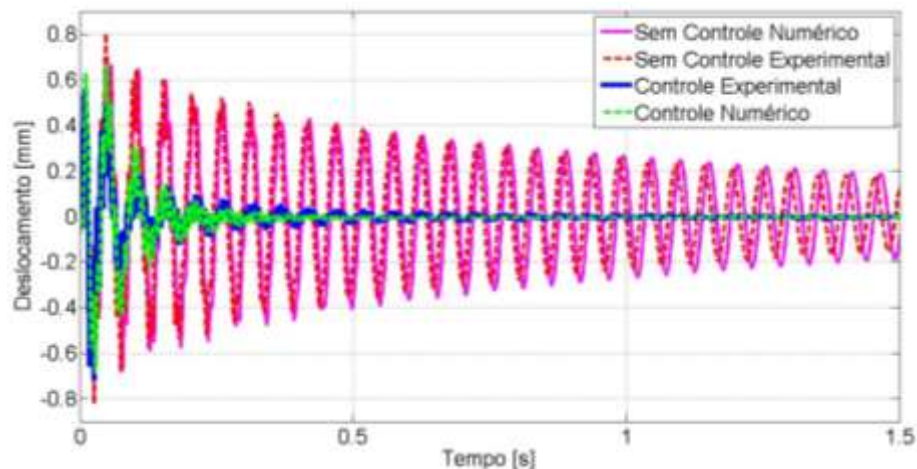


Figura 6.31 – Comparação das respostas numérica e experimental (controle *Neuro-Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6.31, a resposta do controle experimental comparada a resposta do controle numérico apresentou resultados aproximados, onde no resultado do controle experimental há apenas pequenas oscilações na resposta, assim como no controle Ótimo e o controle *Fuzzy*, logo o controle *Neuro-Fuzzy* também se mostra eficaz na atenuação do deslocamento da viga de matéria compósito, atenuando a viga em um tempo de acomodação de 0,5 a 1,0 [s].

A resposta no domínio da frequência experimental obtida a partir da aplicação do controle *Neuro-Fuzzy* é apresentada na Figura 6.32.

As respostas no domínio da frequência do controle experimental e do controle numérico com a aplicação do controle *Neuro-Fuzzy* são apresentadas na Figura 6.33.

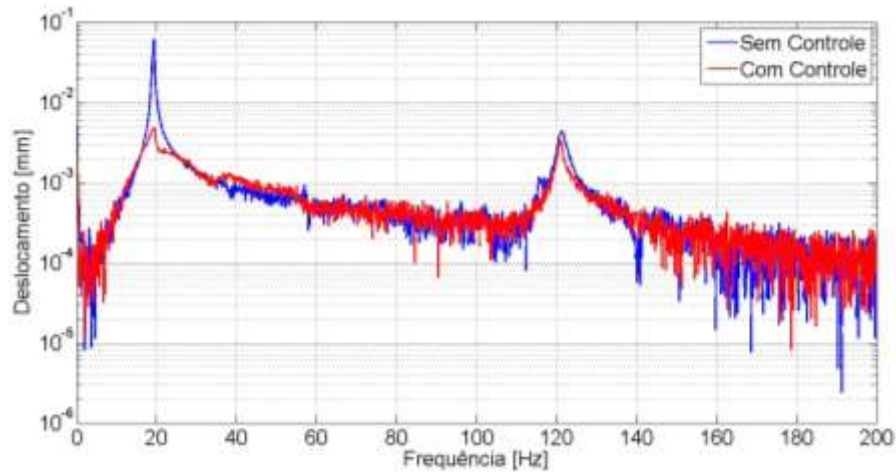


Figura 6.32 – Resposta experimental no domínio da frequência (controle *Neuro-Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

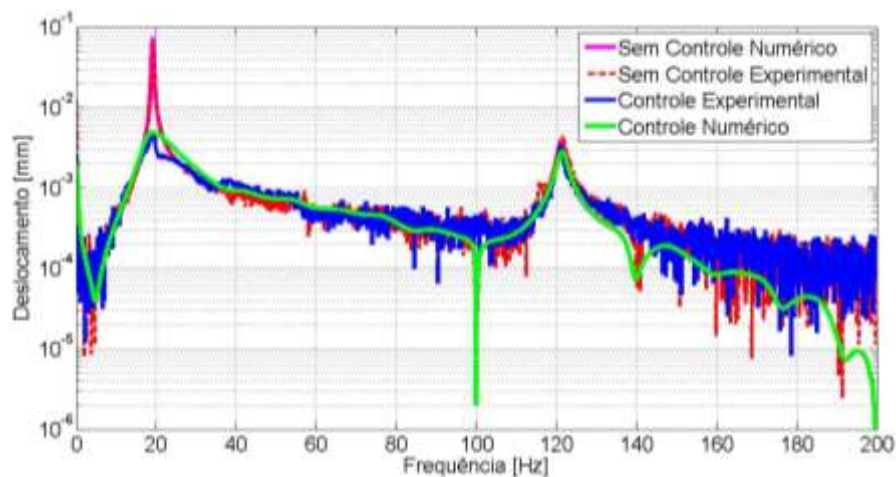


Figura 6.33 – Comparação das respostas experimentais no domínio da frequência (controle *Neuro-Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6.32, observa-se uma atenuação considerável do primeiro modo vibrar, cerca de 0,0568 [mm], equivalente a 92,11% de redução do primeiro modo.

Como visto na Figura 6.33, o controle experimental e o controle numérico apresentaram resultados aproximados, onde ambos foram eficazes na atenuação do primeiro modo.

As correntes elétricas utilizadas por cada atuador eletromagnético, são apresentadas na Figura 6.34 e na Figura 6.35 são apresentadas as correntes elétricas utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos no controle experimental e no controle numérico.

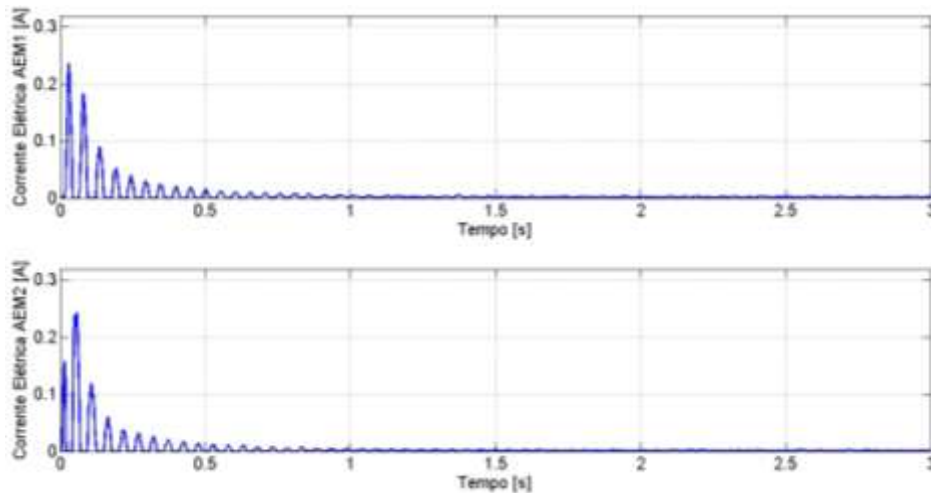


Figura 6.34 – Corrente elétrica experimental (controle *Neuro-Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

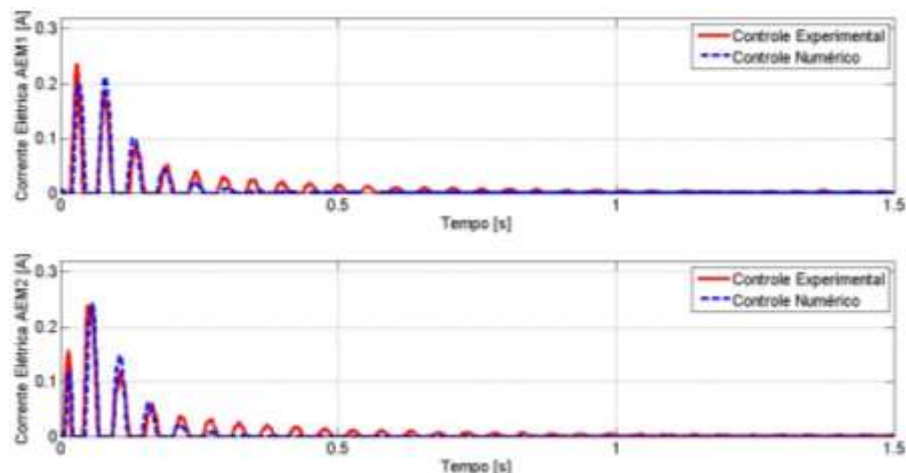


Figura 6.35 – Comparação das correntes elétricas numérica e experimental (controle *Neuro-Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

As correntes elétricas apresentadas na Figura 6.34 são requeridas até a estabilização da viga e apresentaram maiores picos em torno de 0,25 [A].

Conforme a Figura 6.35, as respostas do controle experimental junto ao do controle numérico apresentaram pequenas variações uma outra, sendo os maiores picos em 0,20 e 0,25 [A].

As áreas das curvas geradas pelas correntes elétricas são apresentadas na Figura 6.36, que correspondem as cargas elétricas totais de cada atuador eletromagnético.

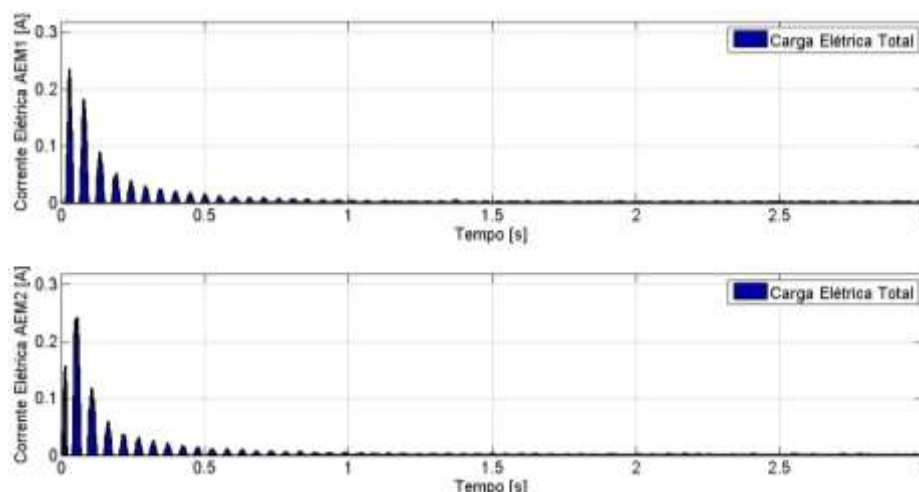


Figura 6.36 – Carga elétrica experimental (controle *Neuro-Fuzzy*)
Fonte: Autoria própria.

As cargas elétricas totais de cada atuador obtidas pela área do gráfico da Figura 6.36, foram cerca de 0,0256 [C] para o AEM1 e 0,0233 [C] para o AEM2.

Para a análise da robustez do controlador é obtido então, as respostas experimentais da viga, considerando uma variação de -20% a +20% na matriz dinâmica [A], num intervalo de 5%. As respostas do tempo de acomodação, da redução do primeiro modo e das cargas elétricas em cada atuador eletromagnético são apresentadas na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Resultados numéricos da variação na matriz dinâmica (Controle *Neuro-Fuzzy*)

Varição na matriz [A]	Tempo de acomodação	Redução do 1º modo	Carga Elétrica Total AEM1	Carga Elétrica Total AEM2
+20%	1,35 [s]	88,47%	0,0328 [C]	0,0262 [C]
+15%	1,21 [s]	89,92%	0,0270 [C]	0,0295 [C]
+10%	1,15 [s]	91,13%	0,0296 [C]	0,0253 [C]
+ 5%	1,11 [s]	91,77%	0,0223 [C]	0,0273 [C]
0%	0,98 [s]	92,21%	0,0256 [C]	0,0233 [C]
- 5%	1,01 [s]	91,40%	0,0235 [C]	0,0269 [C]
- 10%	1,39 [s]	90,22%	0,0276 [C]	0,0252 [C]
- 15%	1,42 [s]	88,57%	0,0233 [C]	0,0315 [C]
- 20%	1,46 [s]	88,11%	0,0242 [C]	0,0308 [C]

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 6.7, a maior tempo de acomodação é de 1,46 [s], o que pode-se dizer que é eficaz em termos de atenuação de vibração. As reduções no primeiro

modo apresentaram uma variação em cerca de 4%, sendo a menor redução em 88,11%, uma redução bastante expressiva do primeiro modo. As cargas elétricas totais apresentaram pequenas variações. Logo, a partir dos resultados da Tabela 6.7, pode-se notar que o controle experimental do controle *Neuro-Fuzzy* apresentou resultados robustos com a presença de variações na matriz dinâmica.

6.2.4 Comparativo dos resultados experimentais obtidos

Para analisar o desempenho dos controladores no controle experimental, foram projetadas graficamente as respostas dos controladores Ótimo, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy* em um mesmo gráfico. A Figura 6.37 apresenta as respostas do sistema experimentais no domínio do tempo.

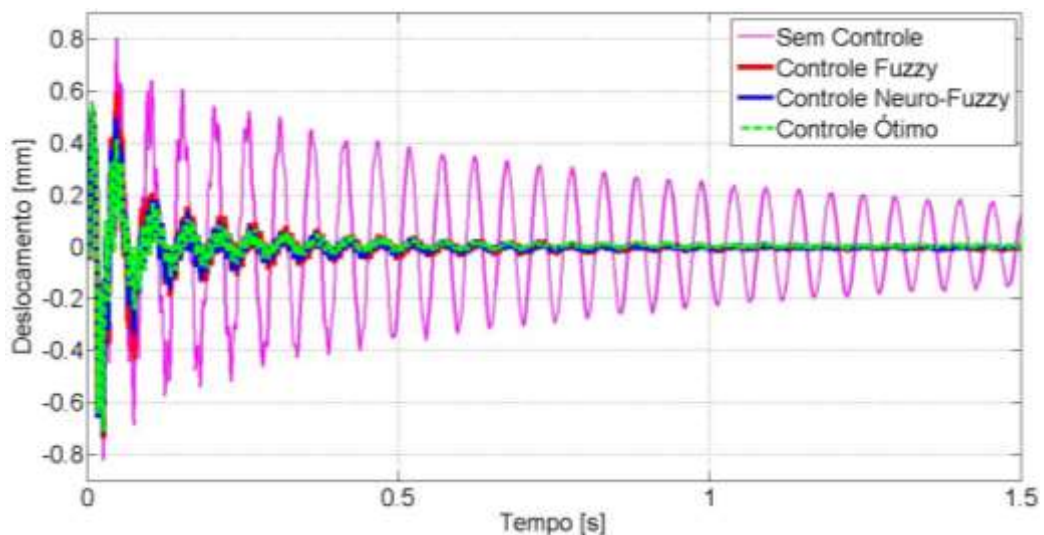


Figura 6.37 – Respostas experimentais no domínio do tempo
 Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 6.37, os deslocamentos apresentaram a atenuação de vibração em um tempo de acomodação de aproximadamente 1,0 [s]. O controle Ótimo apresentou alguns picos menores em relação aos dos controladores *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*.

As respostas no domínio da frequência são apresentadas na Figura 6.38.

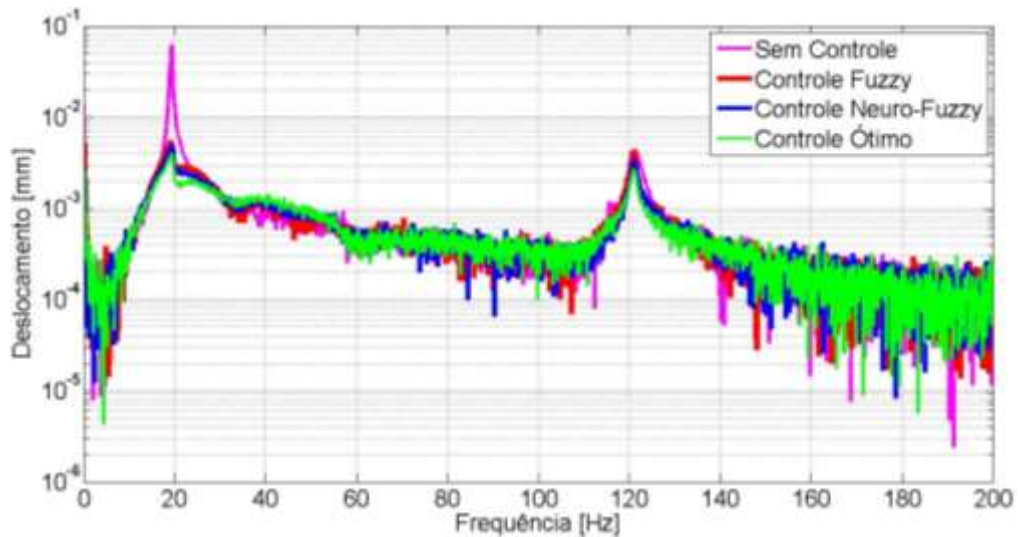


Figura 6.38 – Respostas experimentais no domínio da frequência
Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 6.38, todos os controladores apresentaram atenuações significativas do primeiro modo. O Controle Ótimo apresentou uma melhor atenuação, porém uma mínima diferença em relação aos outros controladores, onde o mesmo atenuou o primeiro modo em cerca de 93,54% e os outros em 91,31% (*Fuzzy*) e 92,21% (*Neuro-Fuzzy*).

As correntes elétricas utilizadas pelos atuadores eletromagnéticos (AEM1 e AEM2) no controle experimental, são apresentadas na Figura 6.39.

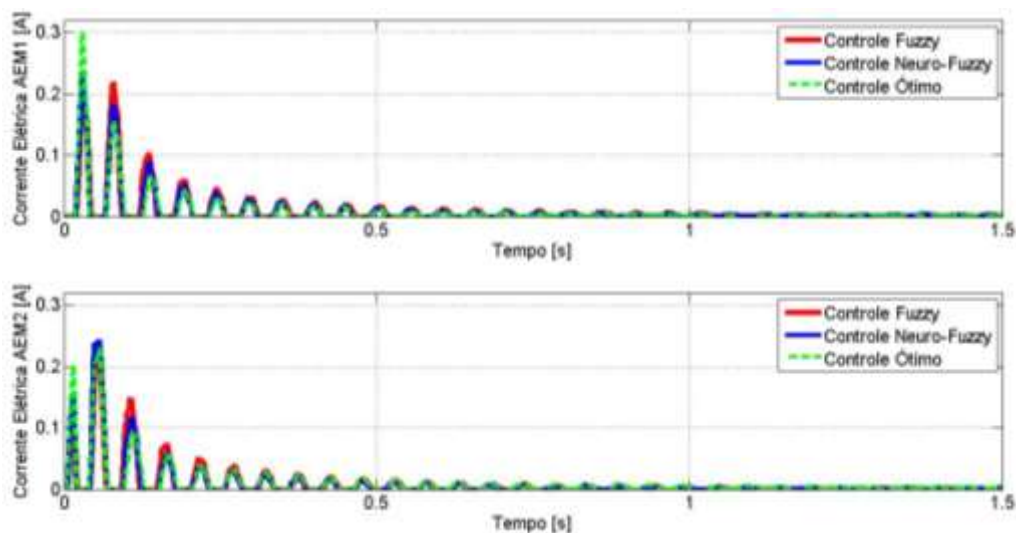


Figura 6.39 – Respostas experimentais das correntes elétricas.
Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 6.39, o controle Ótimo apresentou os maiores picos em relação ao controle *Fuzzy* e ao controle *Neuro-Fuzzy* até o instante de 0.1 [s], e nos segundos em diante o controle *Fuzzy* apresentou maiores picos em relação aos mesmos.

A Tabela 6.8 apresenta os resultados obtidos no controle experimental por cada controlador, em termos de tempo de acomodação, da redução do primeiro modo e das cargas elétricas totais de cada atuador eletromagnético.

Tabela 6.8 – Resultados obtidos no controle experimental

Controle	Tempo de	Redução do	Carga Elétrica	Carga Elétrica
	acomodação	1º modo	Total AEM1	Total AEM1
Ótimo	0,93 [s]	93,54%	0,0261 [C]	0,0271 [C]
<i>Fuzzy</i>	0,98 [s]	91,31%	0,0214 [C]	0,0204 [C]
<i>Neuro-Fuzzy</i>	0,98 [s]	92,21%	0,0256 [C]	0,0233 [C]

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 6.8, nota-se que o controle Ótimo é o controlador que apresentou um menor tempo de acomodação e a maior redução do pico do primeiro modo de vibrar, porém é o controlador que consumiu mais energia elétrica que os demais.

Para uma melhor análise do desempenho dos controladores no controle experimental, é apresentada na Tabela 6.9 os resultados obtidos nas simulações numéricas, junto aos resultados obtidos no controle experimental.

Tabela 6.9 – Resultados obtidos nas simulações numéricas e no controle experimental

	Controle Ótimo		Controle <i>Fuzzy</i>		Controle <i>Neuro-Fuzzy</i>	
	numérico	experimental	numérico	experimental	numérico	experimental
Tempo de acomodação	0,56 [s]	0,93 [s]	0,57 [s]	0,98 [s]	0,56 [s]	0,98 [s]
Redução do 1º modo	93,42%	93,54%	92,63%	91,31%	93,42%	92,21%
Carga Elétrica Total AEM1	0,0110 [C]	0,0261 [C]	0,0098 [C]	0,0214 [C]	0,0110 [C]	0,0256 [C]
Carga Elétrica Total AEM1	0,0087 [C]	0,0271 [C]	0,0092 [C]	0,0204 [C]	0,0087 [C]	0,0233 [C]

Fonte: Autoria Própria.

Com a análise da Tabela 6.9, pode-se dizer que no controle experimental, os controladores Ótimo, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy* apresentaram resultados satisfatórios na atenuação de vibrações da viga de material. A presença de algumas discrepâncias nos resultados pode ser visto como provenientes da presença de ruídos no procedimento experimental.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal a aplicação de diferentes técnicas de controle ativo de vibrações em uma viga de material compósito por meio da utilização de atuadores eletromagnéticos. Para o desenvolvimento do projeto dos controladores, foi necessário a identificação do sistema, o mesmo foi feito através do método de identificação conhecido como ERA/OKID, que retornou os valores das matrizes que representam o comportamento dinâmico da estrutura. Para a atenuação das amplitudes de vibrações da viga de material compósito, foram projetados os controladores Ótimo, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*, na qual foi avaliado o desempenho individual de cada um. Nas simulações numéricas, os controladores se mostraram eficientes, e posteriormente os resultados foram validados através do controle experimental.

A identificação do sistema obtida pelo algoritmo ERA/OKID possibilitou a implementação numérica das técnicas de controle ativo de vibrações no domínio modal, e por meio de simulações numéricas foi possível observar o comportamento dinâmico da estrutura quando submetida a uma excitação.

Primeiramente foram projetados os controladores Ótimo e *Fuzzy* para avaliar o desempenho de cada um no controle de vibrações da viga. Visto que o desempenho do controlador Ótimo foi melhor que o controlador *Fuzzy*, o controle *Neuro-Fuzzy* foi projetado como uma técnica de otimização do controle *Fuzzy*. O controlador *Neuro-Fuzzy* foi então projetado com base no treinamento dos dados obtidos da força de controle do controlador Ótimo.

Nas simulações numéricas e no controle experimental, os controladores foram projetados para a controle do primeiro modo de vibrar da viga.

Nos resultados experimentais, o controlador Ótimo foi quem apresentou os melhores resultados na redução de vibração da viga, com base no tempo de acomodação e na redução do primeiro modo das respostas no domínio da frequência, porém foi o controlador com maior consumo de energia, conforme as respostas das correntes elétricas e da carga elétrica total utilizada por cada atuador eletromagnético. Mesmo o controlador Ótimo sendo o controlador com os melhores resultados obtidos, os controladores *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy* também apresentaram resultados significativos, sendo mínimas as diferenças com o controlador Ótimo.

Nos resultados obtidos no controle experimental notou-se presença de ruídos externos, na qual acredita-se que pode ser obtido melhores resultados com a implementação de filtros e com a isolação do sistema.

Ainda para a análise da robustez dos controladores, foram inseridos uma variação de -20 a +20% na matriz dinâmica, e os resultados obtidos tanto nas simulações numéricas quanto no controle experimental, indicaram robustez nos controladores.

Pode-se concluir que o trabalho contribuiu com o estudo de técnicas de controle ativo de vibração por meio do uso de atuadores eletromagnéticos para o controle de uma viga de material compósito, com foco no projeto de controladores Ótimo, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*. Os desempenhos dos controladores foram validados por meio das simulações numéricas e do controle experimental.

Como sugestão para trabalhos futuros, é interessante buscar novas técnicas de modelagem em materiais compósitos e fazer uma análise de qual método apresenta melhores resultados na modelagem desses materiais. É interessante também a aplicação de técnicas de otimização por métodos heurísticos na aplicação do controle, a fim de buscar um equilíbrio entre a atenuação de vibração e o consumo de energia. Uma outra sugestão seria o desenvolvimento e aplicação dos controladores nos dois primeiros modos de vibrar visto que a presente dissertação apenas aplicou o controle no primeiro modo.

REFERÊNCIAS

ABDEL-MAGID, B. M., LOPES-ANIDO, R. A., SMITH, G., TROFKA, S., **Flexure Creep Properties of E-Glass Reinforced Polymers**. *Composite Structures*, v. 62, n. 3–4, p. 247–253, 2003.

ABREU, G. L. C. M., CONCEIÇÃO, S. M., LOPES, V., BRENNAN, M. J., ALVES, M. T. S., **System Identification and Active Vibration Control of a Flexible Structure**. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 34, p. 386-392, 2012.

AIRBUS, **A350 Family**. 2015. Disponível em: <https://www.airbus.com/search.image.html?q=Airbus+A350+XWB&page=7&results_page_index=2&lang=en#searchresult-image-all-73>. Acesso em: 01 ago. 2019.

ALVES, M. T. S., **Avaliação Numérica e Experimental dos Métodos ERA e ERA/OKID para Identificação de Sistemas Mecânicos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2005.

ALVES, M. T. S., RIBEIRO, J. F., **Identificação de Sistemas Mecânicos Lineares usando o ERA (Eigensystem Realization Algorithm)**. III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém-PA, Brasil, 2004.

ARTERO, A. O., **Inteligência Artificial: teórica e prática**. Ed. Livraria da Física, São Paulo, Brasil, 2009.

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.

BARBOSA, G. F., **Desenvolvimento de um modelo de análise para implantação de automação na manufatura aeronáutica, orientado pelos requisitos das metodologias de Projeto para Excelência (DFX - Design for Excellence) e Produção Enxuta (Lean Manufacturing)**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2012.

BARRACUDA. **Ficha Técnica – Especificação do Produto Sistema de Resina - AR260 Resina Epóxi AH30 Endurecedor Epóxi**. Rio de Janeiro, Barracuda Composites, 2018.

BERNAL, D., GUNES, B., **Performance of an Observer State-Space Identification in the Presence of Mild Nonlinearities**. Proceedings of the American Control Conference, 2000.

BERTHELOT, J. M., **Matériaux Composites, Comportement Mécanique et Analyse des Structures**. Masson, 1992.

BOYD, S.; BALAKRISHNAN, V.; FERON, E.; EL GHAOUI, L., **Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory**. 1994.

BRAUER, J. R., **Magnetic Actuators and Sensor**. Wiley-IEEE Press, 2ª ed., 2014.

BUENO, D. D. **Controle Ativo de Vibrações e Localização Ótima de Sensores e Atuadores Piezelétricos**. 230 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2007.

CALLISTER JR., W. D., RETHWISCH, D. G., **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, 8ª Edição, 2010.

CHEN, C., **Development of a Neuro-Fuzzy System for Structural Vibration Suppression**. Proceedings of the 2011 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, p.10–13, 2011.

CHEN, D., ZHENG, S., WANG, H., **Genetic Algorithm based LQR Vibration Wireless Control of Laminated Plate using Photostrictive Actuators**. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, vol.11, p. 83-90, 2012.

CHIU, C. H., CHANG, C. C., **Design and Development of Mamdani-Like Fuzzy Control Algorithm for a Wheeled Human-Conveyance Vehicle Control**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, p. 4774-4783, 2012.

CHOUBEY, G.; SUNEETHA, L.; PANDEY, K. M., **Composite Materials used in Scramjet- A Review**. Materials Today: Proceedings, vol. 5, n. 1, p. 1321–1326, 2018.

COLOMBO, D. A., **Controle Neuro-Fuzzy Aplicado na Atenuação de Vibrações Utilizando Atuadores Eletromagnéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018.

CORRÊA, R. F., **Controle ativo de vibrações em rotor flexível utilizando compensação distribuída paralela**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2017.

COUZON, P. Y., DER HAGOPIAN, J., **Neuro-Fuzzy Active Control of Rotor Suspended on Active Magnetic Bearing**. Journal of Vibration and Control, vol. 13, p. 365-384, 2007.

CRONENWETT, J. L., JOHNSTON, K., **Rutherford Cirurgia Vascular**. Elsevier, vol. 1, 2016.

CURSO SEGURANÇA DO TRABALHO, **Síndrome de Raynoud (Dedo branco) e outros problemas da vibração**, 2013. Disponível em: <<https://www.cursosegurancadotrabalho.net/2013/06/Problemas-de-saude-ocasionados-pela-vibracao-no-ambiente-de-trabalho.html>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

DIACENCO, A. A., **Modelagem por Elementos Finitos de Materiais Compósitos Estruturais Incorporando Material Viscoelástico para o Controle Passivo de Vibração E Ruído**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2010.

DONG, X., PENG, Z., MENG, G., **Vibration Control of a Lead Zirconate Titanate Structure considering Controller–Structure Interactions**. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, vol. 37, p.1201-1218, 2018.

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

FAN, L., LIU, X., CAI, G. P., **Dynamic Modeling and Modal Parameters Identification of Satellite with Large-Scale Membrane Antenna**. Advances in Space Research, vol. 63, p.4046-4057, 2019.

FAN, J.; NJUGUNA, J., **Lightweight Composite Structures in Transport**. Wood head Publishing, 2016

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.

FINK, J. K., **Epoxy Resins**. In: *Reactive Polymers: Fundamentals and Applications*, Elsevier, 2018.

GORBATIKH, L.; WARDLE, B. L.; LOMOV, S. V., **Hierarchical Lightweight Composite Materials for Structural Applications**. *Materials Research Society*, v. 41, p. 672–677, 2016.

HIGUERA-MARTÍNEZ, O. I., SALAMANCA, J. M., **Robust Controller LMI for Helicopter with Two Degrees of Freedom**. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 15, p.47-57. 2015.

ICEL MANAUS, **PS-6000**. 2019. Disponível em: <http://www.icel-manau.com.br/produto_descricao.php?id=648>. Acesso em: 28 jul. 2019.

JANG, J. S. R., **ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System**. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, nº 3, 1993.

JANG, J. S. R, Sun, C. T., **Neuro-Fuzzy Modeling and Control**. *Proceedings of the IEEE*, vol. 83, p. 378–406, 1995.

JUANG, J. N.; PAPPA, R. S., **An Eigensystem Realization Alogotithm for Modal Parameter Identification and Modal Reduction**. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 8, nº 5, p. 620-627, 1985.

HELIBRAS, **H130 traz sistema inteligente de controle ativo de vibração**, 2015. Disponível em: <https://www.helibras.com.br/website/po/press/H130-traz-sistema-inteligente-de-controle-ativo-de-vibra%C3%A7%C3%A3o_26.html>. Acesso em: 15 dez. 2019.

KAMALBABU, P., KUMAR, G. C. M., **Effects of Particle Size on Tensile Properties of Marine Coral Reinforced Polymer Composites**. *Procedia Materials Science*, vol. 5, p. 802–808, 2014.

KHERRAZ, K., HAMERMAIN, M., ACHOUR, N., **Robust Neuro-Fuzzy Sliding Mode Controller for a Flexible Robot Manipulator**. International Journal of Robotics & Automation, vol. 30, 2015.

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

KOROISHI, E. H., LARA-MOLINA, F. A., BORGES, A. S., STEFFEN JR, V., **Robust Control In Rotating Machinery using Linear Matrix Inequalities**. Journal of Vibration and Control, vol. 22, p. 3767-3778, 2015.

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, p. 70-80, 2015

KUNDIE, F., MUCHTAR, A., **Effects of Filler Size on the Mechanical Properties of Polymer-filled Dental Composites : A Review of Recent Developments**. Journal of Physical Science, 2018.

LI, D. X., JIANG, J. P., LIU, W., LIU, W., **Adaptive Fuzzy Vibration Control of Smart Structure with VFIFE Modeling**. Journal of Mechanics, vol. 31, p.671-682, 2015.

LIM, R. K., PHAN, M. Q., LONGMAN, R. W., **State-Space System Identification with Identified Hankel Matrix**. Department of Mechanical and Aerospace Engineering Technical Report, nº 3045, Princeton University, Princeton, New Jersey, USA, 1998.

LIN, J., ZHENG, Y. B., **Vibration Suppression Control of Smart Piezoelectric Rotating Truss Structure by Parallel Neuro-Fuzzy Control with Genetic Algorithm Tuning**. Journal of Sound and Vibration, vol. 331, p.3677-3694, 2012.

LUS, H., BETTI, R., DE ANGELIS, M., LONGMAN, R. W., **Constructing Second Order Models of Mechanical Systems from Identified State Space Realizations. Part I: Numerical Investigations**. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2002.

MA, G., XU, M., ZHANG, S., ZHANG, Y., LIU, X., **Active Vibration Control of an Axially Moving Cantilever Structure Using PZT Actuator**. Journal of Aerospace Engineering, vol. 31, 2018.

MACEDO, R. Q., FERREIRA, R. T. L., DONADON, M. V., GUEDES, J. M., **Elastic Properties of Unidirectional Fiber-Reinforced Composites using Asymptotic**

Homogenization Techniques. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 40, n. 5, p. 255, 2018.

MAHMOODI, N., AHMADIAN, M., **Active Vibration Control with Modified Positive Position Feedback.** Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, vol. 131, p.1-8, 2018.

MAXON GROUP, **4-Q-Dc Servo-Amplificador.** 2019. Disponível em: <https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/8796918349854.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2019.

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

MENDONÇA, P. T. R., **Materiais Compostos & Estruturas– Sanduíche.** Manole, 2005.

MEVADA, J., PRAJAPATI, J., **Active Vibration Control of Smart Beam under Parametric Variations.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 40, p. 1-9, 2018.

MILHOR, C. E., **Proposta de um Controlador Difuso Takagi-Sugeno com Desempenho H^∞ para Regulagem da Marcha Lenta em Motores De Ciclo Otto.** Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2008.

MOAVENI, B. HE, X., CONTE, J. P., CALLAFON, R. A., **Damage Identification of a Composite Beam Using Finite Element Model Updating.** Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, p. 339-359, 2008.

MONTEIRO, J. R. L., D'ALMEIDA, J. R. M., **Evaluation of the Mechanical Performance of the Creep Behavior of a Fiberglass Repair after aging in Oil.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 40, nº 7, p. 346, 2018.

MOHAMMED, H. A. U. Q., WASMI, H. R., **Active Vibration Control of Cantilever Beam by using Optimal LQR Controller.** Engineering Journal, vol. 24, p.1-17. 2018.

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

MURADOVA, A. D., TAIRIDIS, G. K., STAVROULAKIS, G. E., **Adaptive Neuro-Fuzzy Vibration Control of a Smart Plate**. Numerical Algebra, Control and Optimization, vol. 7, p. 251-271, 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS, **CB68LPR**. 2019. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/support/model.pci-6221.html>>. Acesso em: 27 jul. 2019.

NATIONAL INSTRUMENTS, **PCI-6221**. 2019. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/shop/select/terminal-block?skuld=67476>>. Acesso em: 27 jul. 2019.

ORTEGA, A. B., CARBAJAL, F. B, NAVARRO, G. S., SALAZAR, M. A. O., **Active Vibration Control of a Rotor-Bearing System based on Dynamic Stiffness**. Revista Facultad De Ingenieria-Universidad De Antioquia, Issue 55, p.125-133, 2010.

PASSINO, K. M.; YURKOVICH, S. **Fuzzy Control**. Addison-Wesley Longman Inc., Boston, 1998.

PCB PIEZOTRONICS, **003A10**. 2019. Disponível em: <https://www.pcb.com/spec_sheet.asp?m=003A10>. Acesso em: 25 jul. 2019.

PCB PIEZOTRONICS, **030A10**. 2019. Disponível em: <https://www.pcb.com/spec_sheet.asp?m=030A10>. Acesso em: 25 jul. 2019.

PCB PIEZOTRONICS, **352C22**. 2019. Disponível em: <https://www.pcb.com/spec_sheet.asp?model=352C22>. Acesso em: 25 jul. 2019.

PCB PIEZOTRONICS, **480E09**. 2019. Disponível em: <https://www.pcb.com/spec_sheet.asp?model=480E09>. Acesso em: 25 jul. 2019.

PINHEIRO, M. A. S., BECKHAUSER, G. N., MENEZES, M. R., **Aplicativo Voltado para a Macromecânica Básica das Estruturas Laminadas de Material Compósito**. Boletim SBMAC, Rio de Janeiro, vol. VII, p. 209-222, 2006.

PIRATELLI FILHO, A., LEVY NETO, F., **Behavior of Granite-Epoxy Composite Beams Subjected to Mechanical Vibrations**. Materials Research, vol.13, p.497-503, 2010.

PHAN, M. Q., HORTA, L. G., JUANG, J. N., LONGMAN R. W., **Identification of Linear Systems by an Asymptotically Stable Observer**. NASA Langley Research Center Report L-16940, Hampton – VA, USA, 1992.

RAO, S., **Vibrações Mecânicas**. Pearson Universidades, 4ª edição, 2008.

REBOLHO, D. C., BELO, E. M., MARQUES, F. D., **Aeroelastic Parameter Identification in Wind Tunnel Testing via The Extended Eigensystem Realization Algorithm**. Journal of Vibration and Control, p. 1607-1621, 2014.

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

REPINALDO, J. P., **Controle Modal aplicado a uma Estrutura de 2 Graus de Liberdade utilizando Atuadores Eletromagnéticos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio - PR, 2018.

REZENDE, M. C., BOTELHO, E. C., **O uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 10, nº 2, p. 288-239, 2000.

ROSS, T. J., **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. John Wiley Sons, 3ª edição, 2010.

SALAZAR, J. W., **Identificação de Sistemas de Estruturas Mecânicas e Aplicações**. Dissertação de Mestrado, Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2000.

SALIBA JR, C. C., **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Poliuretano tendo como Agente de Reforço uma Nova Fibra Inorgânica Natural**. Dissertação de Mestrado, Pontifca Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2003.

SÁNCHEZ, E. C. M., ALVA, J. G. C., MEGGIOLARO, M. A., CASTRO, J. T. P., **Learning Control and Neuro–Fuzzy Learning Control To Increase the Frequency of Fatigue Tests**. ABCM Symposium Series in Mechatronics, vol. 5, p. 232–244, 2012.

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, p. 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, 133 f., 2006.

SCZIBOR, V., MARQUES, F. D., **Wing Structure Modal Parameter Estimation and Qualification using ERA**. 17^o International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2003), São Paulo – SP, 2003.

SREEKUMAR, P. A., THOMAS, S., **Properties and Performance of Natural-Fibre Composites**. Calicut: Woodhead Publishing, 2008.

TALEKAR, V. V., BHANUSE, V. R., KULKARNI, J. V., **Vibration Analysis of Cracked Beam using Fuzzy Logic Technique**. IEEE, International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT), 2017.

TITA, V., **Apostila -Projeto e Fabricação de Estruturas em Material Compósito Polimérico**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2006.

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

VENTURA, A. M. F. M., **Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas**. Ciência & Tecnologia dos Materiais, vol. 21 nº 3-4, Lisboa, 2009.

WELCH, G.; BISHOP, G., **An Introduction to Kalman Filter**. Technical Report, University of North Carolina, Chapel Hill, USA, 1995.

XIE, Y., LIU, P., CAI, G., **On-orbit frequency identification of spacecraft based on attitude maneuver data**. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, vol. 90, p.33-42, 2018.

XU, Y., LI, Z., GUO, K., **Active Vibration Robust Control for FGM Beams with Piezoelectric Layers**. Structural Engineering and Mechanics, vol. 67, nº 1, p. 33-43, 2018.

YAMAGUCHI, I., KIDA, T., KASAI, T., **Experimental Demonstration of LSS System Identification by Eigensystem Realization Algorithm**. Proceedings of 1995 American Control Conference - ACC'95, 1995.

YAO, W., JAIMAN, R. K., **Feedback Control of Unstable Flow and Vortex-Induced Vibration using the Eigensystem Realization Algorithm**. Journal of Fluid Mechanics, p. 394-414, 2017.

YANG, X. M., HI, T. H., QU, C. X., LI, H. N., Liu, H., **Automated Eigensystem Realization Algorithm for Operational Modal Identification of Bridge Structures**. Journal of Aerospace Engineering, vol. 32, 2019.

ZADEH, L. A., **Fuzzy Sets**. Information and Control, 1965.

ZHOU, K., DOYLE, J. C., **Essentials of Robust Control**, Prentice Hall, 1998.

APÊNDICE A – BANCADA EXPERIMENTAL E COMPONENTES

As Figuras A.1, A.2, A.3 e A.4 mostram com detalhes do projeto em concepção CAD da bancada experimental.



Figura A.1 – Bancada experimental em vista isométrica

Fonte: Autoria Própria.

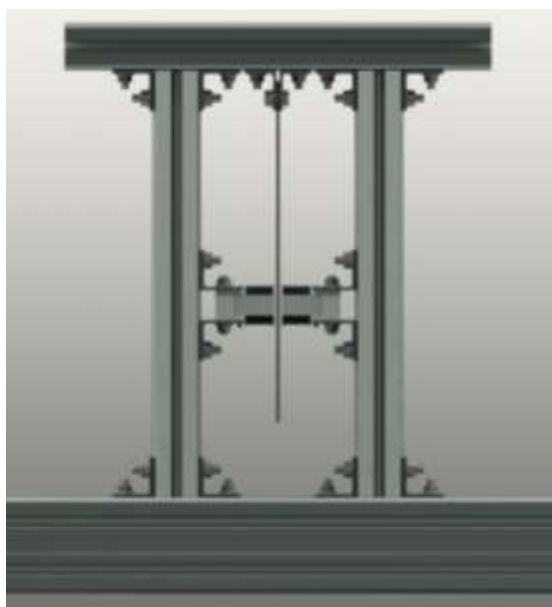


Figura A.2 – Bancada experimental em vista frontal

Fonte: Autoria Própria.



Figura A.3 – Detalhes bancada experimental
Fonte: Autoria Própria.

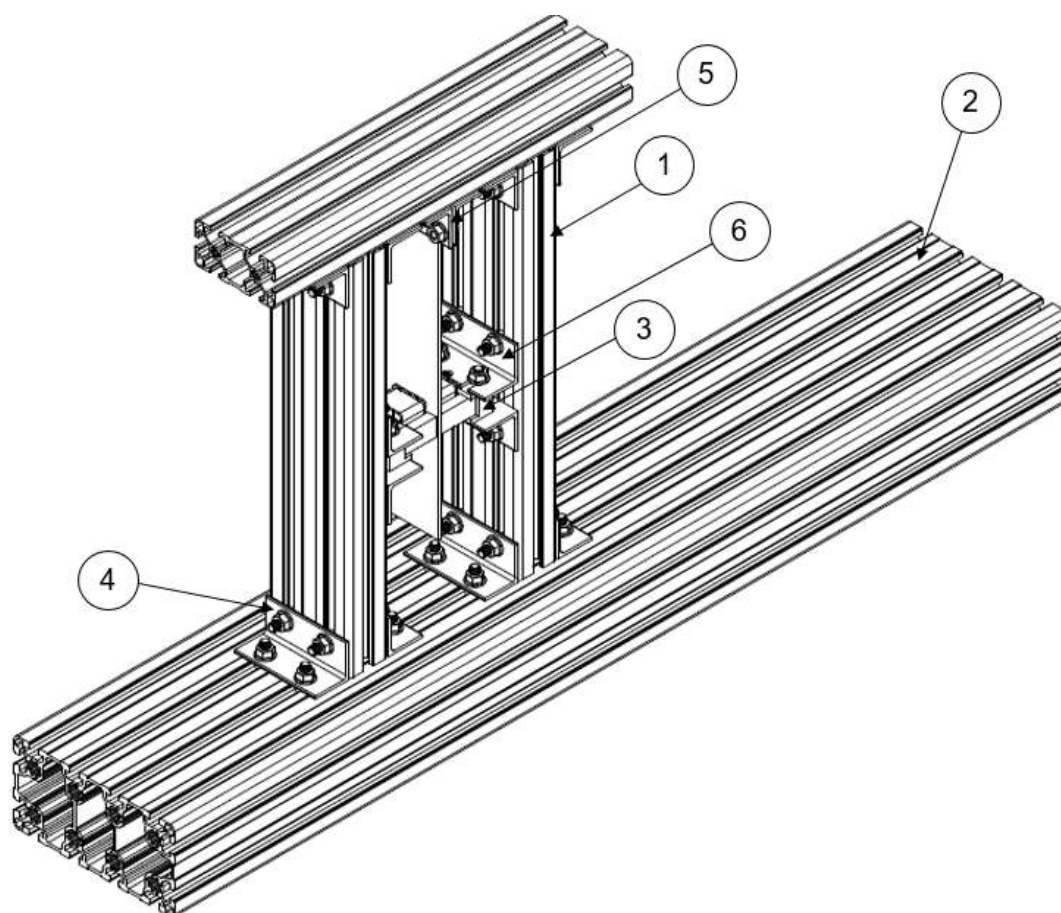


Figura A.4 – Desenho bancada experimental
Fonte: Autoria Própria.

A Tabela A.1 apresenta as quantidades e materiais dos componentes da bancada experimental apresentada na Figura A.4.

Tabela A.1 – Componentes Bancada Experimental			
Nº	Componente	Material	Quantidade
1	Perfil Base	Alumínio	3
2	Perfil Coluna	Alumínio	1
3	Atuador	Alumínio	2
4	Cantoneira	Aço	8
4	Cantoneira para Engaste da Viga	Aço	2
5	Cantoneira com Rasgo	Aço	4

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura A.5 são apresentados os desenhos 3D dos componentes com as respectivas dimensões em mm.

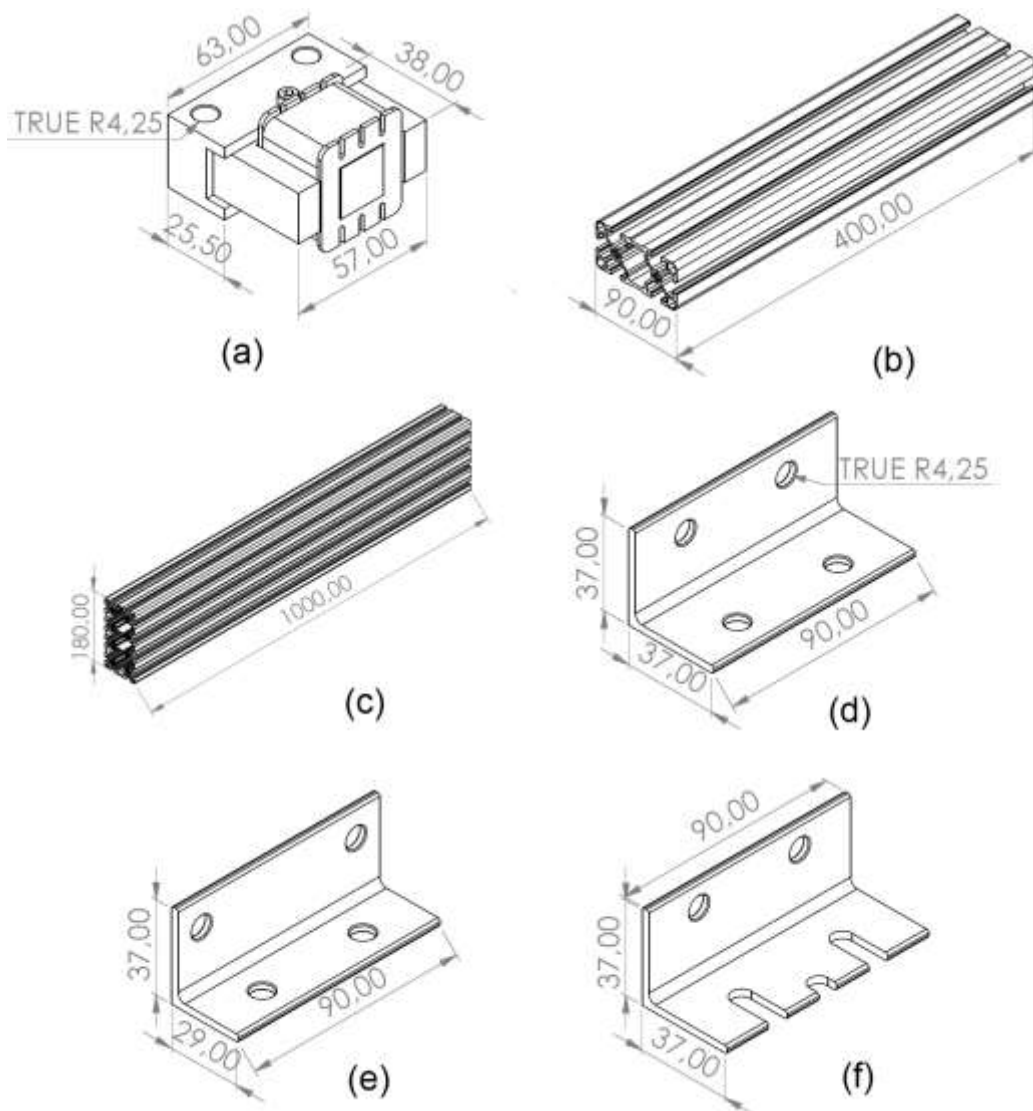


Figura A.5 – (a) Desenho atuador (b) Desenho perfil coluna (c) Desenho perfil base (d) Cantoneira (e) Cantoneira para engaste da viga (f) cantoneira com rasgo
Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE B – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

B.1 Placa de aquisição

A placa de aquisição utilizada nos teste experimentais é do modelo PCI-6221 da *National Instruments®*, e é apresentada na Figura B.1.



Figura B.1 – Placa de aquisição modelo PCI-6221
Fonte: National Instruments (2019).

A placa apresenta uma taxa de aquisição de 500 [Hz] e um tempo de resposta de 2 [ms]. Ainda em conjunto com a placa de aquisição é utilizado um terminal de modelo CB-68LPR da *National Instruments®*, apresentado na Figura B.2.

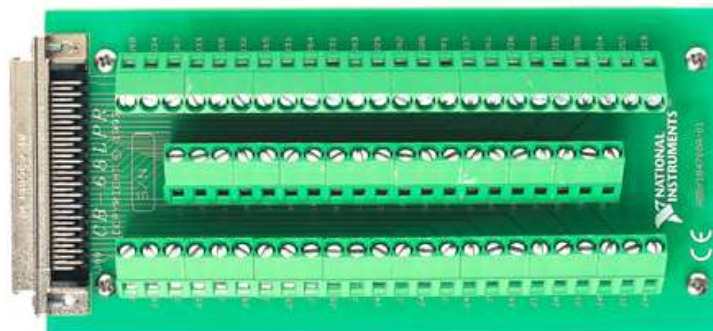


Figura B.2 – Terminal modelo CB-68LPR
Fonte: National Instruments (2019).

Os sinais do condicionador de sinal e dos servos-amplificadores são conectados a placa de aquisição. Logo, no terminal são utilizados uma entrada analógica referente ao sinal de deslocamento (conexão com condicionador de sinal) e duas saídas analógicas referentes as forças de controle do atuador (conexão com servo-amplificadores).

B.2 Acelerômetro

O acelerômetro utilizado é do modelo 352C22 da PCB Piezotronics®, e é apresentado na Figura B.3a. O acelerômetro apresenta uma sensibilidade de 10,99 [mV/g] e é conectado a um condicionador de sinal por meio de um cabo de modelo 030A10 da PCB Piezotronics® (apresentado na Figura B.3b). A característica principal desse tipo de cabo é de apresentar baixo ruído, uma característica fundamental para obter exatidão na aquisição de dados.



Figura B.3 – (a) Acelerômetro modelo 352C22 (b) Cabo modelo 030A10
Fonte: Piezotronics (2019).

B.3 Condicionador de sinal

O condicionador utilizado é do modelo 480E09 da PCB Piezotronics®, e é apresentado na Figura B.4a. O condicionador de sinal é “alimentado” pelo sinal do acelerômetro através do cabo de modelo 030A10 da PCB Piezotronics® (apresentado na Figura B.3b). O condicionador então, melhora a precisão da resposta do deslocamento e envia o sinal para placa de aquisição através do cabo de modelo

003A10 da PCB Piezotronics®, apresentado na Figura B.4b.



Figura B.4 – (a) Condicionador de sinal modelo 480E09 (b) Cabo modelo 003A10
Fonte: Piezotronics (2019).

B.4 Servo-amplificador

Nos testes experimentais foram utilizados dois servo-amplificadores do modelo 4-Q-Dc Servo-Amplificador da Maxon Motor®, apresentado na Figura B.5. Os servo-amplificadores são utilizados para converter o sinal da tensão em corrente elétrica, para ser enviada aos atuadores eletromagnéticos.



Figura B.5 – Servo-amplificador modelo 4-Q-Dc
Fonte: MaxonGroup (2019).

O servo-amplificador possui uma tensão de entrada máxima de 10 [V], uma tensão de saída de 25 [V] e a corrente máxima de 2 [A].

B.5 Fonte de alimentação

A fonte de alimentação é utilizada para atender a tensão e corrente requerida no controle experimental. A fonte de alimentação utilizada é do modelo PS-6000 da Icel Manaus®, e é apresentada na Figura B.6a. A fonte é composta de três fontes independentes em um mesmo gabinete. Apresenta uma fonte fixa de 5 [V] com capacidade de até 3A, e duas fontes ajustáveis independentes de até 30 [V] e capacidade 6 [A] cada uma.

A fonte é conectada aos servo-amplificadores através de 4 cabos com uma conexão banana em cada, apresentados na Figura B.6b.

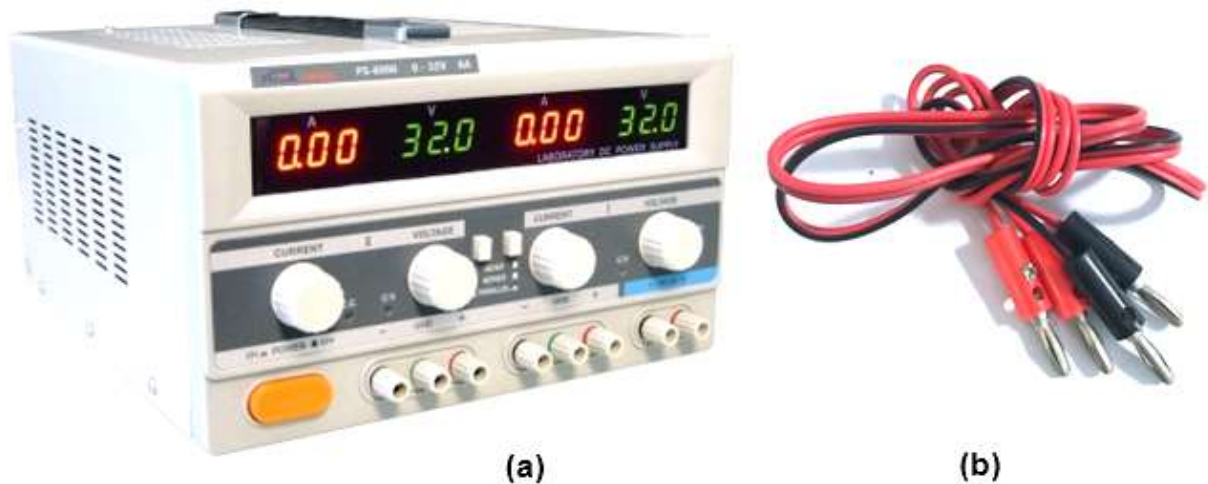


Figura B.6 – (a) Fonte de Alimentação PS-6000 (b) Cabos conexão banana
Fonte: Icel Manaus (2019).