

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

BRUNA BRUNIERA

**CONTROLE NEURO-FUZZY APLICADO A ESTRUTURAS
MECÂNICAS UTILIZANDO ATUADORES ELETROMAGNÉTICOS**

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2022

BRUNA BRUNIERA

**CONTROLE NEURO-FUZZY APLICADO A ESTRUTURAS
MECÂNICAS UTILIZANDO ATUADORES
ELETROMAGNÉTICOS**

**NEURO-FUZZY CONTROL APPLIED TO MECHANICAL
STRUCTURES USING ELECTROMAGNETIC ACTUATORS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Edson Hideki Koroishi
Coorientadora: Profa. Dra. Glaucia Maria Bressan

CORNÉLIO PROCÓPIO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



BRUNA BRUNIERA

**CONTROLE NEURO-FUZZY APLICADO À ESTRUTURAS MECÂNICAS UTILIZANDO ATUADORES
ELETROMAGNÉTICOS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Ciências Mecânicas.

Data de aprovação: 02 de Agosto de 2022

Dr. Edson Hideki Koroishi, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Albert Willian Faria, Doutorado - Universidade Federal do Triângulo Mineiro (Uftm)

Dr. Fernando Jose Antonio, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Glauca Maria Bressan, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 02/08/2022.

A Deus,a minha família e todos que me ajudaram no processo de desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me dar força e persistência para atingir os meus objetivos.

A minha família, de modo particular aos meus pais Vanderlei e Ionice, aos meus irmãos David e Junior e ao meu sobrinho Vinícius, por acreditarem em mim sempre e me fortalecerem nos momentos difíceis, com seu amor e acalento.

Ao meu namorado Matheus por me apoiar, compartilhar e me ensinar a ser uma pessoa cada dia melhor.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edson Hideki Koroishi, meu eterno agradecimento por aceitar a me conduzir ao longo deste trabalho, compartilhando seus conhecimentos e apoiando até o fim do mesmo.

A minha coorientadora Profa. Dra. Glaucia Maria Bressan por mais uma etapa concluída juntas, os seus conhecimentos e conselhos abrilhantaram ainda mais essa trajetória.

Ao Prof. Dr. Albert Willian Faria e ao Prof. Dr. Fernando Jose Antonio por aceitarem serem membros da minha bancada examinadora e por seus grandes apontamentos para a melhoria deste trabalho.

Aos meus amigos do mestrado pelos bons momentos compartilhados nas disciplinas e pelo suporte, de modo particular ao Thiago.

Aos meus amigos pessoais e de longa data, cujo não se faz necessário citar os nomes, pois eles sabem o quão importantes e necessários são na minha vida.

A Capes, pela bolsa e apoio financeiro.

“Se tentares viver de amor, perceberás que, aqui na terra, convém fazeres a tua parte. A outra, não sabes nunca se virá, e não é necessário que venha. Por vezes, ficarás desiludido, porém jamais perderá a coragem, se te convenceres de que, no amor, o que vale é amar”. (Chiara Lubich)

RESUMO

BRUNIERA, Bruna. **Controle Neuro-Fuzzy Aplicado a Estruturas Mecânicas Utilizando Atuadores Eletromagnéticos**. 2022. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2022.

O presente trabalho tem por objetivo aplicar o controle ativo de vibrações em uma estrutura de dois graus de liberdade. Quando a vibração se torna um problema ocasionando falhas, o controle de vibrações se torna um aliado para a minimização das mesmas. Um dos métodos utilizados é o controle ativo de vibrações. Neste trabalho, foram utilizadas as Teorias *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy* para projetar os controladores e comparar os resultados obtidos nas simulações numéricas com o resultado experimental. Na primeira etapa o trabalho constituiu na realização de simulações numéricas no *software* MATLAB® no qual foi implementado o modelo sistema de dois graus de liberdade do tipo massa-mola-amortecedor. Considerou-se três casos para análises: Controlador LQR com o Modelo Inverso do Atuador Eletromagnético, o Controlador *Neuro-Fuzzy* com o Modelo Inverso do Atuador Eletromagnético e por fim, o Controlador *Neuro-Fuzzy* sem o Modelo inverso do Atuador Eletromagnético. O primeiro caso demonstrou-se melhor no tempo de acomodação; no segundo caso, o Modo 2 do Controle obteve uma melhor atenuação e o último caso, mesmo retirando o Modelo Inverso também obteve bons resultados na atenuação de vibrações. Com os resultados numéricos, pode-se concluir a validade das metodologias numéricas para o controle ativo de vibrações. Visando validar a metodologia numérica, foram realizados experimentos empregando os controladores projetados em uma bancada de dois graus de liberdade. Os resultados experimentais foram satisfatórios no controle ativo de vibrações, demonstrando a validade dos controladores projetados.

Palavras-chave: Controle Ativo de Vibrações. Lógica Fuzzy. Neuro-Fuzzy. Atuadores Eletromagnéticos.

ABSTRACT

BRUNIERA, Bruna. **Neuro-Fuzzy Control Applied to Mechanical Structures Using Electromagnetic Actuators**. 2022. 66 p. Dissertation (Master's Degree in Course Name) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2022.

The present work aims to apply active vibration control in a two-degree-of-freedom structure. When vibration becomes a problem causing failures, vibration control becomes an ally to correct them. One of the methods used is active vibration control. In this work, Fuzzy and Neuro-Fuzzy Theories were used to design the controllers and compare the results. In the first stage, the work consisted of performing numerical simulations in the MATLAB® Software, in which the mass-spring-damper system model was implemented with two degrees of freedom. Three cases were considered for analysis: The LQR controller with the Inverse Model of the Electromagnetic Actuator, the Neuro-Fuzzy Controller with the Inverse Model of the Electromagnetic Actuator and finally, the Neuro-Fuzzy Controller without the Inverse Model of the Electromagnetic Actuator. The first case showed better accommodation time; in the second case, the Control Mode 2 obtained a better attenuation and the last case, even removing the Inverse Model, also obtained good results in the attenuation of vibrations. With the numerical results, it is possible to conclude the validity of the proposed methodologies for the active control of vibrations. In order to validate the proposed methodology after the numerical simulations, a second step was carried out, which consisted of experimentally validating the controllers designed in a bench with two degrees of freedom. The experimental results were satisfactory in the active vibration control, demonstrating the validity of the designed controllers

Keywords: Active Control of Vibrations. Fuzzy Logic. Neuro-Fuzzy. Electromagnetic Actuators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo esquemático do sistema	20
Figura 2 – (a) sistema malhada aberta; (b) sistema malha fechada	25
Figura 3 – Estrutura do controlador Fuzzy	27
Figura 4 – Modelo de inferência Mamdani	28
Figura 5 – Modelo de inferência Takagi-Sugeno	29
Figura 6 – Esquema de um neurônio biológico	30
Figura 7 – Modelo neurônio biológico	32
Figura 8 – Arquitetura ANFIS	32
Figura 9 – Diagrama de blocos do Observador de Estados	34
Figura 10 – Eletroímã do atuador eletromagnético	37
Figura 11 – Fluxo de campos magnéticos com fluxo	38
Figura 12 – Bancada experimental (a) concepção CAD (b) foto da bancada	41
Figura 13 – Esquema da bancada experimental	42
Figura 14 – Modos de vibrar da estrutura (a) primeiro modo (b) segundo modo.	42
Figura 15 – Diagrama do Sistema de Controle sem o Modelo Inverso	44
Figura 16 – Diagrama do Sistema de Controle com o Modelo Inverso	44
Figura 17 – Deslocamento do sistema de 2 gdl (LQR).	45
Figura 18 – Resposta na Frequência (LQR)	46
Figura 19 – Função Resposta em Frequência (LQR)	46
Figura 20 – Corrente Elétrica (LQR)	47
Figura 21 – Força de Controle (LQR)	47
Figura 22 – Deslocamento do sistema de 2 gdl (<i>Neuro-Fuzzy</i> e Modelo Inverso)	48
Figura 23 – Resposta na Frequência (<i>Neuro-Fuzzy</i> e Modelo Inverso)	49
Figura 24 – Função Resposta em Frequência (<i>Neuro-Fuzzy</i> e Modelo Inverso)	49
Figura 25 – Corrente Elétrica (<i>Neuro-Fuzzy</i> e Modelo Inverso)	50
Figura 26 – Força de Controle (<i>Neuro-Fuzzy</i> e Modelo Inverso)	51
Figura 27 – Deslocamento do sistema de 2 gdl (<i>Neuro-Fuzzy</i> e sem Modelo Inverso)	51
Figura 28 – Resposta na Frequência (<i>Neuro-Fuzzy</i> e sem Modelo Inverso)	52
Figura 29 – Função Resposta em Frequência (<i>Neuro-Fuzzy</i> e sem Modelo Inverso)	52
Figura 30 – Corrente Elétrica (<i>Neuro-Fuzzy</i> e sem Modelo Inverso)	53
Figura 31 – Força de Controle (<i>Neuro-Fuzzy</i> e sem Modelo Inverso)	53
Figura 32 – Corrente Elétrica de excitação	54
Figura 33 – Deslocamento do sistema de 2 gdl (experimental)	55
Figura 34 – Corrente Elétrica	55
Figura 35 – Resposta na frequência (experimental)	56
Figura 36 – Função Resposta em Frequência (experimental)	57
Figura 37 – Comparação das respostas experimentais - LQR X <i>Neuro-Fuzzy</i>	58
Figura 38 – Comparação das Respostas Experimentais no domínio da Frequência - LQR <i>Neuro-Fuzzy</i>	58
Figura 39 – Comparação das Funções Respostas na Frequência experimentais - LQR X <i>Neuro-Fuzzy</i>	59
Figura 40 – Comparação das Correntes Elétricas experimentais - LQR X <i>Neuro-Fuzzy</i>	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros dos atuadores eletromagnéticos	39
Tabela 2 – Propriedades do fio de cobre AWG24	40

LISTA DE SÍMBOLOS

$[A]$	Matriz dinâmica
$[A]$	Matriz dinâmica
$[A_m]$	Matriz dinâmica modal
a, b, c, d, e, f	Parâmetros geométricos do atuador eletromagnético
B	Densidade do fluxo magnético
$[B]$	Matriz de entrada
$[B_u]$	Matriz de entrada do controlador
$[B_{um}]$	Matriz de entrada modal do controlador
$[B_w]$	Matriz de entrada da força de excitação
$[B_{wm}]$	Matriz de entrada modal da força de excitação
$[C]$	Matriz de saída
$[C_m]$	Matriz de saída modal
$[c]$	Matriz de amortecimento
$[c_m]$	Matriz de amortecimento modal
$\{d(t)\}$	Vetor de deslocamento
$\{d_m(t)\}$	Vetor de deslocamento modal
$\{e(t)\}$	Vetor erro estimador
F	Fator de mutação
F_m	Força magneto motriz
F_{em}	Força eletromagnética
F_{exc}	Força de excitação
$\{F(t)\}$	Vetor de força
$[G]$	Matriz de ganho do controlador
H	Campo Magnético
i	corrente total
i_0	Corrente Solenoide
J	Índice de desempenho
$[k]$	Matriz de rigidez
$[k_m]$	Matriz de rigidez modal
L	Indutância Magnética
$[m]$	Matriz de massa
$[m_m]$	Matriz de massa modal
n	Número de graus de liberdade

ns	Número de saídas
nu	Número de entradas da força de controle
nw	Número de entradas da força de excitação
N_e	Número de espirais
$[P_{lqr}]$	Matriz hermitiana definida positiva ou simétrica real
$[P_u]$	Matriz de posicionamento da força de controle
$[P_w]$	Matriz de posicionamento da força de excitação
$[P_s]$	Matriz de posicionamento de saída
$[Q_{lqr}]$	Matriz hermitiana definida positiva ou real simétrica
R_{lqr}	Matriz hermitiana definida positiva ou real simétrica
$[T_{lqr}]$	Matriz singular
$\{u(t)\}$	Vetor da força de controle
U_i	Vetor experimental
V_i	Vetor doador
$X_{s,i}$	Vetor alvo
$\{x(t)\}$	Vetor de estado
$\{x_m(t)\}$	Vetor de estados modal
$\{\hat{x}(t)\}$	Vetor de estados observador
$\{y(t)\}$	Vetor de saídas
$\{\hat{y}(t)\}$	Vetor de saídas observador
$\{w(t)\}$	Vetor da força de excitação
w_i	Grau de aplicabilidade
W_m	Energia Magnética
$[\Theta]$	Base modal
$\mu_{Ai}(x), \mu_{Bi}(y)$	Função de pertinência
ω	Frequência natural
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
μ_r	Permeabilidade magnética relativa do material ferromagnético
Φ	Fluxo Magnético
ψ	Fluxo do Campo magnético
\mathfrak{R}	Relutância magnética
δ	Deslocamento da massa controlada
Ψ	Fluxo total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	JUSTIFICATIVA	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	SISTEMA DE 2 GRAUS DE LIBERDADE	20
2.2	ESPAÇO DE ESTADOS	21
2.3	SISTEMA FÍSICO	22
2.4	ANÁLISE MODAL	23
2.4.1	Sistema Modal	24
3	TEORIA DE CONTROLE	25
3.1	REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO (LQR)	25
3.2	<i>LÓGICA FUZZY</i>	26
3.3	<i>NEURO-FUZZY</i>	29
3.3.1	Redes Neurais Artificiais	30
3.4	OBSERVADOR DE ESTADOS	34
4	ATUADOR ELETROMAGNÉTICO	36
5	METODOLOGIA	41
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
6.1	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	45
6.1.1	Resultados numéricos com Controlador LQR Modelo Inverso	45
6.1.2	Controlador <i>Neuro-Fuzzy</i> com o Modelo Inverso	48
6.1.3	Controlador <i>Neuro-Fuzzy</i> sem o Modelo Inverso	50
6.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	54
7	CONCLUSÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos, a indústria tem se tornado cada vez mais competitiva, assim, muitos estudos vêm acontecendo para que os impactos das vibrações sejam minimizados. A vibração é um fenômeno natural que ocorre em diversos sistemas, tais como o balançar de um pêndulo e o simples movimento de uma corda oscilando são exemplos da presença de vibrações. A teoria da vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles (RAO, 2008).

Quando a vibração se torna um problema comprometendo estruturas e equipamentos, o controle de vibrações se torna um aliado para que os efeitos dos mesmos sejam minimizados, tornando-se importante em diversas áreas da engenharia tais como a aeroespacial, petroquímica, automobilística. Diversos métodos foram desenvolvidos ao longo do tempo visando a redução do nível de vibrações em estruturas e equipamentos e dentre essas técnicas de controle destacam-se: passivo, ativo e semiativo.

O sistema de controle passivo e ativo representam dois extremos dentre as estratégias de controle estrutural disponíveis. O controle passivo é caracterizado por ser independente de fontes externas de energia. Ao contrário, os sistemas de controle ativo são compostos por dispositivos que aplicam força à estrutura e, portanto, dependem de suprimento externo de energia (CARNEIRO, 2009). Já os sistemas de controle semiativo combinam as melhores características de ambas as abordagens (Passivo e Ativo), oferecendo a confiabilidade de dispositivos passivos, mas mantendo a versatilidade e adaptabilidade de sistemas totalmente ativos. De acordo com as definições atualmente aceitas, um dispositivo de controle semiativo é aquele que possui propriedades que podem ser ajustadas em tempo real, mas não podem fornecer energia ao sistema que está sendo controlado. (JR *et al.*, 1997)

O que mais chama atenção no controle semiativo é possuir a adaptabilidade dos dispositivos de controle ativo sem necessitar de tamanhas fontes de suprimento de energia (CARNEIRO, 2009). Há diversas aplicações de controle na literatura, por exemplo, Shiraishi e Misaki (2016) desenvolveram um controle semiativo de vibração por meio de um amortecedor magnetoreológico (MR), ou seja, um tipo de fluido que pode ser controlado aplicando um campo magnético. O fluido MR foi aplicado a um amortecedor do tipo cilíndrico e seu desempenho foi verificado através de experimentos em sistema de um grau de liberdade, a partir da qual, verificou-se sua eficácia considerando excitação senoidal e excitação pseudo-aleatória usando um algoritmo

simples baseado em o esquema do amortecedor *skyhook*.

Carneiro (2009) estudou a eficiência do controle semiativo, utilizando amortecedores MR, comparando com os controladores passivo e ativo. Foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional para representar as propriedades de estruturas utilizadas. A autora projetou um controlador semiativo do tipo *clipped optimal* que se demonstrou eficiente em reduzir os deslocamentos e aceleração do edifício estudado.

Em Garrido *et al.* (2014), o controle semiativo foi aplicado numericamente com o uso de amortecedores de atrito variável ligados as estruturas. O sistema apresentava um amortecedor de fricção a seco em paralelo com uma mola com as extremidades ligadas à estrutura através de cabos. As forças foram aplicadas por meio de um atuador piezoelétrico através de três leis sendo duas delas baseadas na teoria de Lyapunov e a última foi desenvolvida heurísticamente. Além disso, os autores verificaram que esse sistema criado no controle semiativo é mais eficaz que no passivo, visto que a sua eficácia foi menos sensível a perda de pré-tensão.

Cunha *et al.* (2016) utilizaram materiais viscoelásticos como estratégia de controle passivo para suprimir as indesejáveis vibrações induzidas por vórtices. O Método da Fronteira Imersa (MFI) combinado com o Modelo Físico Virtual (MFV) foi utilizado para investigar a dinâmica de um cilindro circular rígido amortecido viscoelasticamente em um escoamento submetido a vibrações induzidas transversalmente por geração de vórtices. Aplicou-se uma estratégia de modelagem no domínio do tempo para o sistema interação fluido-estrutura incorporando o material viscoelástico ao Modelo de Derivadas Fracionárias (MDP).

Moraes *et al.* (2019) estudaram um controle passivo de vibrações através da incorporação de molas de Liga com Memória de Forma (LMF) em seu estado de superelasticidade visando aumentar o amortecimento estrutural e reduzir a transmissibilidade de deslocamento em uma estrutura de dois graus de liberdade tanto numérico como experimentalmente. Os resultados demonstraram diminuição no tempo de atenuação do sinal de aceleração em 14 segundos, acrescido em até 192% o amortecimento estrutural e reduz a transmissibilidade de deslocamento em até 56,6%.

Anh *et al.* (2016) apresentaram uma análise de controle passivo de vibrações por meio de diferentes configurações dos Absorvedores Dinâmicos de Vibrações (ADV). Foi realizado uma otimização em um DVA tradicional e dois ADVs chamados "de três elementos". Por meio do modelo apresentando foi possível verificar que os modelos ADV'S "de três elementos" funcionam melhor que o padrão.

Kwak e Yang (2015) consideraram que em algumas aplicações o método passivo é inadequado para controlar a vibração de estruturas, assim, os métodos ativos foram desenvolvidos justamente para suprir essa necessidade e melhorar o desempenho dos sistemas.

As técnicas do controle ativo de vibrações por sua vez, envolve a utilização de sensores (deformação, aceleração, velocidade) e atuadores (força, deformação)(LIMA *et al.*, 2015). Neste tipo de sistema as forças de controle são introduzidas por meio de atuadores tais como: macaco hidráulico, motor elétrico, entre outros que dependem de fonte de energia externa.

Muitas estruturas utilizam o uso do controle ativo para solucionar problemas dinâmico (RIBEIRO *et al.*, 2013). Na literatura, esse tipo de técnica tem sido amplamente estudada como pode-se ver a seguir.

Santos (2008) utilizou controle ativo com o propósito de projetar controladores para aplicação em tempo real em uma estrutura flexível, objetivando a redução de vibração estrutural. Os controladores são projetados segundo o enfoque de otimização convexa, com formulações envolvendo desigualdades matriciais lineares (LMIs do inglês Linear Matrix Inequalities).

Wang *et al.* (2012) apresentaram um controle de realimentação linear para realizar a supressão de vibração ativa de uma classe de estrutura flexível utilizando LMIs. Os autores mostraram que a principal vantagem desse controlador é a facilidade e simplicidade de implementação perto de um controlador tradicional.

Simonović *et al.* (2016) apresentaram o desenvolvimento e verificação experimental de um sistema de controle de vibração ativo de chapa de alumínio. O sistema de controle de vibração ativo é controlado pela estratégia de controle proporcional-integral-derivado (PID). O algoritmo de controle foi implementado na plataforma do microcontrolador PIC32MX440F256H. O estudo demonstrou que o sistema supre mais de 90% da amplitude da vibração, o que demonstra a eficácia do controle ativo.

Hu *et al.* (2018) propuseram um método de otimização estrutural e controle PID em cascata de atuadores maglev tendo como base o princípio da força de Lorentz. O método foi utilizado para projetar um circuito magnético e otimizar multiobjetivamente os parâmetros de estrutura de uma bobina. Os resultados medidos e simulados indicam que a aplicação do método de controle PID em cascata pode atenuar o objeto de controle na faixa de -22,522 a -2,189 dB dentro da faixa de 1 a 25 Hz e realizar um controle de vibração eficaz.

Bueno (2007) apresentou um projeto do regulador quadrático linear (LQR do inglês *Linear Quadratic Regulator*) para amenizar vibrações em estruturas mecânicas. Estas estruturas,

com atuadores e sensores acoplados, são denominadas estruturas inteligentes. Os projetos dos controladores ativos foram resolvidos através das desigualdades das matrizes lineares (LMIs do inglês *Linear Matrix Inequalities*). Os resultados mostram que os controladores robustos aumentam o amortecimento estrutural minimizando as amplitudes de vibração.

Em Teixeira *et al.* (2001) é apresentado um conjunto de técnicas de inteligência artificial onde os controladores *Fuzzy* são obtidos através de otimização, o objetivo do trabalho é o controle de vibrações em placas instrumentadas com diversos sensores e atuadores piezelétricos. Desse modo, foram utilizados controladores híbridos inteligentes com foco na *Lógica Fuzzy*, em algoritmos genéticos e em redes neurais artificiais para o controle ativo tanto numérico como experimentalmente.

Em Machado (2007) é apresentado um estudo sobre o controle ativo de um manipulador robótico, os resultados experimentais demonstraram que o compensador *Neuro-Fuzzy* reduziu-se significativamente a não linearidade imposta pelo atrito no atuador.

Em Silva *et al.* (2018), os autores sugeriram um estudo de controle modal de vibração em uma viga de material compósito usando atuadores eletromagnéticos através do regulador quadrático linear (LQR) que foi resolvido através de desigualdades matriciais (LMIs). Os autores também estudaram a otimização de parâmetros aplicados neste sistema de controle. Por meio, das simulações numéricas obteve-se a resposta no domínio do tempo e demonstrou a eficiência da técnica proposta no controle ativo de vibrações.

Em Silva *et al.* (2020), objetivou-se reduzir o deslocamento do sistema e reduzir o consumo de energia, os autores utilizaram o algoritmo multi-objetivo de polinização por flores, apresentando resultados que mostrou eficiência da técnica proposta no controle ativo de vibração.

Dentre as teorias utilizadas no projeto de controladores, algumas tem se destacado tais como a *Lógica Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*. O controle baseado na *Lógica Fuzzy* surgiu como uma alternativa às estratégias que dependem estritamente do modelo do sistema, pois estes apresentam uma certa tolerância à imprecisão e ambiguidades decorrentes das incertezas presentes no sistema. Uma alternativa para este problema é o emprego de Redes Neurais Artificiais para otimização do controlador *Fuzzy*. Na combinação de sistemas *Fuzzy* e Redes Neurais Artificiais surgiu o controle baseado em sistemas híbridos *Neuro-Fuzzy*, o qual incorpora as vantagens das redes neurais artificiais, como a habilidade de aprendizagem e otimização, com as vantagens da lógica nebulosa, dos sistemas *Fuzzy*, como a descrição detalhada do sistema (REPINALDO *et al.*, 2018).

Wenzhong *et al.* (2004) Os autores estudaram uma estrutura de controle baseada em um sistema de lógica *Fuzzy* e algoritmo adaptativo adequado para acionar sistemas de controle de vibração ativo *feedforward* não linear. Considerando caminhos de sensores não lineares e atuadores piezoelétricos não lineares, os resultados das simulação numérica mostraram eficácia do controle ativo *feedforward* de sistemas de vibração.

Em Rosyid *et al.* (2015) foi avaliado o uso do controlador de sistema de inferência *Neuro-Fuzzy* adaptativo (ANFIS) para suprimir a vibração em um sistema de suporte de rotor e compara o desempenho com o controlador LQR. Os autores concluíram que o controlador ANFIS pode funcionar como um controlador melhor em relação ao controlador LQR, pois a resposta é dada em uma velocidade mais alta.

Alatiqi *et al.* (1999) estudaram o controle de processo em duas principais indústrias de dessalinização, eles destacam a importância do estudo, de modo a condicionar o aumento da vida útil da planta estudada e da redução de custo dos produtos, além disso, apresentam as estratégias que as indústrias tem utilizado, como por exemplo uso do controlador PID, *Lógica Fuzzy*.

Em Muradova *et al.* (2017) foi investigado a supressão de vibração de uma placa inteligente com o uso do ANFIS, o sistema consistiu em um modelo mecânico não linear, que é uma extensão do modelo de placa de von Kármán com controle. O modelo discretizado obtido é um sistema de equações diferenciais ordinárias não lineares com relação ao tempo. Um sistema de inferência *Neuro-Fuzzy* é construído e testado para criar um controlador não linear para a supressão de vibração da placa, mais especificamente, um sistema de inferência *Fuzzy* do tipo Sugeno é empregado e treinado através da ANFIS.

Thinh *et al.* (2009) apresentaram o controle *Neuro-Fuzzy* projetado para superar a degradação do desempenho de atuação de atuadores de composto de metal polimérico iônico. Os dados foram usados para treinar o controlador *Neuro-Fuzzy* adaptativo para encontrar as funções de pertinência no algoritmo de controle *Fuzzy* através do *software* Matlab/Simulink® e a placa dSPACE.

Yeh *et al.* (1996) aplicaram a teoria do controle *Fuzzy* no controle estrutural ativo de uma estrutura de um único grau de liberdade (SDOF). A abordagem é então estendida para estruturas de vários graus de liberdade (MDOF) com o uso de deslocamento e velocidade ponderados. Mostra-se que o controlador *Fuzzy* pode obter resultados satisfatórios na aplicação de controle ativo de estruturas e a viabilidade é verificada.

Silva *et al.* (2011) propuseram um método para o projeto da realimentação derivativa

aplicada à sistemas não-lineares incertos. Durante a modelagem do problema os sistemas não-lineares foram representados por modelos *Fuzzy* Takagi-Sugeno, permitindo que o projeto do controlador fosse realizado com Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs).

Li *et al.* (2011) estudaram uma grande treliça espacial amplamente utilizadas em naves espaciais para o controle de vibrações. No artigo apresentando eles estudaram a otimização do posicionamento de atuadores e sensores (POAS) e método *Fuzzy* adaptativo descentralizado para resolver o problema de controle de vibração. O controlador *Fuzzy* foi projetado para controlar o sistema de treliça inteligente para grandes espaços (LSITS).

Xu *et al.* (2015) consideraram o controle de vibração da estrutura inteligente, a estrutura de antena de membrana SAR com sensores e atuadores piezoelétricos foi utilizada como exemplo. O modelo dinâmico é construído com base no método dos elementos finitos intrínsecos da forma vetorial (VFIFE). O controle *Fuzzy* e o controle *Fuzzy* adaptativo foram aplicados para suprimir as vibrações de flexão e torção da estrutura SAR da membrana.

Em Medeiros *et al.* (2020), um controlador por modos deslizantes com compensação *Fuzzy* proporcional-derivativa de incertezas é empregado no controle ativo de vibrações de uma treliça de duas barras de liga com memória de forma. No intuito de facilitar o projeto do controlador, os autores utilizam dois modelos constitutivos: um polinomial para o desenvolvimento da lei de controle, e um outro mais sofisticado, para simular o comportamento termomecânico dos elementos da estrutura. Simulações numéricas mostram a robustez do controlador proposto frente as incertezas presentes no modelo e a presença de perturbações externas.

Para que se possa desenvolver um método de controle eficaz é necessário construir modelos matemáticos capazes de representar com precisão o comportamento dinâmico do sistema mecânico (REPINALDO *et al.*, 2018). Uma vez que a formulação dos comportamentos do sistema mecânico podem se tornar uma tarefa complexa, pois muitas vezes os parâmetros dos sistemas são desconhecidos, assim para identificar esses parâmetros pode-se utilizar o problema inverso e métodos de otimização.

O presente trabalho visa o controle ativo de vibrações de um sistema de dois graus de liberdade utilizando *Lógica Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver e aplicar o controle ativo de vibrações em um sistema de dois graus de liberdade por meio de controladores *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são descritos a seguir:

- Projetar os controladores utilizando *Lógica Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*;
- Projetar o sistema de controle sem o modelo inverso do atuador eletromagnético;
- Desenvolver programas computacionais e realizar a simulação numérica;
- Validar experimentalmente a metodologia proposta.

1.2 JUSTIFICATIVA

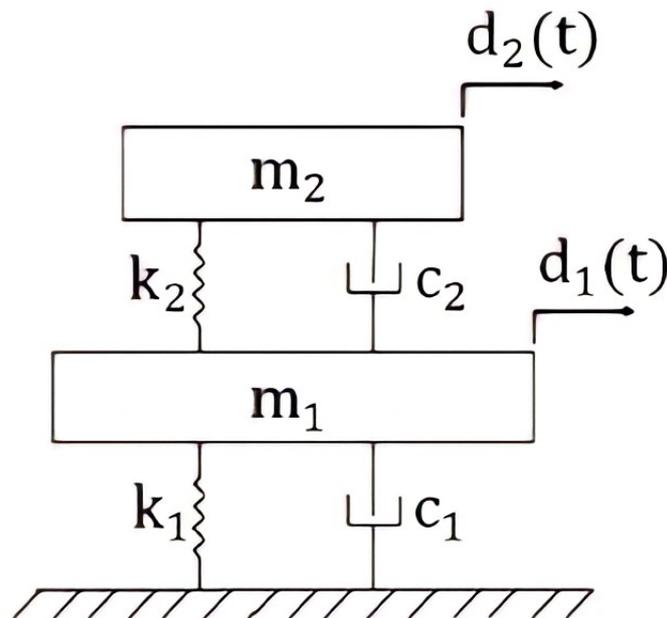
Técnicas de controle de vibrações tem sido amplamente pesquisada por diversos autores uma vez que as vibrações indesejáveis podem gerar desgastes prematuros para equipamentos ou mesmo prejudicar usuários. Diante deste cenário, o presente projeto visa a atenuação de vibrações por meio do uso de controladores projetados utilizando a *Lógica Fuzzy* e *Neuro-fuzzy*, os quais foram utilizados para determinar o esforço de controle a ser aplicado. As simulações numéricas foram realizadas por meio do *Software Matlab/Simulink®* e, por fim, foi verificado experimentalmente se a metodologia proposta está de acordo com a técnica adotada ao longo do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMA DE 2 GRAUS DE LIBERDADE

O sistema estudado é composto por duas massas m_1 e m_2 , sustentadas por molas com coeficientes de rigidezes k_1 e k_2 , e amortecedores com coeficientes de amortecimento c_1 e c_2 como ilustrado na Figura 1 (REPINALDO *et al.*, 2018).

Figura 1 – Modelo esquemático do sistema



Fonte: (REPINALDO *et al.*, 2018)

Para obter as equações referente ao modelo acima estudado são formuladas as equações diferenciais do movimento por meio das Leis de Newton aplicadas a cada uma das massas. Dessa forma, obtém-se as equações de movimento representadas pelas as equações de (1) a (6):

$$[m] \left\{ \ddot{d}(t) \right\} + [c] \left\{ \dot{d}(t) \right\} + [k] \left\{ d(t) \right\} = \{ F(t) \}, \quad (1)$$

sendo $[m]$, $[k]$ e $[c]$ respectivamente as matrizes de massa, rigidez e amortecimento, representadas pelas equações:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Os vetores de deslocamento $\{d(t)\}$ e de força $\{F(t)\}$ são apresentados pelas equações:

$$\{d(t)\} = \begin{Bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\{F_{exc}\} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Por meio das equações (1) e (6), observa-se que o sistema apresenta duas equações diferenciais de segunda ordem acopladas, ou seja, o movimento de uma das massas influencia na outra.

2.2 ESPAÇO DE ESTADOS

O estado de um sistema dinâmico é o menor conjunto de valores das variáveis, de modo que o conhecimento destes valores em $t = t_0$, junto com o conhecimento dos valores do sinal de entrada para $t \geq t_0$, determinam completamente o comportamento do sistema para qualquer instante $t \geq t_0$.

As variáveis de estado de um sistema dinâmico, são as grandezas de forma que o conjunto dos valores determina o estado de um sistema. Ou seja, se forem necessárias pelo menos n variáveis x_1, x_2, \dots, x_n para descrever completamente o comportamento do sistema dinâmico, então tais n variáveis são um conjunto de variáveis de estado. Ainda, se n variáveis de estado são necessárias para descrever completamente o comportamento de um sistema, logo essas n variáveis podem ser consideradas as n componentes de um vetor $\{x\}$. Esse vetor é chamado de Vetor de Estado, ou seja um vetor de estado é um vetor que determina univocamente o estado $\{x(t)\}$ do sistema para qualquer instante $t \geq t_0$, uma vez conhecido o estado em $t = t_0$ e a função de entrada $\{w(t)\}$ para $t \geq t_0$.

Por fim, o espaço de estados pode ser definido como o espaço n -dimensional cujos eixos coordenados consistem nos eixos x_1, x_2, \dots, x_n .

A representação física em um sistema de dois graus de liberdade para o Espaço de Estados é dada por (REPINALDO *et al.*, 2018):

$$\begin{aligned}\{\dot{x}(t)\} &= [A] \{x(t)\} + [B_u] \{u(t)\} + [B_w] \{w(t)\} \\ \{y(t)\} &= [C] \{x(t)\}\end{aligned}\quad (7)$$

de forma que $[A]$ é a matriz dinâmica, $[B_u]$ a matriz de entrada da força de controle, $[B_w]$ a matriz de entrada de força de excitação, $[C]$ a matriz de saída, $\{x(t)\}$ o vetor de estados de ordem $2n \times 1$, $\{y(t)\}$ o vetor de saída de ordem $n_s \times 1$, $\{u(t)\}$ o vetor da força de controle de ordem $n_u \times 1$ e $\{w(t)\}$ o vetor da força de excitação de ordem $n_w \times 1$. No qual, n é o maior número de grau de liberdade, n_s o número de saídas, n_u o número de entradas da força de controle e n_w o número de entradas da força de excitação.

2.3 SISTEMA FÍSICO

Os vetores e as matrizes da Equação (7) são dadas por

$$x(t)_{2n \times 1} = \begin{Bmatrix} d(t)_{2n \times 1} \\ \dot{d}(t)_{2n \times 1} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$[A]_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [I]_{n \times n} \\ [-[M]^{-1}[k]]_{n \times n} & [-[M]^{-1}[c]]_{n \times n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[B_u]_{2n \times n_u} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [P_u]_{n \times n_u} \\ [M]_{n \times n}^{-1} & [P_u]_{n \times n_u} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[B_w]_{2n \times n_w} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [P_w]_{n \times n_w} \\ [M]_{n \times n}^{-1} & [P_w]_{n \times n_w} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[C]_{n_s \times n} = \begin{bmatrix} [P_s]_{n_s \times n} & [I]_{n \times n} & [P_s]_{n_s \times n} & [0]_{n \times n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

sendo $[P_u]$ a matriz de posicionamento da força de controle, $[P_w]$ a matriz de posicionamento da força de excitação e $[P_s]$ a matriz de posicionamento da saída.

2.4 ANÁLISE MODAL

Quando o sistema apresenta duas equações diferenciais de segunda ordem, pode-se utilizar o método da análise modal, este método utiliza o Teorema da Expansão. Os deslocamentos das massas são expressos como uma combinação linear dos modos normais do sistema, a transformação linear desacopla as equações de movimento, de modo a obter-se um conjunto de n equações diferenciais de segunda ordem não acopladas (RAO, 2008).

Assim, tem-se duas equações diferenciais desacopladas e cada equação será representada por um sistema de um grau de liberdade que representará cada modo da estrutura. O sistema descrito na Equação (1), pode ser simplificado como informado por meio da equação (13), desprezando-se tanto a força de excitação, ou seja, $F_1(t) = F_2(t) = 0$, como o amortecimento do sistema, este caso é denominado sistema livre não amortecido, regido pela equação

$$[m] \{ \ddot{d}(t) \} + [k] \{ d(t) \} = 0. \quad (13)$$

Considerando a solução deste problema descrito na Equação (14):

$$\{ d(t) \} = \{ \Theta \} e^{j\omega t}, \quad (14)$$

sendo $\{ \Theta \}$ o vetor correspondente as formas modais do problema, j apresenta a unidade imaginária e ω a frequência angular. Substituindo a Equação (14) na (13) obtém-se a Equação (15):

$$-\omega^2 [m] \{ \Theta \} e^{j\omega t} + [k] \{ \Theta \} e^{j\omega t} = 0. \quad (15)$$

Manipulando a equação (15) e levando em consideração que $e^{j\omega t} \neq 0$ pode-se escrever a Equação (15) da seguinte forma:

$$([k] - \omega^2 [m]) \{ \Theta \} = 0. \quad (16)$$

A Equação (16) representa o problema clássico de autovalor e autovetor. Os autovalores são dados por ω^2 , e estão relacionados diretamente com a frequência natural do sistema. Os autovetores são dados por $\{ \Theta \}$, e representam os modos de vibrar do sistema não amortecido. Os modos de vibrar consistem em uma base ortogonal, denominada de matriz modal ou base modal. A matriz modal apresenta as formas de vibrar Θ_1 e Θ_2 do sistema, correspondentes as frequências naturais e ω_{n1} e ω_{n2} .

Assim, o sistema pode ser descrito em coordenadas modais como na equação (17):

$$\{d_m(t)\} = [\Theta] \{d(t)\}. \quad (17)$$

Substituindo a Equação (17) em (1) e pré multiplicando $[\Theta]^T$, tem-se que:

$$[\Theta]^T [m] [\Theta] \{\ddot{d}_m(t)\} + [\Theta]^T [C] [\Theta] \{\dot{d}_m(t)\} + [\Theta]^T [k] [\Theta] \{d_m(t)\} = [\Theta]^T [F(t)]. \quad (18)$$

E ainda pode-se escrever a Equação (18) na forma

$$[m_m] \{\ddot{d}_m(t)\} + [c_m] \{\dot{d}_m(t)\} + [k_m] \{d_m(t)\} = \{F_m(t)\}. \quad (19)$$

Assim, através da matriz modal as equações acopladas do movimento foram transformadas para o mesmo número de equações desacopladas, cada equação representa um modo particular de vibrar e é representando por um sistema de um grau de liberdade.

2.4.1 Sistema Modal

Os vetores e matrizes da Equação (7) apresentados no domínio modal são dados por

$$\{x_m(t)\}_{2n \times 1n} = \begin{Bmatrix} \{d_m(t)\}_{2n \times 1} \\ \{\dot{d}_m(t)\}_{2n \times 1} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

$$[A_m]_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [I]_{n \times n} \\ [-[m_m]^{-1} [k_m]]_{n \times n} & [-[m_m]^{-1} [c_m]]_{n \times n} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[B_{um}]_{2n \times n_u} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [P_u]_{n \times n_u} \\ [m_m]_{n \times n}^{-1} [\Theta]_{n \times n}^T & [P_u]_{n \times n_u} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[B_{wm}]_{2n \times n_w} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [P_w]_{n \times n_w} \\ [m_m]_{n \times n}^{-1} [\Theta]_{n \times n}^T & [P_w]_{n \times n_w} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[C_m]_{n_s \times n} = \begin{bmatrix} [P_s]_{n_s \times n} [\Theta]_{n \times n}^T & [I]_{n \times n_s} & [P_s]_{n_s \times n} [\Theta]_{n \times n}^T & [0]_{n \times n} \end{bmatrix} \quad (24)$$

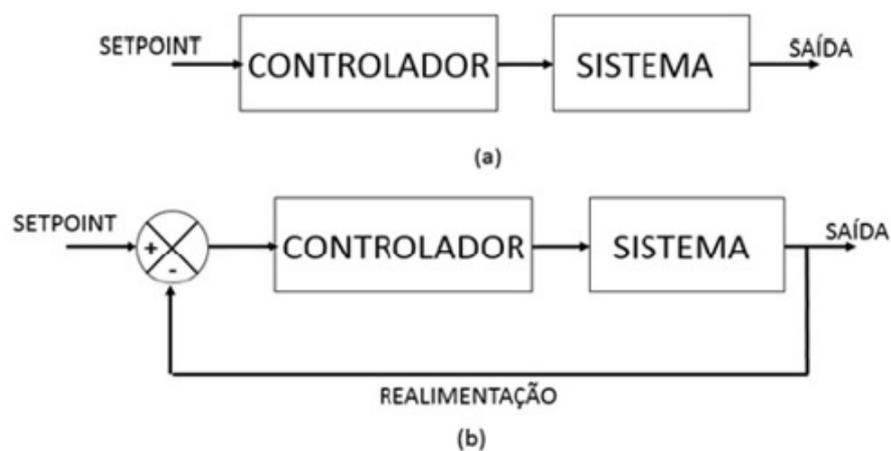
onde $[A_m]$ é a matriz modal, $[B_{um}]$ a matriz de entrada modal do controlador, $[B_{wm}]$ a matriz de entrada modal da força de excitação e $[C_m]$ a matriz de saída modal.

3 TEORIA DE CONTROLE

O papel do controle é fundamental na indústria uma vez que por meio do mesmo é possível otimizar o desempenho do sistema dinâmico. Os sistemas de controle tratam basicamente da manutenção de grandezas como temperatura e pressão em valores operacionais desejados ou da condução de uma determinada variável. Uma forma de atingir esse objetivo é medir a saída do sistema, compará-la com um valor pré-definido e, então, decidir o que fazer para diminuir qualquer desvio (PINHEIRO *et al.*, 2009).

Os sistemas de controle podem ser divididos em duas estruturas: malha fechada e malha aberta, isso dependerá da complexidade e das perturbações que o sistema sofrerá. A Figura 2 apresenta um sistema de controle de malha fechada e um sistema de controle de malha aberta.

Figura 2 – (a) sistema malhada aberta; (b) sistema malha fechada



Fonte: (REPINALDO *et al.*, 2018)

Diversos tipos de controladores em sistema malha fechada são utilizados atualmente na indústria, alguns exemplos: o controlador LQR, *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*.

3.1 REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO (LQR)

O regulador quadrático linear é projetado com o objetivo de minimizar uma função custo ou mesmo minimizar um desempenho por meio da realimentação de estados como descrito na sequência (PINHEIRO *et al.*, 2009).

Considere o controle de realimentação dada pela equação

$$\{u(t)\} = -[G] \{x(t)\}, \quad (25)$$

sendo o ganho $[G]$ determinado através da minimização da função custo dada pela equação (26):

$$J = \int_0^{\infty} \left\{ \{x(t)\}^T [Q]_{lqr} \{x(t)\} + \{u(t)\}^T [R]_{lqr} \{u(t)\} \right\} dt, \quad (26)$$

no qual $[Q]_{lqr}$ é uma matriz hermitiana¹ definida positiva (ou semi-definida positiva) ou real simétrica e $[R]_{lqr}$ é uma matriz hermitiana definida positiva ou real simétrica.

Substituindo-se a equação (25) na equação (26) obtém-se a equação (27):

$$J = \int_0^{\infty} \left\{ \{x(t)\}^T \left([Q]_{lqr} + [G]^T [R]_{lqr} [G] \right) \{x(t)\} \right\} dt. \quad (27)$$

A matriz de ganho $[G]$ apresentada por Ogata (1997) é dada por

$$[G] = [T]_{lqr}^{-1} \left([T]_{lqr}^T \right)^{-1} [B]^T [P]_{lqr} = [R]_{lqr}^{-1} [B]^T [P]_{lqr}, \quad (28)$$

sendo $[P]_{lqr}$ uma matriz hermitiana definida positiva ou simétrica real, a qual pode ser obtida resolvendo-se a equação matricial reduzida de Riccati, dada pela equação

$$[A]^T [P]_{lqr} + [P]_{lqr} [A] - [P]_{lqr} [B] [R]_{lqr}^{-1} [B]^T [P]_{lqr} + [Q]_{lqr} = 0. \quad (29)$$

O ganho dado pela Equação (28) é determinado substituindo a matriz $[P]_{lqr}$, obtida na Equação (29), na Equação (28).

3.2 LÓGICA FUZZY

A *Lógica Fuzzy* ou também conhecida como *Lógica Nebulosa* ou *Difusa*, surgiu da constatação de que a habilidade para concluir fatos e tomar decisões precisas utilizando apenas a lógica clássica, proposições somente verdadeiras ou falsas, diminui quando a complexidade de um sistema aumenta (ZADEH, 1973).

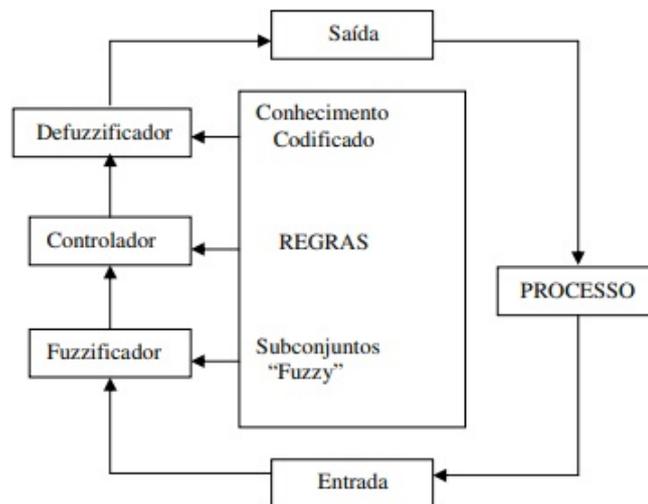
A teoria do conjunto *Fuzzy* foi desenvolvida por Zadeh em 1965 para lidar com fenômenos imprecisos e incertos. Diferente da lógica clássica, onde os valores são binários, 0 e 1 ou verdadeiro e falso, a *Lógica fuzzy* permite que as proposições sejam expressas linguisticamente, verdadeira, parcialmente verdadeira ou muito verdadeira, assumindo assim diferentes graus de pertinência (PEDRYCZ *et al.*, 1998).

¹ Matrizes hermitianas podem ser compreendidas como a generalização complexa das matrizes simétricas reais.

A característica especial da *Lógica Fuzzy* é de representar manuseio de informações imprecisas, de forma muito distinta da teoria de probabilidade. A *Lógica Fuzzy* provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos (SIMÕES; SHAW, 2007).

Os sistemas de *Lógica Fuzzy* permitiram mudar o paradigma clássico da teoria de controle. Ao contrário da teoria clássica, o controlador baseado na *Lógica Fuzzy* não necessita de um modelo analítico completo do processo, utilizando como base informações humanas sobre o processo em questão. Na Figura 3 tem-se a estrutura de um controlador *Fuzzy*, a estrutura é composta por: fuzzificação, base de conhecimento, sistema de inferência e defuzzificação (REPINALDO *et al.*, 2018).

Figura 3 – Estrutura do controlador Fuzzy



Fonte: (PADILHA, 2001)

De acordo com Repinaldo *et al.* (2018) a *fuzzificação* consiste no processo de transformação dos valores do domínio real para o domínio *Fuzzy*. Desta forma, para cada variável de entrada (x_i) são criadas funções de pertinência, as quais definirão o valor da entrada no domínio *Fuzzy* como mostra a Equação (30), onde

$$0 < (\mu_{A_i}(x)) < 1 \quad (30)$$

representa a função de pertinência.

As funções de pertinência indicam o quanto um elemento pertence a um dado conjunto, e podem ser do tipo triangular, trapezoidal, gaussiana e sigmoide (REPINALDO *et al.*, 2018).

A base de conhecimento é constituída de uma base de dados juntamente com uma base de regras *Fuzzy* linguísticas do tipo SE-ENTÃO. A base de dados fornece as definições

numéricas necessárias às funções de pertinência usadas no conjunto de regras *Fuzzy*. A base de regras contém todas as situações possíveis relativas as entradas e saídas (BRESSAN, 2007).

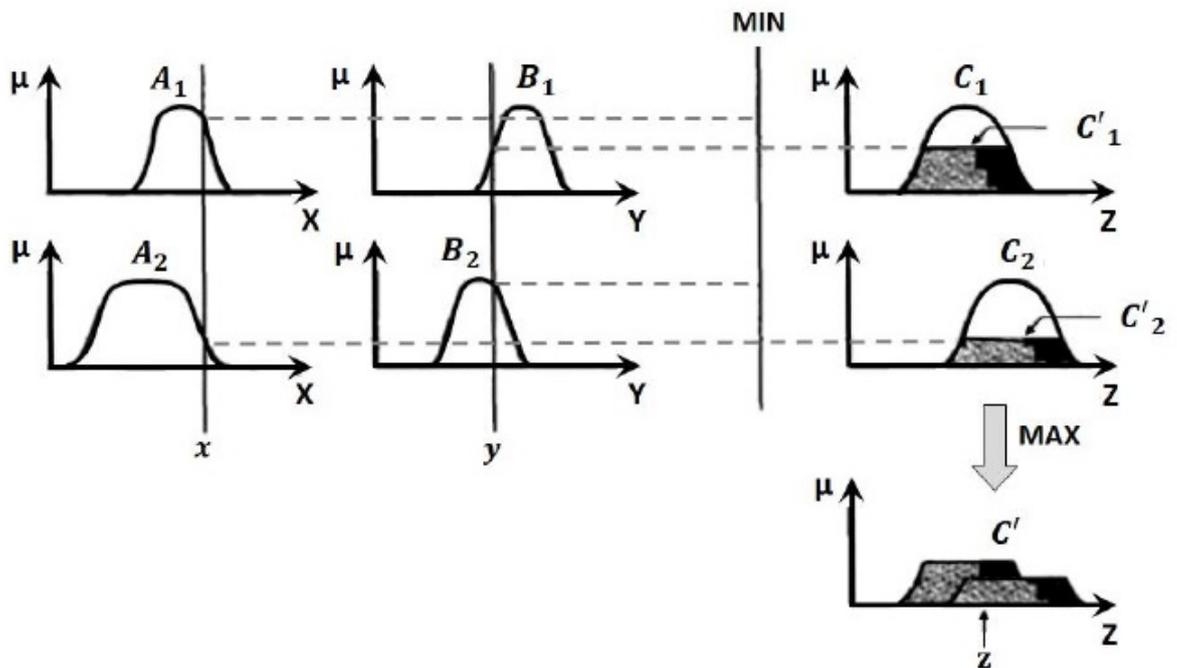
Segundo Bressan (2007) o processo de inferência avalia os níveis de compatibilidade das entradas com condições impostas pelas várias regras, resultando em um conjunto *Fuzzy*. Os métodos de inferência mais conhecidos são: Mamdani e Takagi-Sugeno.

O método de inferência Mamdani utiliza conjuntos *Fuzzy* no antecedente e no consequente das regras, sendo a saída final representada por um conjunto *Fuzzy* resultante da agregação da saída. A regra de Mamdani: Se x é A_1 e y é B_1 então z é C_1 (CHAVES *et al.*, 2013).

O modelo de inferência do tipo Takagi-Sugeno consiste na combinação linear dos conjuntos *Fuzzy*, sendo a saída final obtida pela média ponderada das combinações lineares (REPINALDO *et al.*, 2018). A regra de Takagi-Sugeno: Se x é A e y é B então $z = f(x,y)$.

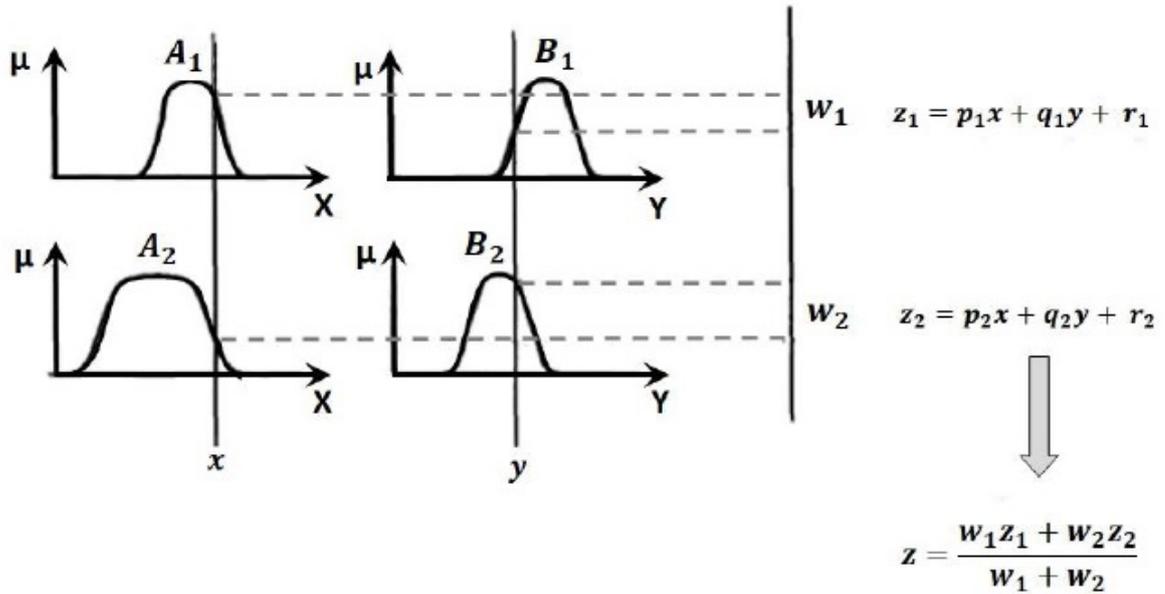
Nas Figuras 4 e 5 pode-se verificar, respectivamente os modelos de inferências citados anteriormente.

Figura 4 – Modelo de inferência Mamdani



Fonte: (CHAVES *et al.*, 2013)

Figura 5 – Modelo de inferência Takagi-Sugeno



Fonte: (CHAVES *et al.*, 2013)

Por fim, a defuzzificação transforma a variável linguística obtida por meio da inferência em uma saída numérica.

3.3 NEURO-FUZZY

O sistema híbrido *Neuro-Fuzzy* é a combinação de duas técnicas, sendo elas: *Fuzzy* e Redes Neurais. A *Lógica Fuzzy* providencia os pensamentos teóricos para a captura de incertezas, associadas com o pensamento humano por meio, de empregos linguísticos de variáveis utilizadas em um sistema com base de regras que, expressam o comportamento de um processo através de relações do tipo SE... ENTÃO (BRESSAN, 2007).

Enquanto que, as Redes Neurais Artificiais são adequadas na criação do controle baseado no conhecimento implícito embutido em um conjunto de dados, porém o desempenho das Redes Neurais Artificiais é afetado pelo ajuste de parâmetros (número de neurônios de cada camada, número de camadas escondidas, etc). Deste modo, os pesquisadores tem buscado integrar essas duas técnicas para gerar um modelo híbrido que possa aproveitar as vantagens de cada uma e, conseqüentemente minimizar as suas deficiências (SANCHEZ, 2009).

Logo, o sistema *Neuro-Fuzzy* consiste em uma Rede Neural Artificial que de alguma forma gera as regras e as funções de pertinências para o sistema *Fuzzy*.

3.3.1 Redes Neurais Artificiais

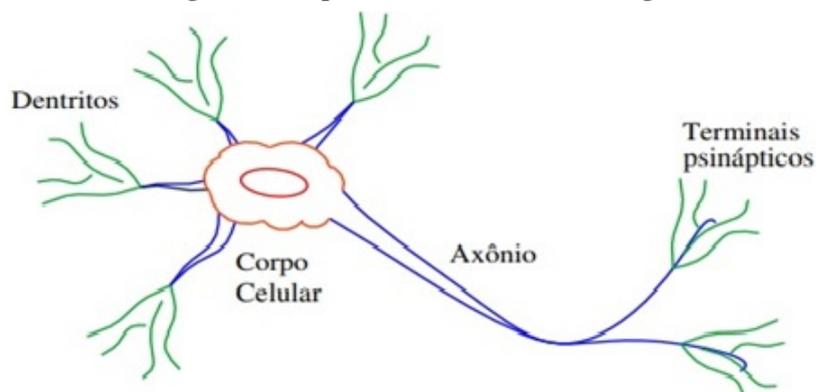
O cérebro é um computador altamente complexo, não linear e paralelo (sistema de processamento de informações). Isto é, tem a capacidade de organizar seus constituintes estruturais, conhecidos como neurônios, de modo a realizar certos cálculos como: reconhecimento de padrões, percepção e controle motor (HAYKIN, 2009).

As Redes Neurais Artificiais estão constituídas por unidades básicas independentes designadas como neurônios (processadores ou nós). Cada unidade possui ligações para outras unidades, as quais comunicam entre si através de sinapse, formando uma rede de nós, por isso o nome rede neural (SANCHEZ, 2009).

As Redes Neurais artificiais realizam o processamento de informações baseado na organização dos neurônios do cérebro, as quais têm a capacidade de aprender e tomar decisões baseadas na aprendizagem. Além disso, uma rede neural é um processador paralelo massivo, distribuído, constituído por unidades de processamentos simples, que têm a capacidade de armazenamento de conhecimento experimental e de torná-lo disponível para uso (SANCHEZ, 2009).

De acordo com (SANCHEZ, 2009) o neurônio é a unidade fundamental para processar informações para uma rede neural. Essa unidade celular é responsável por exemplo, pelas tomadas de decisões e reconhecimentos de padrões. Na Figura 6 tem-se um esquema básico de um neurônio biológico.

Figura 6 – Esquema de um neurônio biológico



Fonte: (SANCHEZ, 2009)

Os dentritos são os responsáveis por receber estímulos, o corpo é responsável pela síntese de todas as proteínas neurais ou seja, ele processa novas informações e junto com os dentritos também recebe estímulos, os axônios são responsáveis por transmitir os sinais para

outras células, como por exemplo, outros neurônios.

Observe que na Figura 7 tem-se um modelo de um neurônio básico. O autor HAYKIN (2009) cita três elementos para identificarmos elementos básicos em uma rede neural:

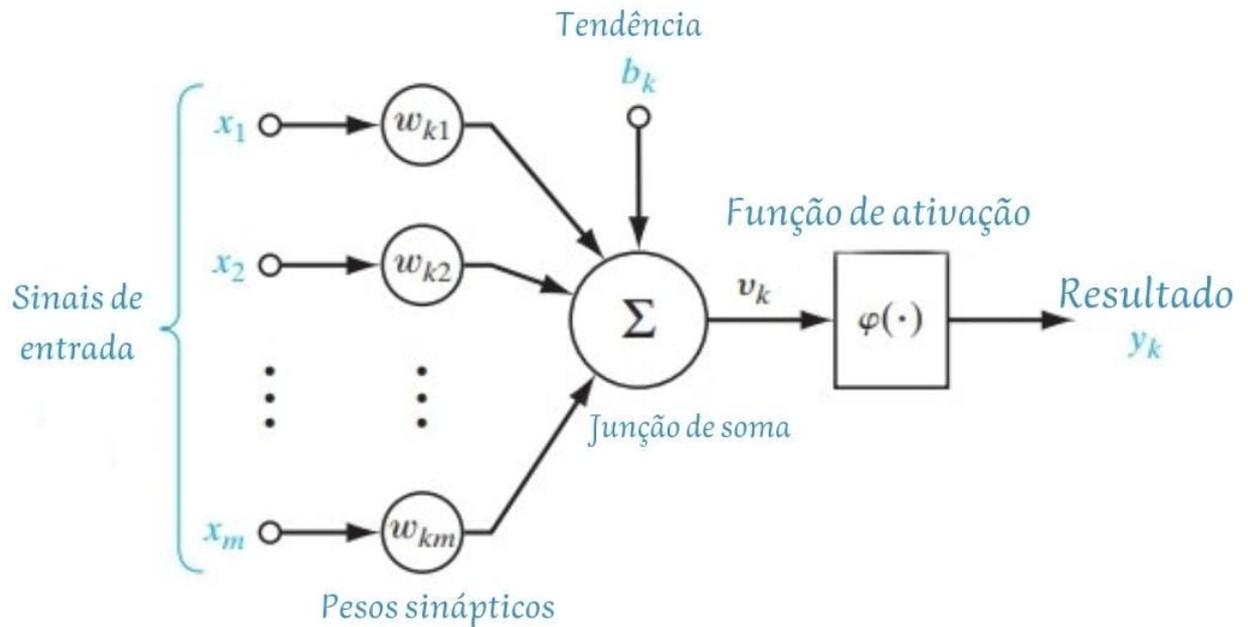
- Um conjunto de sinapses cada um caracterizado por um peso ou força própria. Um sinal x_j na entrada da sinapse j conectado ao neurônio k é multiplicado pelo peso sináptico w_{kj} . Algo há se observar nos w_{kj} , o primeiro w_{kj} representa o neurônio em si e o segundo refere-se ao final da entrada da sinapse à qual pese se refere. Ao contrário do peso de uma sinapse no cérebro, o peso sináptico de um neurônio artificial pode estar em um intervalo que inclui tantos valores positivos como negativos;
- Um Adicionador para soma dos sinais de entrada, ponderados pelos respectivos pesos sinápticos do neurônio; as operações descritas aqui contituem uma combinação linear;
- Uma função de ativação para limitar a amplitude da saída de um neurônio. A função de ativação é também conhecida como função de esmagamento, na medida em que esmaga (limita) a faixa de amplitude permissível do sinal de saída para algum valor finito.

O modelo apresentando na Figura 7 possui uma polarização aplicada denotada por b_k . A polarização b_k , tem o objetivo de aumentar ou diminuir a entrada da função ativação, positivamente ou negativamente.

O Sistema de Inferência *Neuro-Fuzzy* (ANFIS) trata-se de uma rede neural proposta por (JANG, 1993). É utilizado para efetuar o treinamento do sistema *Neuro-Fuzzy* com um sistema de inferência do tipo Takagi-Sugeno, o qual combina o método *backpropagation* com o método dos mínimos quadrados. O método de *backpropagation* é um importante dispositivo de treinamento das Redes Neurais, trata-se de um treinamento orientado. O conjunto de dados no editor ANFIS deve estar disposto no formato de uma matriz, em que cada coluna dessa matriz refere-se aos dados de entrada e saída, para que aconteça o treinamento da Rede Neural. O conjunto de dados deve ser particionado em dois subconjuntos: de treinamento e de teste. Os dados do subconjunto de treinamento, geralmente 80% dos dados disponíveis, são utilizados para o treinamento da rede, cujo objetivo é o ajuste das funções de pertinência. Os dados do subconjunto de teste, geralmente 20% dos dados disponíveis, são utilizados para avaliar se a rede está generalizando de forma satisfatória (BRESSAN, 2007).

De acordo com Repinaldo *et al.* (2018), o sistema ANFIS possui uma arquitetura de multicamadas, interligadas através de pesos e conexões unidirecionais e aprendizado supervisi-

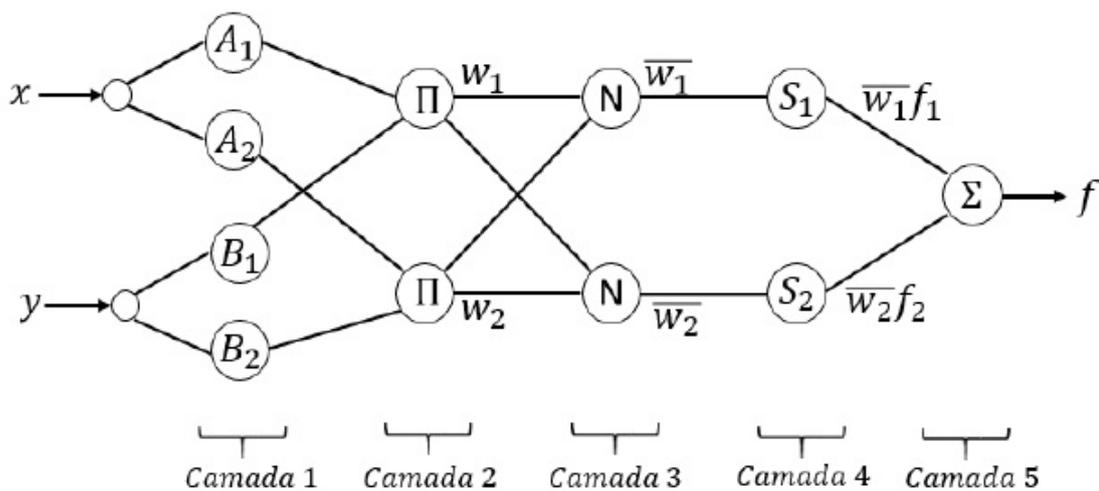
Figura 7 – Modelo neurônio biológico



Fonte: Adaptado (HAYKIN, 2009)

onado. Essas camadas irão corresponder uma etapa do processamento, esses processamentos resultam em uma saída desejada através do sistema de inferência *Fuzzy Takagi-Sugeno* (JANG, 1993). Na Figura 8 pode-se observar essas camadas.

Figura 8 – Arquitetura ANFIS



Fonte: (REPINALDO *et al.*, 2018)

O modelo da arquitetura ANFIS acima mostra cinco camadas de neurônios, essas

camadas serão descritas a seguir (JANG, 1993)

Primeiro considera-se duas variáveis de entrada (x,y) e uma saída (z) além disso, suponha que a base de regra do tipo *Fuzzy Takagi-Sugeno* contenha duas regras do tipo se-então:

- Se x é A_1 e y é B_1 , então $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$
- Se x é A_2 e y é B_2 , então $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

O nó funciona na mesma camada, e pertencem a mesma família de funções, conforme descrito a seguir:

1ª Camada - Cada nó i nesta camada é um nó ao quadrado com uma função do nó

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (31)$$

onde x é a entrada para o nó e A_i é o rótulo linguístico associado com a função nó. Normalmente, escolhe-se $\mu_{A_i}(x)$ em forma de sino com o máximo igual a 1 e o mínimo igual a zero. Assim,

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x-c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (32)$$

2ª Camada - Cada nó nessa camada é um nó circulado rotulado “ Π ” que multiplica os sinais e os envia para fora da camada.

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), i = 1,2 \quad (33)$$

cada saída de nó representa a força de saída de uma regra.

3ª Camada - Cada nó nesta camada é um nó circular rotulado *N.O* i -ésimo nó calcula a razão da i -ésima força de disparo da regra com a soma de todas as forças de disparo das regras:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1,2 \quad (34)$$

4ª Camada - Cada nó i nesta camada é um nó quadrado com uma função de nó:

$$O_i^5 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i(x) + q_i(x) + r_i) \quad (35)$$

onde, \bar{w}_i é a saída da camada 3, e $\{p_i, q_i, r_i\}$ são o conjunto dos parâmetros.

5ª Camada- O único nó nesta camada é um nó circular rotulado “ Σ ” que calcula a saída geral como a soma de todos os sinais de entrada:

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (36)$$

3.4 OBSERVADOR DE ESTADOS

De acordo com Ogata (1997) um observador de estados estima as variáveis de estado com base nas medições das variáveis de saída e controle, quando não é possível fazer as medições das variáveis se faz necessário o uso desse dispositivo para estimar ou observar essas variáveis. O observador de estados pode ser descrito matematicamente igual ao modelo de estados (REPINALDO *et al.*, 2018):

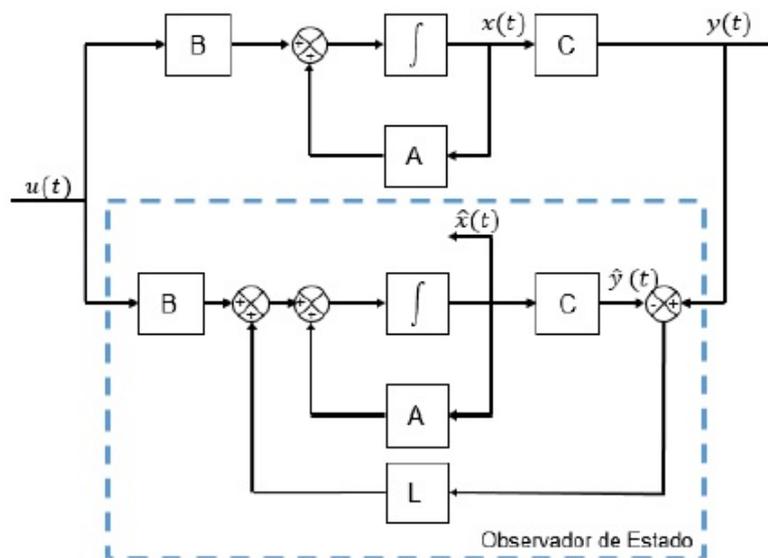
$$\begin{aligned} \{\dot{\hat{x}}(t)\} &= [A] \{\hat{x}(t)\} + [B] \{u(t)\} + [L] (\{y(t)\} - \{\hat{y}(t)\}) \\ \{\hat{y}(t)\} &= [C] \{\hat{x}(t)\} \end{aligned} \quad (37)$$

onde $\hat{x}(t)$ é o estado estimado, o $\{\hat{y}(t)\}$ é o vetor de saída do observador e $[L]$ a matriz de ganha do observador de estados. O erro de estimação é dado pela diferença entre a saída medida e a saída estimada conforme a equação

$$\{e(t)\} = \{x(t)\} - \{\hat{x}(t)\}. \quad (38)$$

A Figura 9 apresenta o diagrama de bloco do observador de estados

Figura 9 – Diagrama de blocos do Observador de Estados



Fonte: (REPINALDO *et al.*, 2018)

A observabilidade de um sistema é dada pela análise do posto (*rank*) da matriz de

observabilidade, o qual deve ser igual a ordem desta matriz

$$\text{rank} \left(\begin{array}{c} C \\ \dots \\ CA \\ \vdots \\ CA^{2n-1} \end{array} \right) = 2n \quad (39)$$

onde a matriz A e C são observáveis.

4 ATUADOR ELETROMAGNÉTICO

Os atuadores eletromagnético (AEMs) são um dispositivo que faz conversão de energia elétrica para mecânica, é composto por um núcleo ferromagnético e por bobinas eletromagnéticas, também conhecidas como solenoides. Ao aplicar uma corrente nas bobinas um campo magnético é criado em seu núcleo ferromagnético, dessa forma nas folgas (*gap*) são induzidos polos magnéticos gerando uma força magnética (REPINALDO *et al.*, 2018).

Por meio da Lei Ampère descrita em Halliday *et al.* (2007) pode-se obter o campo magnético de um solenoide (bobinas eletromagnéticas) conforme descreve o autor (MORAIS *et al.*, 2010):

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i, \quad (40)$$

onde \vec{H} representa o campo magnético, $d\vec{l}$ o segmento diferencial de linha e o i representa a corrente elétrica. A corrente total é composta pela corrente que percorre a solenoide (i_0) e o número de espiras (N_e), logo:

$$i = i_0 N_e. \quad (41)$$

O campo magnético \vec{H} cria uma densidade de fluxo magnético com o campo magnético, logo esta grandeza pode ser relacionada ao um coeficiente chamado coeficiente de permeabilidade μ na forma:

$$H = \frac{B}{\mu}, \quad (42)$$

sendo $\mu = \mu_0 \mu_r, \dots, \mu_0$ a permeabilidade magnética do vácuo e μ_r a permeabilidade magnética relativa do material ferromagnético, substituindo as equações (41) e (42) em (43) obtém-se a equação (44) que é o valor do campo magnético produzido por um solenoide ao longo de seu eixo de simetria:

$$B = \mu \frac{N_e i_0}{l}. \quad (43)$$

Ainda, integrando o campo magnético pela área da seção transversal que o campo atravessa, tem-se o fluxo magnético. O fluxo magnético é definido por Φ por meio da equação:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}. \quad (44)$$

Pelas equações (44) e (45), obtém-se:

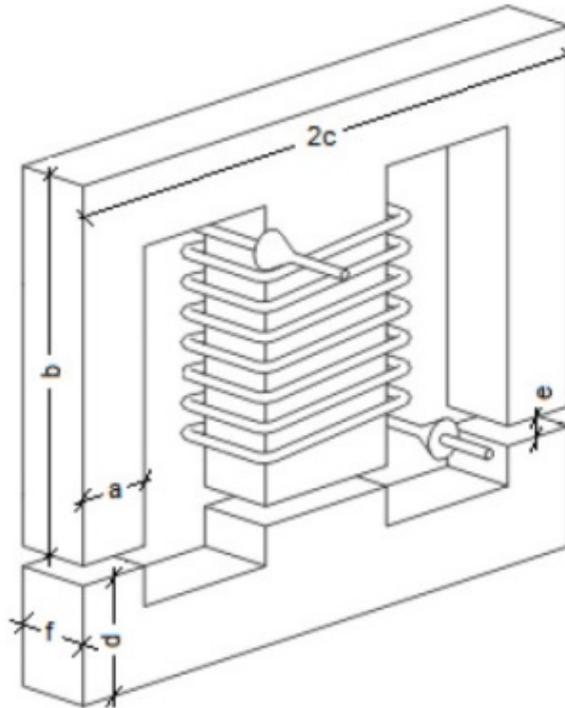
$$\Phi = BA_s = \left(\mu \frac{N_e i_0}{l} \right) A_s = \frac{N_e i_0}{\mathcal{R}} = \frac{F_m}{\mathcal{R}}, \quad (45)$$

onde $F_m = N_e i_0$ é a força magnetomotriz e $\mathcal{R} = \frac{1}{\mu A_s}$ é relutância magnética.

A metodologia descrita para obtenção do modelo do atuador eletromagnético a seguir foi retirada de Moraes *et al.* (2010).

O esquema mostrado na Figura 10 representa uma bobina enrolada em um núcleo de material ferromagnético e o núcleo é composto por diversas lâminas.

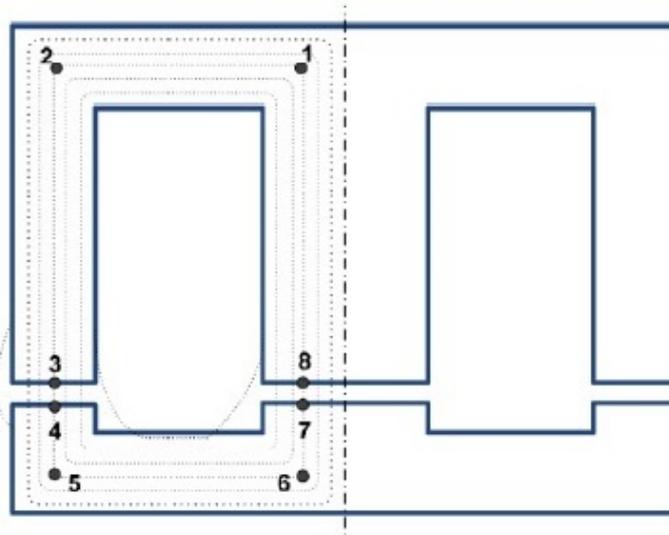
Figura 10 – Eletroímã do atuador eletromagnético



Fonte: (MORAIS *et al.*, 2010)

Na Figura 11 tem-se dois fluxos eletromagnéticos iguais e entre eles circula sempre a mesma quantidade de fluxo magnético. Esta hipótese vem, de fato, desprezar os fluxos de fuga (os fluxos que não passam pelos entreferros).

Figura 11 – Fluxo de campos magnéticos com fluxo



Fonte: (MORAIS *et al.*, 2010)

Levando em consideração a simetria do dispositivo, é possível estudar a metade do circuito magnético. Os fluxos que circulam em cada um dos ramos laterais são iguais e se igualam à metade do fluxo que circulam no ramo central. Conhecendo o comprimento médio l e a secção transversal S de diferentes elementos do circuito magnético, assim como a permeabilidade μ_r do material, pode-se calcular as novas relutâncias desse circuito, a partir da expressão:

$$\mathcal{R}_i = \frac{l}{\mu_r S}, \quad (46)$$

sendo que, μ_r é a permeabilidade relativa do material ferromagnético do núcleo ($\mu = \mu_r \mu_0$), permeabilidade considerada constante. Qualquer que seja a corrente, calcula-se:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{8-1} = \mathcal{R}_{2-3} &= \frac{b - \frac{a}{2}}{\mu_0 \mu_r a f} \\ \mathcal{R}_{1-2} = \mathcal{R}_{5-6} &= \frac{c - a}{\mu_0 \mu_r a f} \\ \mathcal{R}_{3-4} = \mathcal{R}_{7-8} &= \frac{e}{\mu_0 \mu_r a f} \\ \mathcal{R}_{4-5} = \mathcal{R}_{6-7} &= \frac{d - \frac{a}{2}}{\mu_0 \mu_r a f} \end{aligned} \quad (47)$$

Dessa forma, o fluxo para cada um dos ramos do circuito é dada pela equação (48):

$$\Phi = \frac{N_e i_0 \mu_0 a f}{e + \frac{b+c+d-2a}{\mu_r}}, \quad (48)$$

onde (a, b, c, d, f) são parâmetros geométricos, (N_e) são os números de espiras, a permeabilidade do vácuo é dada por μ_0 , a permeabilidade relativa do material ferromagnético (μ_r) e a solenoide (i_0).

O fluxo total induzido nas N_e espirais da bobina é dado por

$$\Psi = N_e \Phi = Li_0. \quad (49)$$

Pela equação (49) pode-se determinar a indutância magnética no AEM:

$$L = \frac{N_e^2 i \mu_0 a f}{e + \frac{b+c+d-2a}{\mu_r}}. \quad (50)$$

A energia magnética armazenada na bobina é dada por

$$W_m = \int_0^1 \Psi di_k = \frac{1}{2} LI^2. \quad (51)$$

Sabe-se que a força da atração eletromagnética entre dois núcleos ferromagnéticos é dada por

$$F_{em} = \frac{\partial W_m}{\partial e}. \quad (52)$$

Por fim, as equações (51) e (52) define força de atração entre dois elementos do núcleo ferromagnético dada por:

$$F_{em} = \frac{\partial W_m}{\partial e} = \frac{N_e^2 I^2 \mu_0 a f}{2 \left((e \pm \delta) + \frac{b+c+d-2a}{\mu_r} \right)^2}, \quad (53)$$

sendo δ a variável que se acrescenta ao entreferro para representa o deslocamento dos sistema na posição AEM. Como AEM aplica apenas a força de atração, então o sinal “ \pm ” deve ser entendido da seguinte forma: o valor “+” para $\delta > 0$; e “-” para $\delta < 0$.

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros utilizados dos atuadores eletromagnéticos.

Tabela 1 – Parâmetros dos atuadores eletromagnéticos

Parâmetros	Valores
$\mu_0 [H/m]$	$1,2566 \times 10^{-6}$
$N_e [espiras]$	237
a [mm]	9,5
b [mm]	38
c [mm]	28,5
d [mm]	9,5
e [mm]	1,5
f [mm]	21,5
μ_{r1}	450
μ_{r2}	688,27

Fonte: Adaptado de (KOROISHI *et al.*, 2013)

O padrão do fio de cobre utilizado na bobina do atuador eletromagnético é do tipo AWG24 (*American Wire Gauge*). Na Tabela 2 tem-se as propriedades dos fios utilizados.

Tabela 2 – Propriedades do fio de cobre AWG24

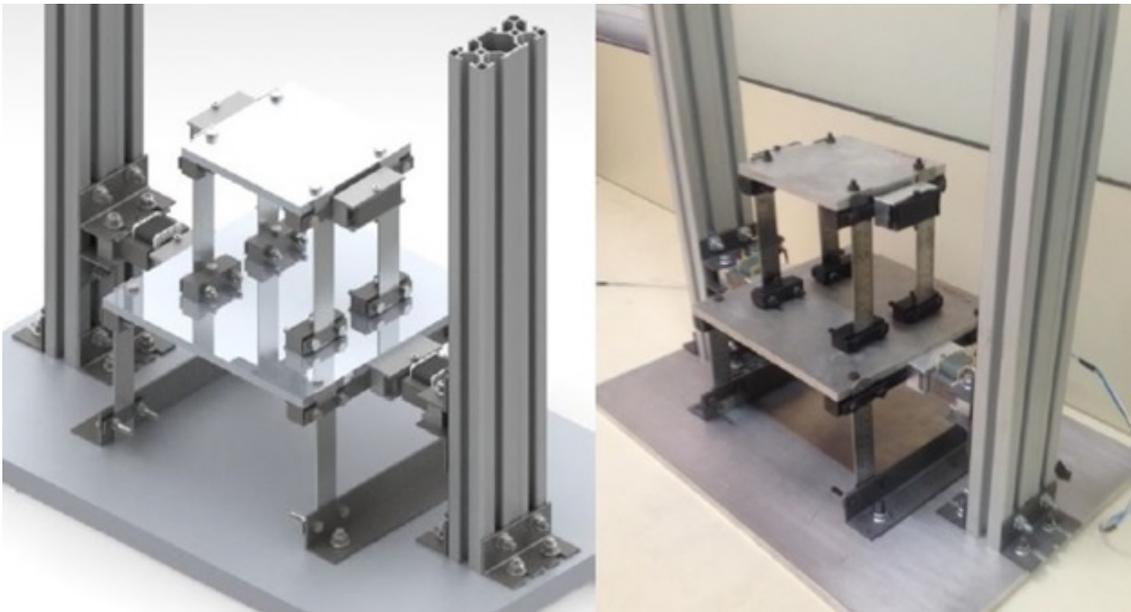
Diâmetro [mm]	0,511
Área [mm ²]	0,250
Resistência a 20° [Ω/m]	0,0842
Corrente Máxima [A]	3,5

Fonte: (KOROISHI *et al.*, 2013)

5 METODOLOGIA

O sistema mecânico estudado consistiu em uma bancada de um sistema de dois graus de liberdade massa-mola-amortecedor. A Figura 12 apresenta o desenho da estrutura através do *Software SolidWorks®* e a bancada experimental, a bancada é composta por duas chapas de alumínio que representam as massas, as chapas são sustentadas por régulas de aço inoxidável correspondentes aos elementos de rigidez e amortecimento do sistema. A bancada também possui dois atuadores eletromagnéticos posicionado nas laterais opostas e estrutura (REPINALDO *et al.*, 2018).

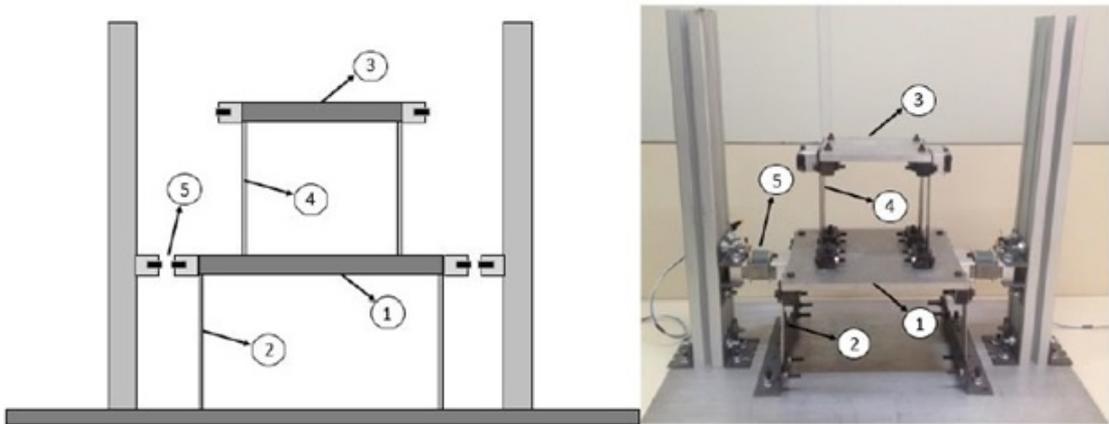
Figura 12 – Bancada experimental (a) concepção CAD (b) foto da bancada



Fonte: (REPINALDO *et al.*, 2018)

O esquema da estrutura é apresentado na Figura 13 e descritos por Repinaldo *et al.* (2018), sendo em (1) a massa m_1 , em (2) os parâmetros k_1 e c_1 , em (3) a massa m_2 em (4) os parâmetros de rigidez e amortecimento k_2 e c_2 e (5) os atuadores eletromagnéticos. Os parâmetros correspondentes as massas da estrutura, foram determinados pela balança de precisão, sendo seus respectivos valores $m_1= 4,38262$ kg e $m_2=1,93959$ kg.

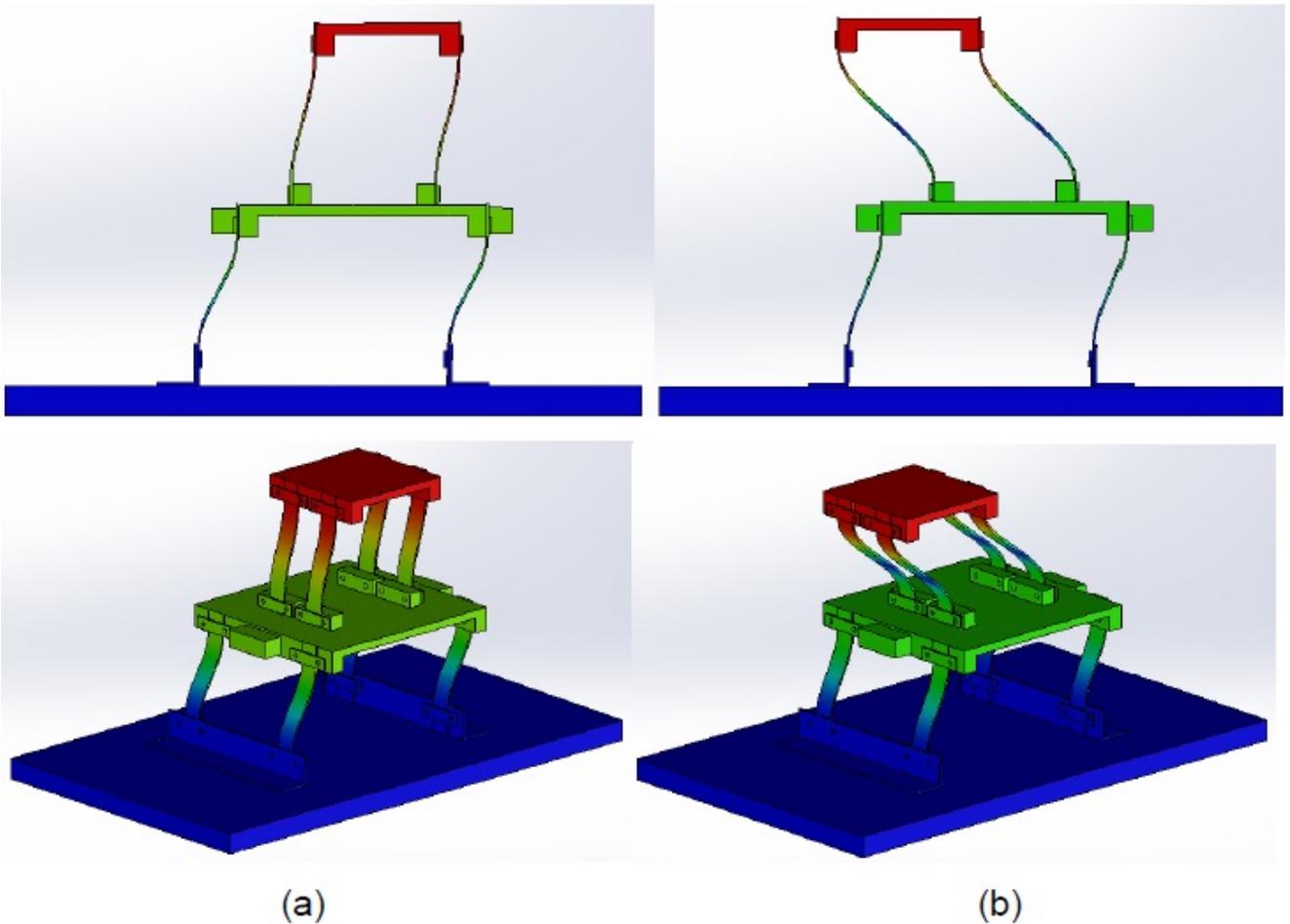
Figura 13 – Esquema da bancada experimental



Fonte: (REPINALDO *et al.*, 2018)

A Figura 14 retirada do trabalho de Repinaldo *et al.* (2018) mostram os modos de vibrar da estrutura.

Figura 14 – Modos de vibrar da estrutura (a) primeiro modo (b) segundo modo.



(a)

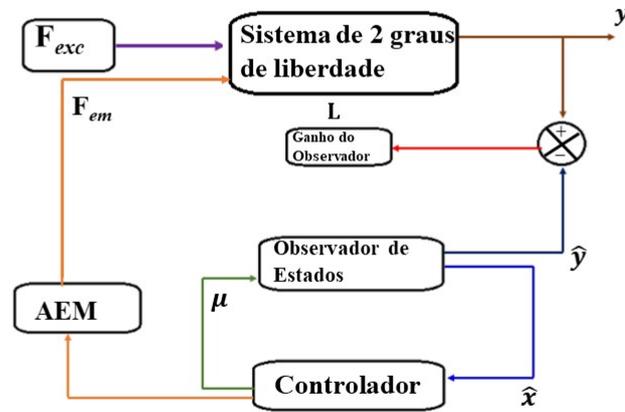
(b)

Fonte: (REPINALDO *et al.*, 2018)

As análises foram realizadas através de simulações numéricas por meio do *software* Matlab/Simulink® e em seguida validadas experimentalmente. Vale destacar que foram implementados e comparados os resultados com dois tipos de controladores: LQR e *Neuro-Fuzzy*. Com estes controladores, foram analisados 3 cenários de sistemas de controle, sendo duas considerando o modelo inverso do atuador eletromagnético (LQR ou *Neuro-Fuzzy*) e uma sem o modelo inverso (apenas com a *Neuro-Fuzzy*).

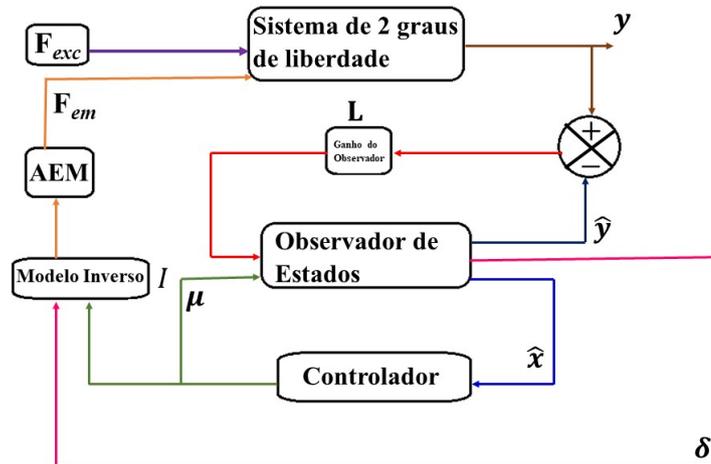
Os experimentos dos controladores foram realizados de forma numérica e experimental, tanto na coordenada física quanto na modal para a conclusão nesse trabalho. As Figuras 15 e 16 mostram o esquema do sistema de controle sem o Modelo Inverso e com o Modelo Inverso a onde tem-se as seguintes variáveis F_{exc} a força de excitação, F_{em} , a força do atuador eletromagnético, μ a força de controle, y a saída do sistema, \hat{y} a saída estimada, \hat{x} os estados estimados e por fim, no caso do sistema com o modelo inverso, tem-se a variável δ de deslocamento de massa controlada.

Figura 15 – Diagrama do Sistema de Controle sem o Modelo Inverso



Fonte: Adaptado (REPINALDO *et al.*, 2018)

Figura 16 – Diagrama do Sistema de Controle com o Modelo Inverso



Fonte: Adpatado (REPINALDO *et al.*, 2018)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

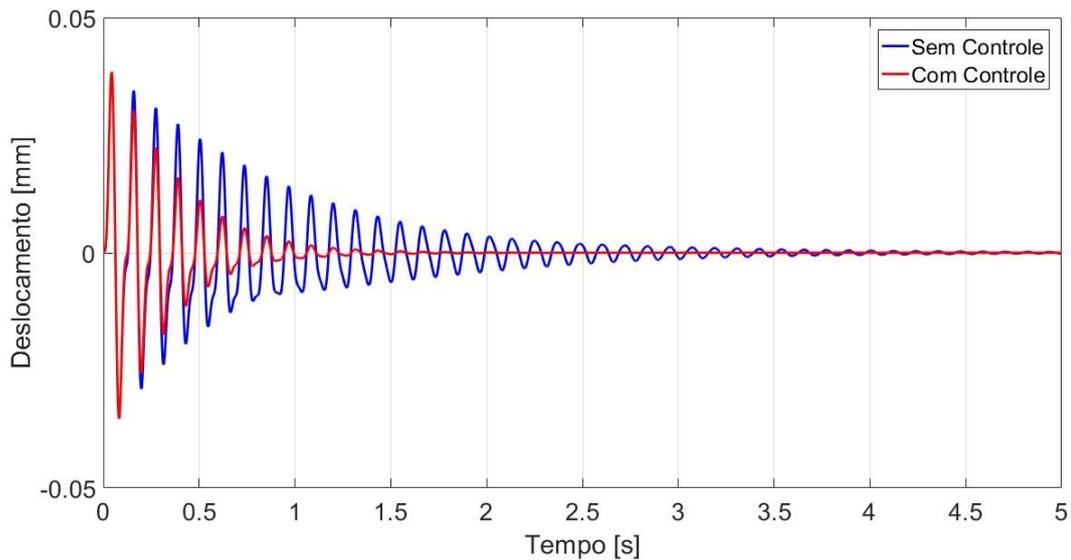
6.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta seção, os resultados das simulações numéricas são apresentados os 3 cenários de sistema de controle.

6.1.1 Resultados numéricos com Controlador LQR Modelo Inverso

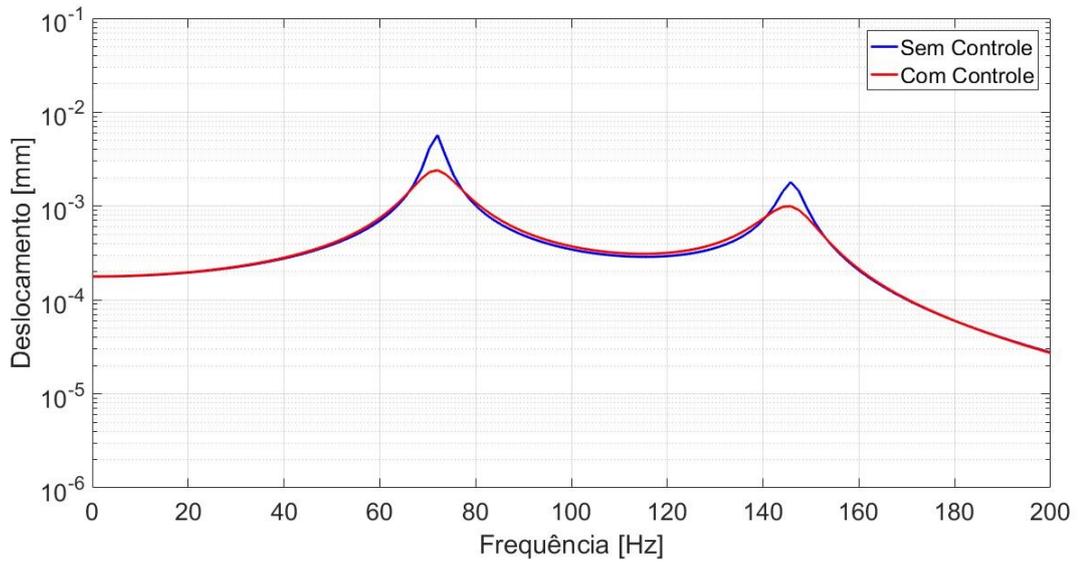
A Figura 17 apresenta a comparação entre o deslocamento sem controle e com o controlador LQR.

Figura 17 – Deslocamento do sistema de 2 gdl (LQR).



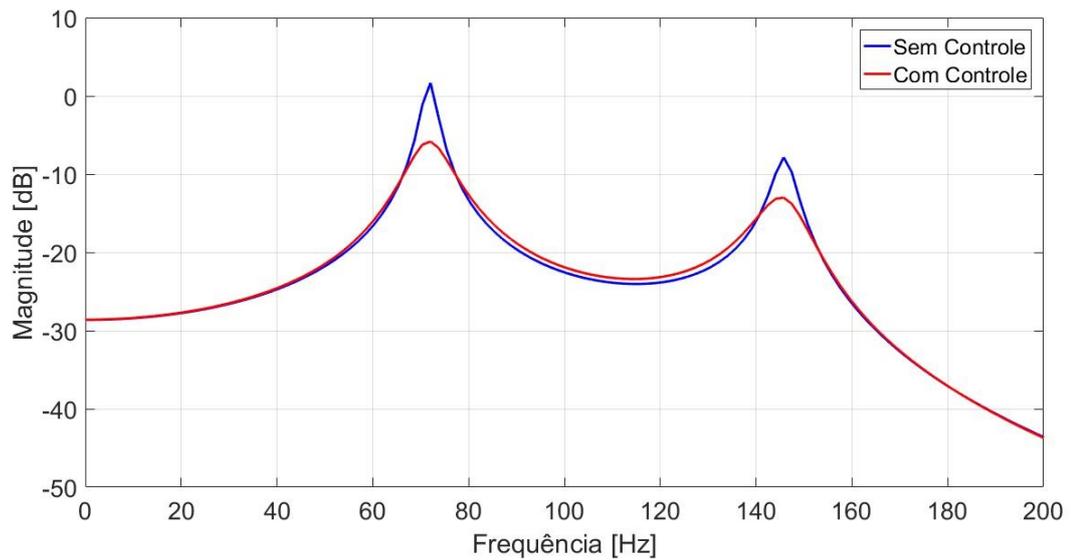
Fonte: Autoria própria

Para analisar o tempo de acomodação da resposta do sistema de 2 gdl, considerou-se o instante de tempo a partir do qual a resposta do sistema oscilava com amplitudes inferiores a 5% do valor da maior amplitude da resposta do sistema sem controle. Desta forma, observou-se que para o sistema sem controle, o tempo de acomodação foi de aproximadamente 2,65 s, enquanto que com o controle este tempo foi de aproximadamente 1,00 s, demonstrando a validade do controlador utilizado.

Figura 18 – Resposta na Frequência (LQR)

Fonte: Autoria própria

Os gráficos da Figura 18 apresentam a resposta no domínio da frequência. A partir destes gráficos é possível observar a redução no picos dos dois modos do sistema. Para o Modo 1, o nível de redução foi de 0,003305 mm, enquanto que para o Modo 2 foi de 0,000808 mm, representando uma redução, respectivamente, de 57,83% e 44,73%.

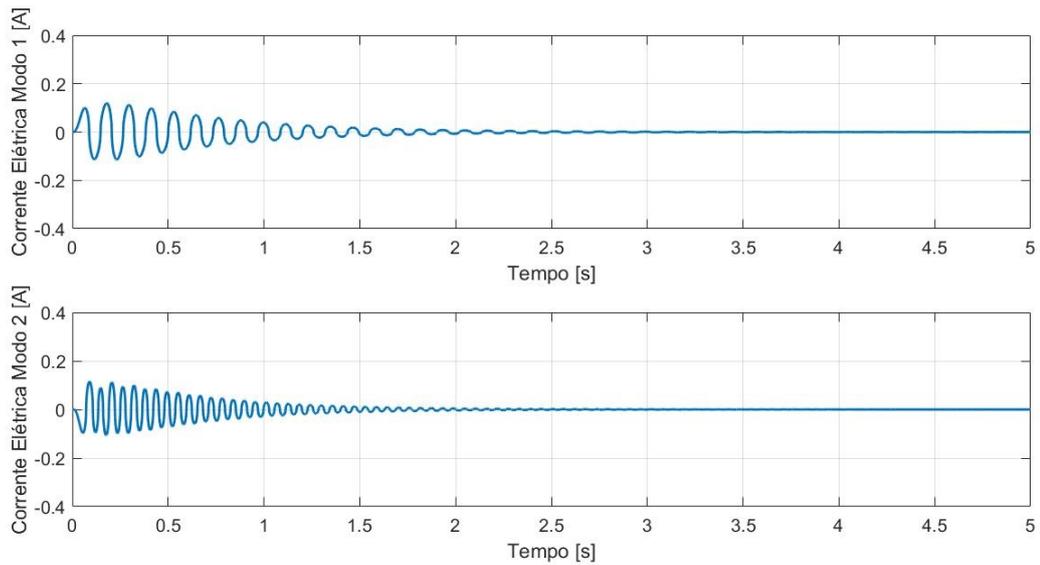
Figura 19 – Função Resposta em Frequência (LQR)

Fonte: Autoria própria

Os gráficos da Figura 19, por sua vez, apresentam a resposta no domínio da frequência medidos em dB. Para o Modo 1, o nível de redução foi de 7,852 dB, enquanto que para o Modo 2 foi de 5,148 dB.

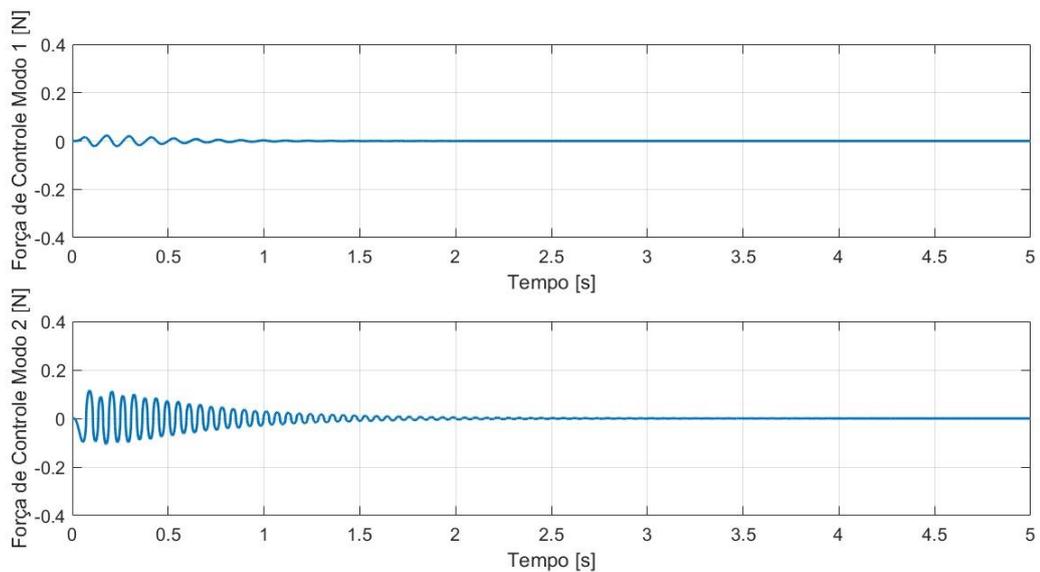
Os gráficos das Figuras 20 e 21 apresentam as correntes elétricas e forças de controle associadas aos Modos 1 e 2 do sistema de 2 gdl, a partir do qual observa-se que o Modo 2, necessitou de maiores valores de corrente elétrica e força de controle.

Figura 20 – Corrente Elétrica (LQR)



Fonte: Autoria própria

Figura 21 – Força de Controle (LQR)

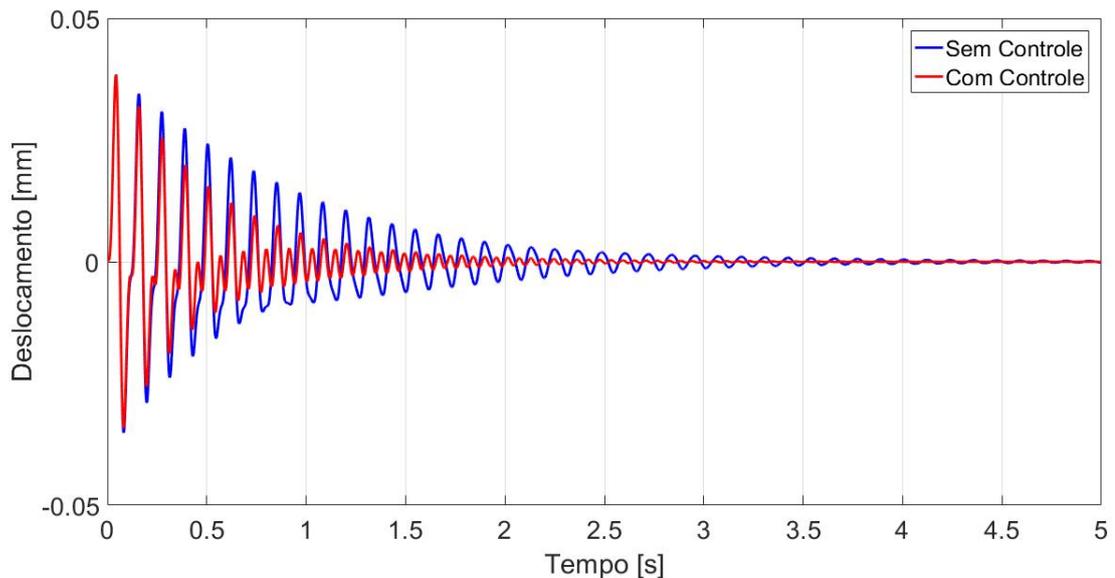


Fonte: Autoria própria

6.1.2 Controlador *Neuro-Fuzzy* com o Modelo Inverso

Os resultados obtidos para o Controlador *Neuro-Fuzzy* com o Modelo Inverso pode-se ser verificado a seguir, o controle foi obtido com os dados treinados do controlador.

Figura 22 – Deslocamento do sistema de 2 gdl (*Neuro-Fuzzy* e Modelo Inverso)

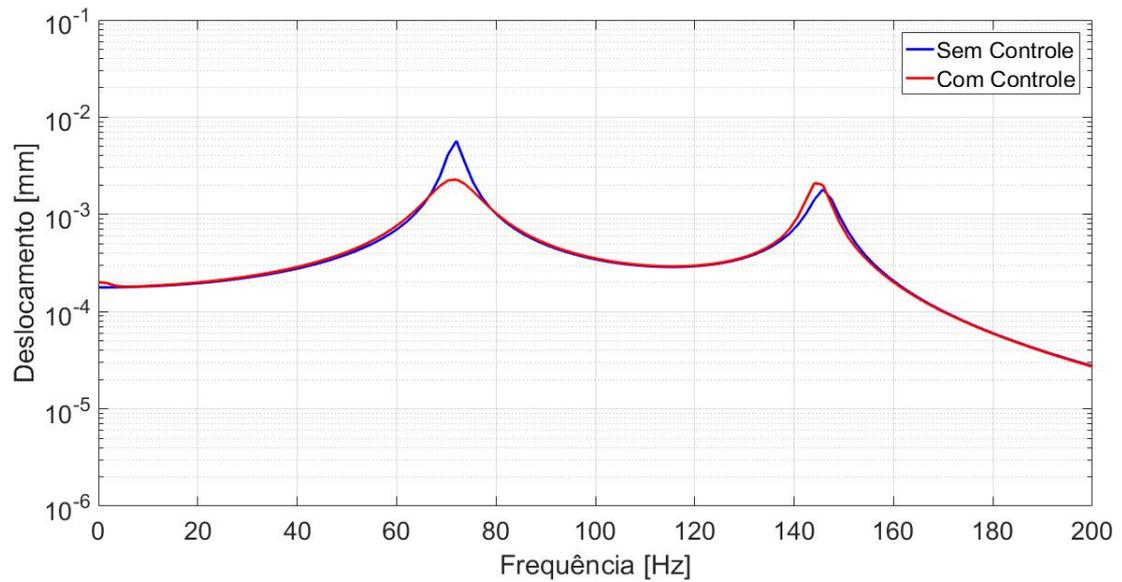


Fonte: Autoria própria

Utilizando o mesmo critério da Seção 6.1.1 para determinar o tempo de acomodação para o sistema com controle, observa-se que este tempo foi de 1,472 s.

A partir do gráfico da Figura 23, observa-se que utilizando o *Neuro-Fuzzy* e modelo inverso do atuador, apenas o modo 1 foi atenuado (redução de 60%, 0,00343mm, isto explica o fato de que o tempo de acomodação para esta caso foi maior que o obtido na Seção 6.1.1. Já o modo 2, teve um pequeno aumento, porém dada a sua amplitude (0,000092), ela pode ser desconsiderada.

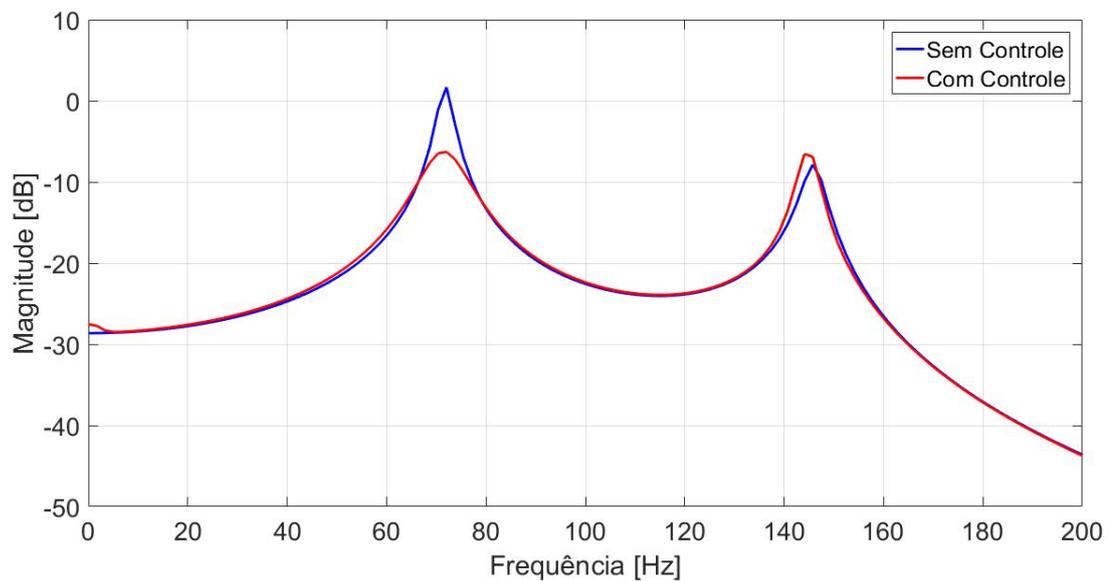
Figura 23 – Resposta na Frequência (*Neuro-Fuzzy* e Modelo Inverso)



Fonte: Autoria própria

O gráfico da Figura 24 apresenta a Função Resposta em Frequência a análise apresentada está a seguir, a redução ocorreu apenas no Modo 1.

Figura 24 – Função Resposta em Frequência (*Neuro-Fuzzy* e Modelo Inverso)



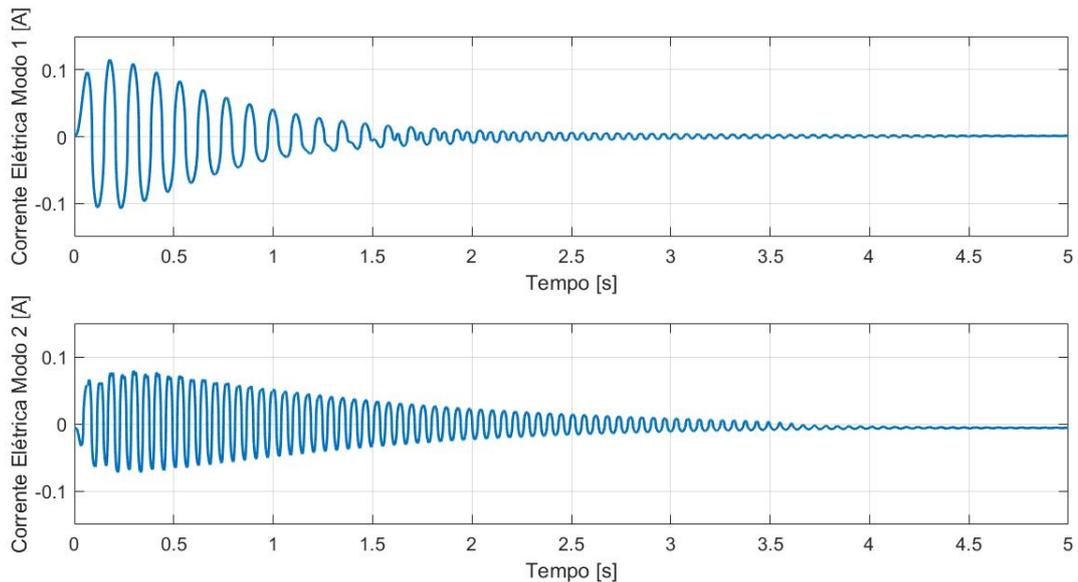
Fonte: Autoria própria

Neste caso, assim como foi observado nos gráficos da Figura 23, os gráficos da Figura 24 apresentam uma redução apenas no modo 1 (no valor de 7,963dB), enquanto que o modo 2 apresentou um pequeno aumento em sua amplitude (de 1,31dB).

Em termos de corrente elétrica, observa-se na Figura 25 que para os valores da corrente

elétrica foram maiores ao Modo 1, isto se deve devido a sua atenuação, já com relação ao modo 2, observa-se a demanda de corrente elétrica, porém não foi capaz para realizar a atenuação deste modo.

Figura 25 – Corrente Elétrica (*Neuro-Fuzzy* e Modelo Inverso)



Fonte: Autoria própria

Os gráficos da Figura 25 apresentam as correntes elétricas utilizadas pelos atuadores 1 e 2. É possível verificar a alternância dos picos e que o atuador 2 exigiu maiores valores, sendo que os maiores picos foram em torno de 0,6 e 0,7 A, respectivamente.

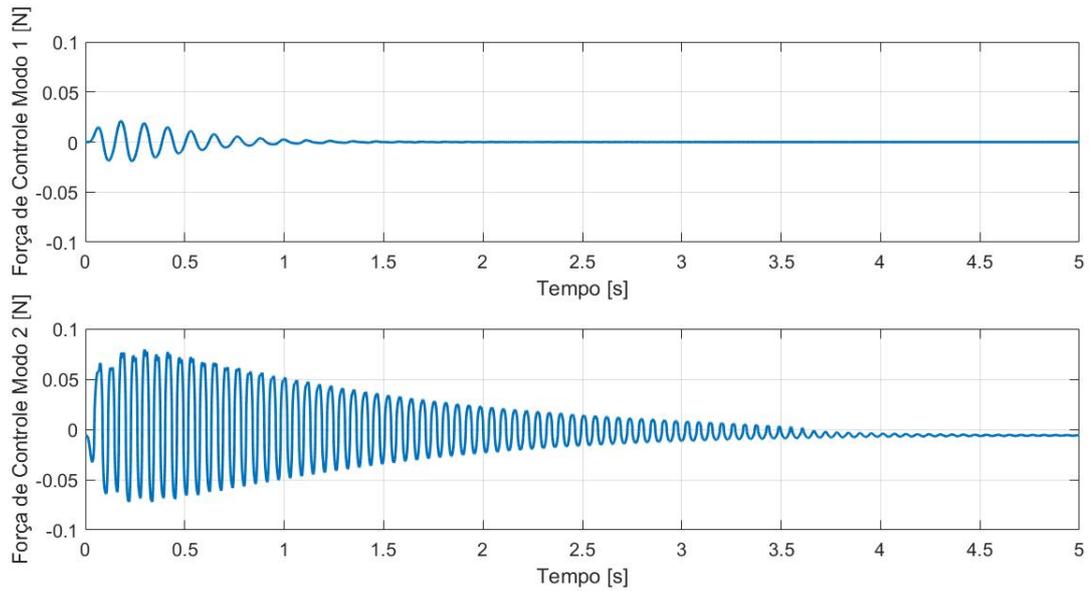
Em termos de força de controle, observa-se na Figura 26 um fato interessante visto que apenas o Modo 1 foi atenuado. Para este modo, a força de controle foi menor, porém eficiente para atenuação, visto que o Modo 2 não houve atenuação de vibração.

6.1.3 Controlador *Neuro-Fuzzy* sem o Modelo Inverso

Na presente subseção é apresentando os valores das simulações numéricas para o Controlador *Neuro-Fuzzy* sem o Modelo Inverso. A Figura 27 apresenta o deslocamento do sistema de 2 gdl em relação ao controle *Neuro-Fuzzy* e sem o Modelo Inverso.

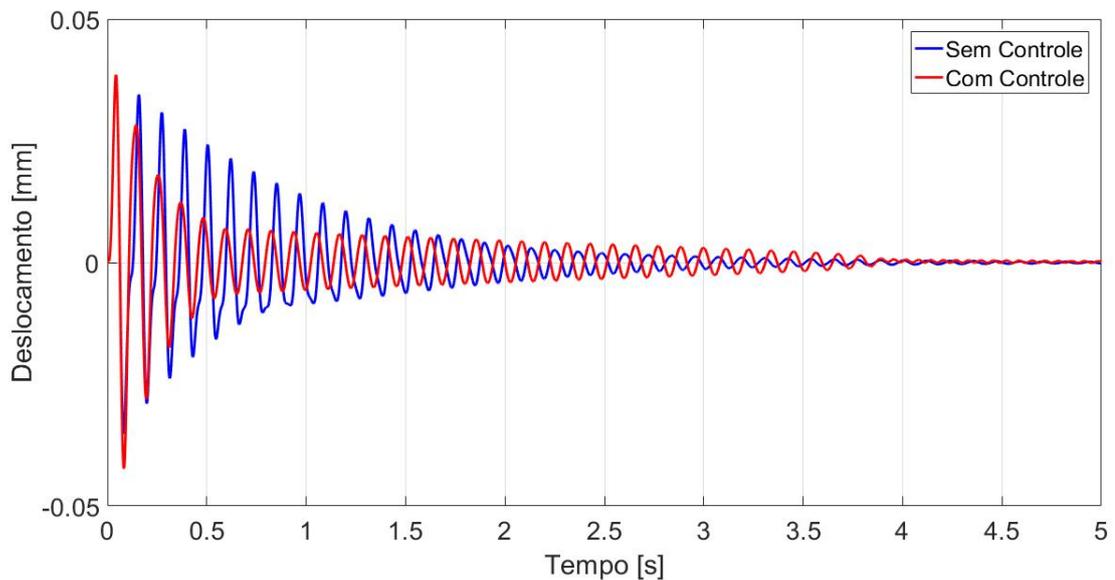
Neste caso, no qual retirou-se o modelo inverso do atuador, e incorporamos apenas o controlador *Neuro-Fuzzy*, observa-se que se adotar o mesmo critério para definição do tempo de acomodação utilizado na subseção 6.1.1, foi obtido um tempo maior considerando a resposta com controle, no entanto, pelos gráficos apresentados pela Figura 27, observa-se que a resposta

Figura 26 – Força de Controle (*Neuro-Fuzzy* e Modelo Inverso)



Fonte: Autoria própria

Figura 27 – Deslocamento do sistema de 2 gdl (*Neuro-Fuzzy* e sem Modelo Inverso)

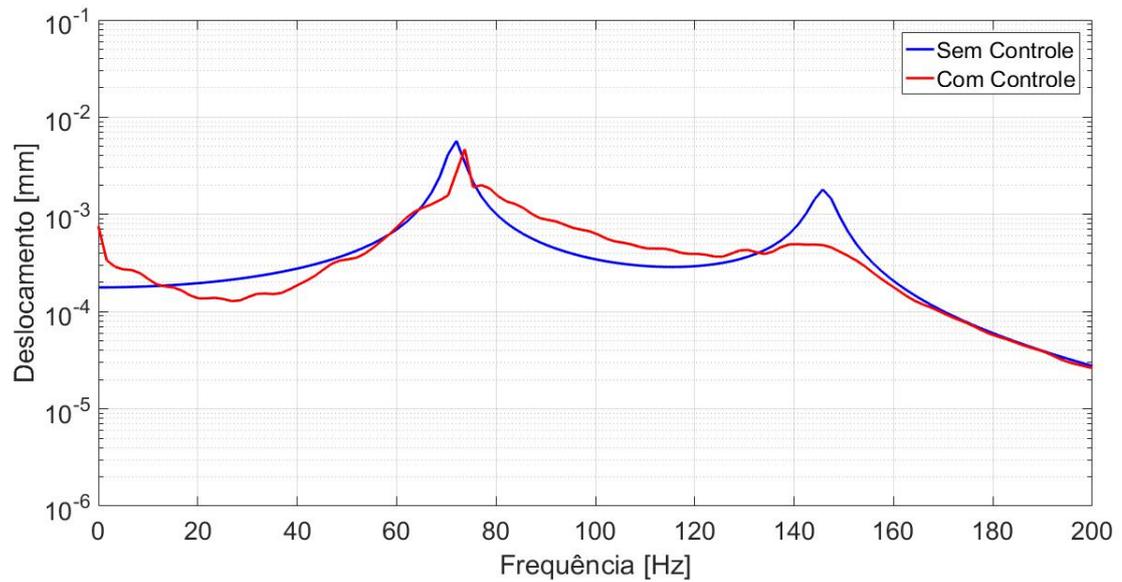


Fonte: Autoria própria

foi atenuada pelo controlador, isso é explicado melhor ao analisar a resposta no domínio da frequência (Figuras 28 e 29).

Conforme observado nos gráficos da Figura 28, as reduções nos picos do Modo 1 e do Modo 2 em relação a resposta do sistema sem controle, respectivamente, foram de 17,85% e 72,91%. Com base nestes valores, pode-se concluir que esta menor atenuação no Modo 1, resultou no aumento do tempo de acomodação da resposta do sistema com controle, mesmo

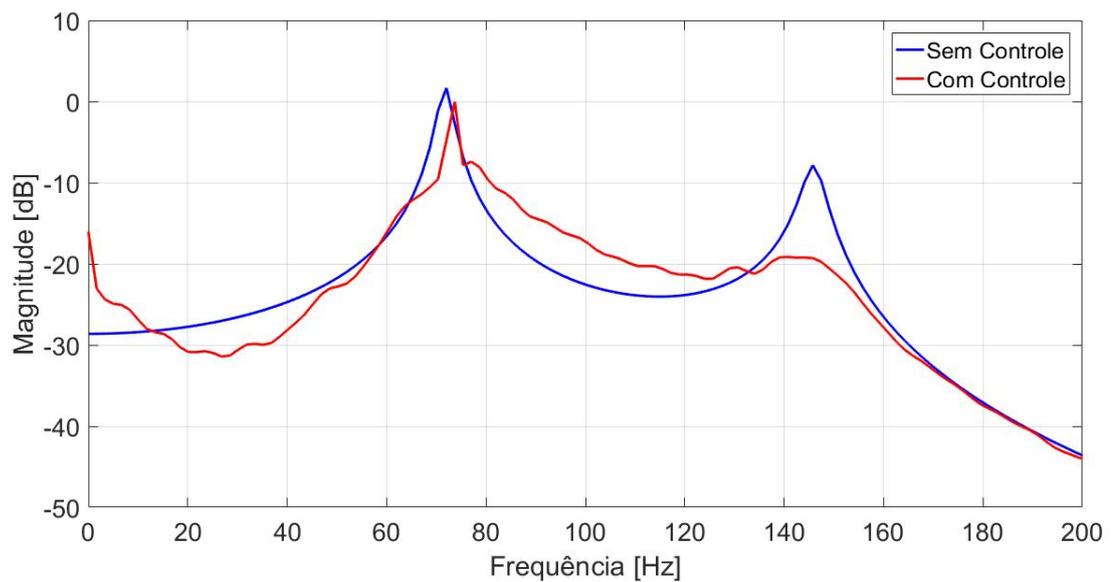
Figura 28 – Resposta na Frequência (Neuro-Fuzzy e sem Modelo Inverso)



Fonte: Autoria própria

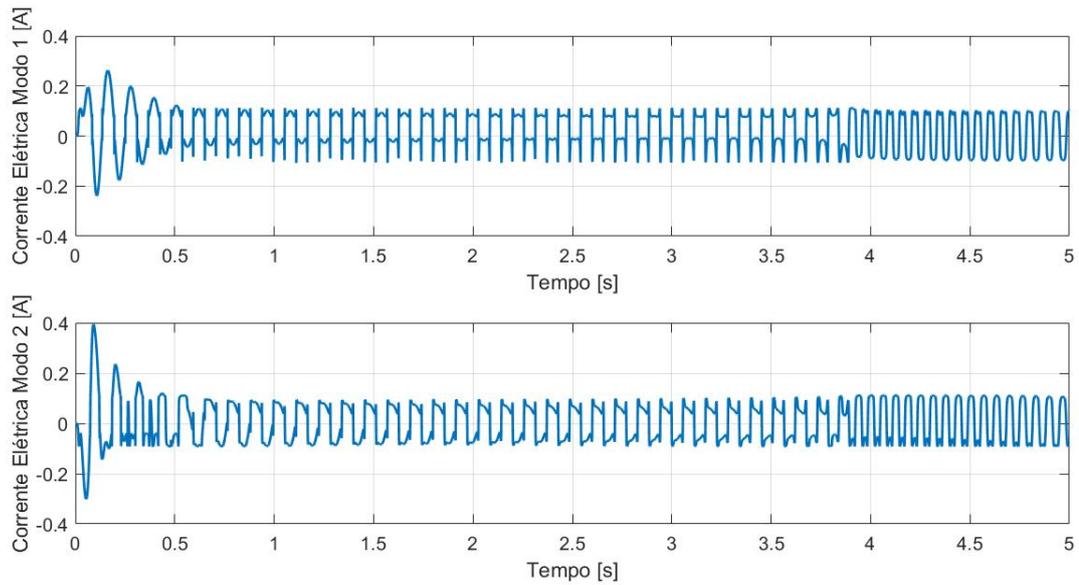
tendo apresentado uma atenuação considerável no Modo 2. Isto também é observado nos gráficos apresentados pela Figura 29, no qual apresentou redução de 1,67 dB para o Modo 1 e de 11,448 dB para o Modo 2 em relação ao sistema sem controle.

Figura 29 – Função Resposta em Frequência (Neuro-Fuzzy e sem Modelo Inverso)



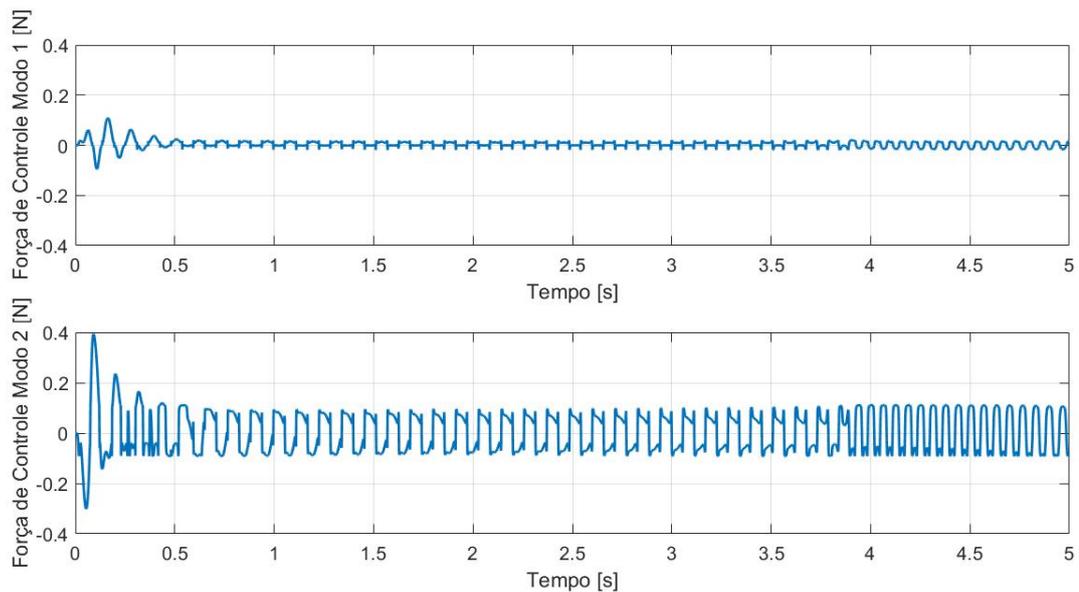
Fonte: Autoria própria

Figura 30 – Corrente Elétrica (*Neuro-Fuzzy* e sem Modelo Inverso)



Fonte: Autoria própria

Figura 31 – Força de Controle (*Neuro-Fuzzy* e sem Modelo Inverso)



Fonte: Autoria própria

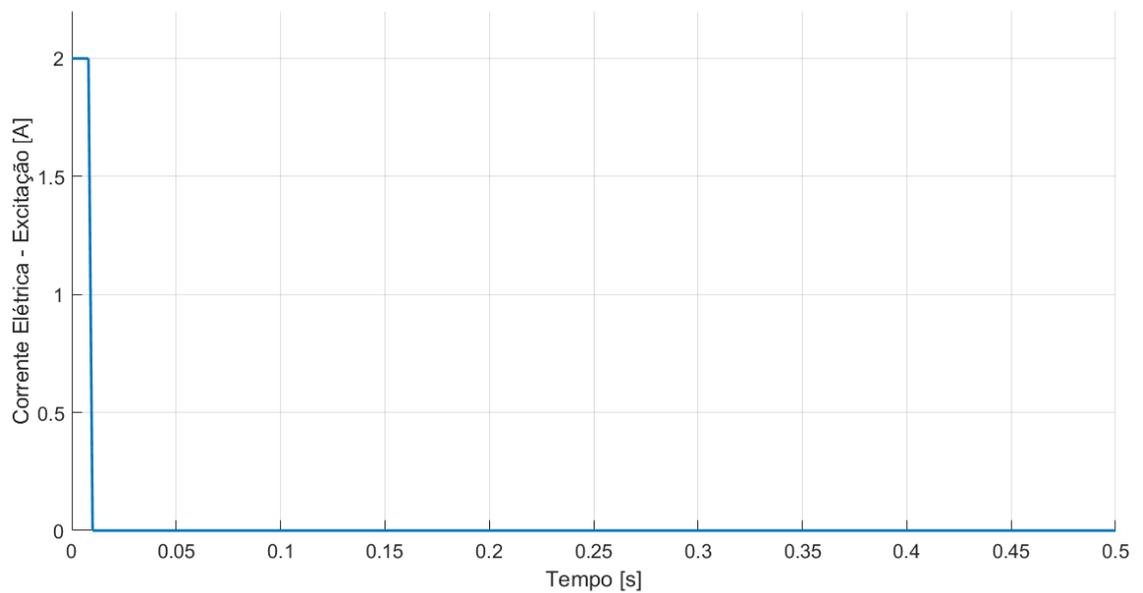
Em termos de corrente elétrica e força de controle, observou-se, nas Figuras 30 e 31, que maiores valores ocorreram para o Modo 2, fato que resultou numa maior atenuação deste modo.

6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, são apresentados os resultados experimentais utilizando o controlador *Neuro-Fuzzy* sem o Modelo Inverso do Atuador Eletromagnético. Ressalta-se que são apresentados os resultados apenas deste caso, visto que nesta presente contribuição o objetivo é desenvolver um sistema de controle sem a utilização do modelo inverso do atuador e validar numericamente e experimentalmente.

A força de excitação da corrente elétrica é dada em 2 e possui um deslocamento de 0,5 s.

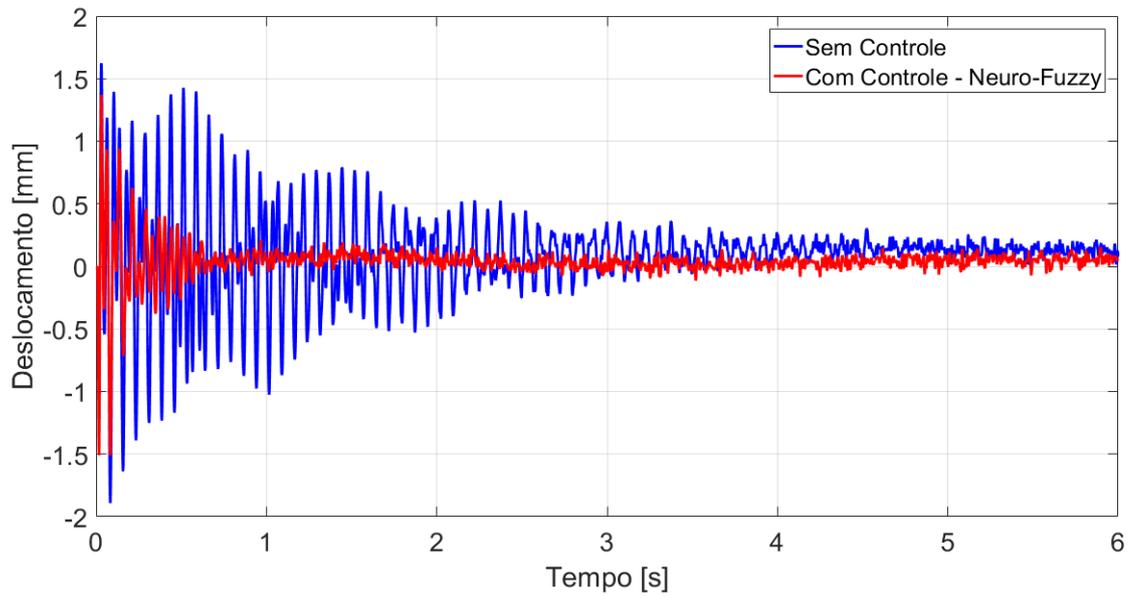
Figura 32 – Corrente Elétrica de excitação



Fonte: Autoria própria

A figura 33 apresenta o deslocamento no domínio do tempo.

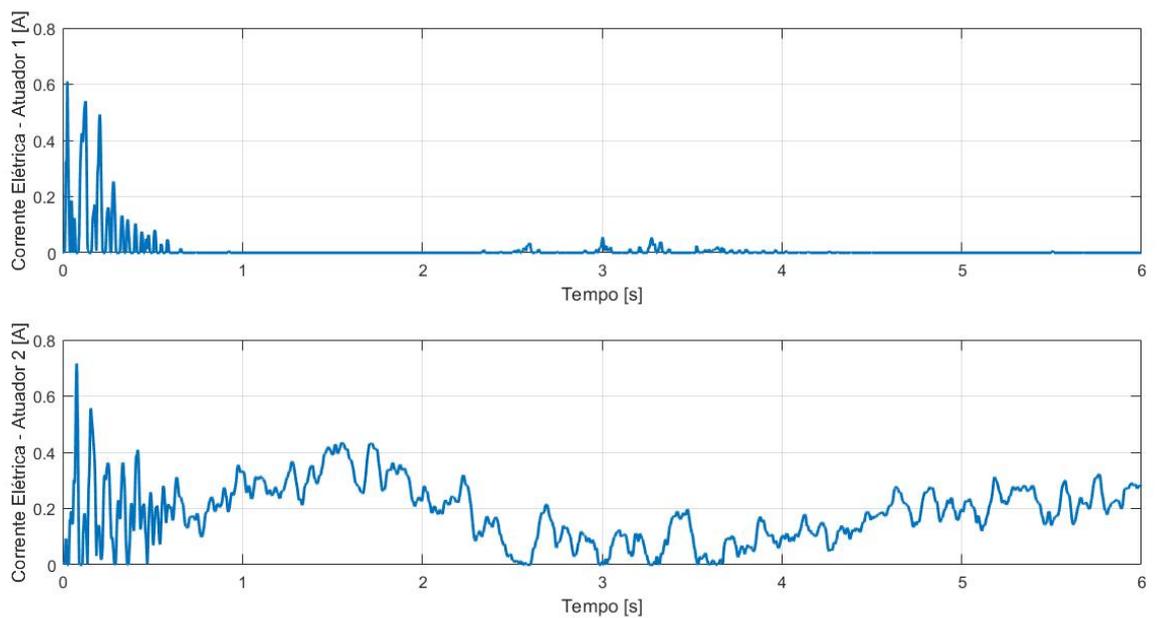
Figura 33 – Deslocamento do sistema de 2 gdl (experimental)



Fonte: Autoria própria

Para o caso com controle *Neuro-Fuzzy* o tempo de acomodação foi de aproximadamente 0,7 s, enquanto que para a resposta sem controle esse tempo de acomodação foi maior, aproximadamente 2,6 s.

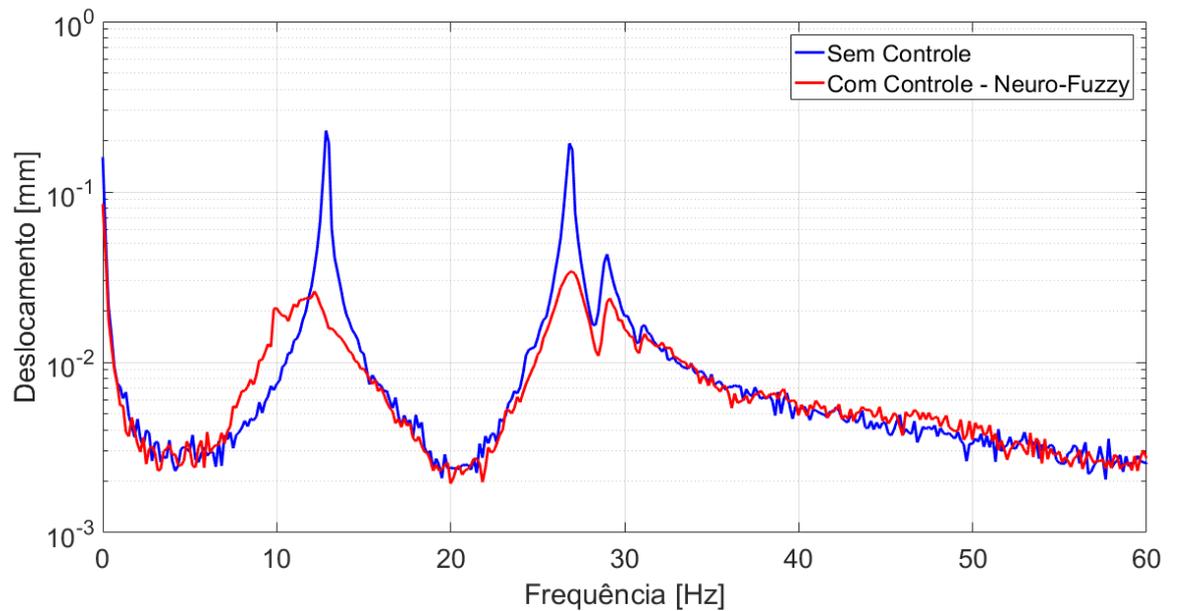
Figura 34 – Corrente Elétrica



Fonte: Autoria própria

Conforme os Gráficos 35, pode-se verificar que para o Modo 1, o sistema sem controle apresentava pico de 0,2292 mm e com controle foi de 0,0261 mm, representando uma redução de 0,2030. Para o Modo 2, o pico sem controle era de 0,193 1mm e com controle foi para 0,0340 mm, representando uma redução de 0,1590 mm.

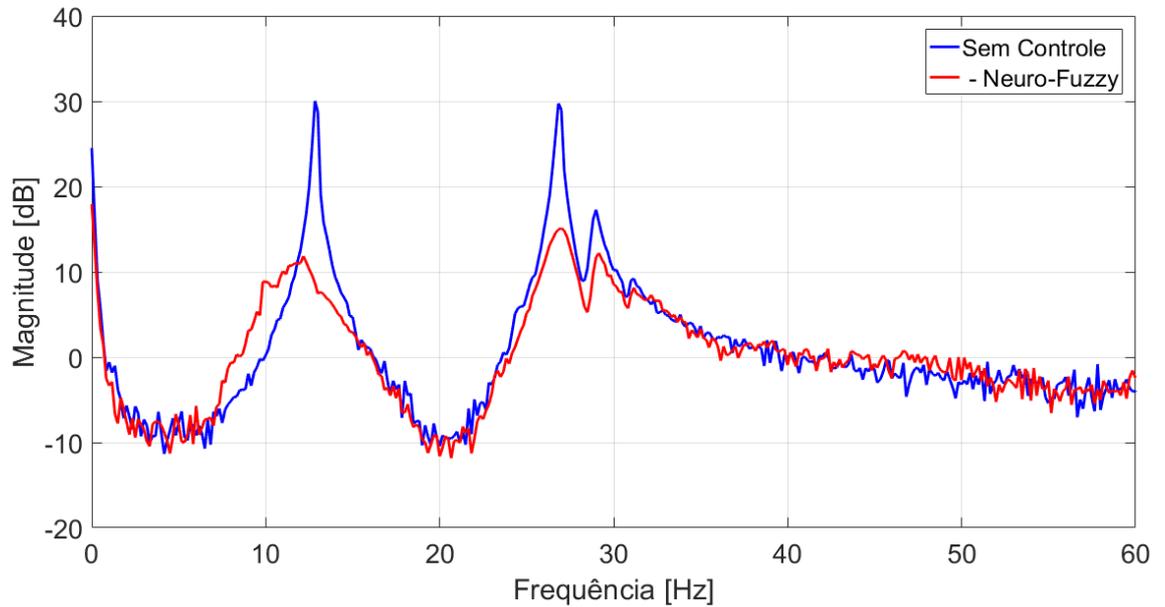
Figura 35 – Resposta na frequência (experimental)



Fonte: Autoria própria

A Figura 36 apresenta as funções respostas em frequência em dB, o Modo 1 apresentou uma redução de 18,2 dB, enquanto que para o Modo 2 a redução foi de 14,65 dB.

Figura 36 – Função Resposta em Frequência (experimental)

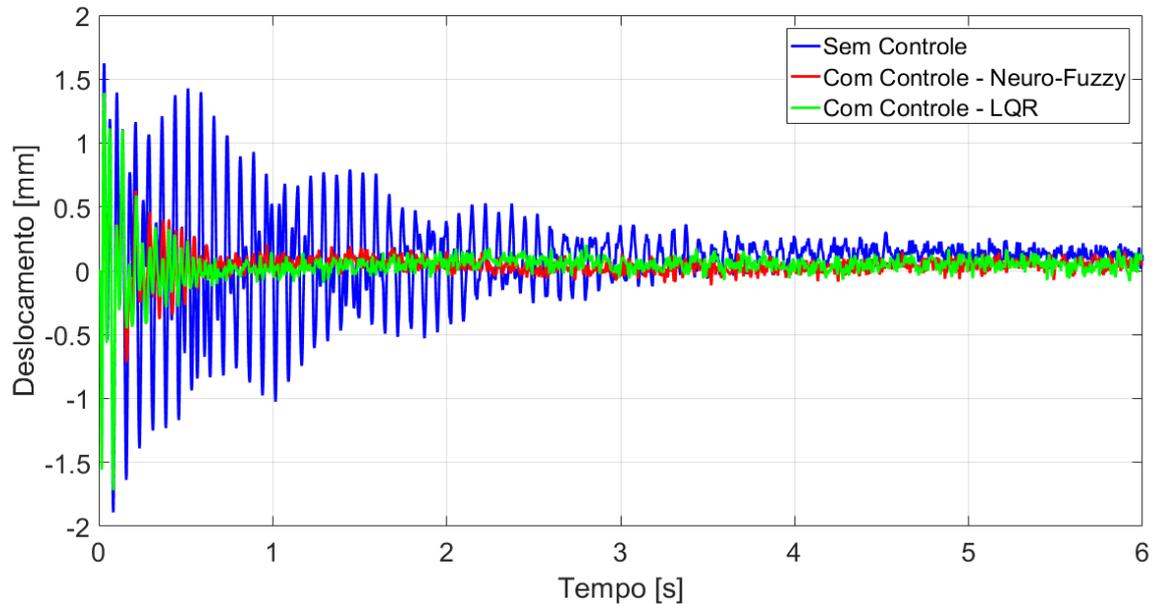


Fonte: Autoria própria

As figuras de 37 a 40 apresentam a comparação dos resultados experimentais considerando o sistema de controle com Controlador LQR e Modelo Inverso do Atuador e o sistema de controle com Controlador Neuro-Fuzzy sem o Modelo Inverso.

Para a Figura 37 o tempo de acomodação do sem Controle, Neuro-Fuzzy e LQR apresentam os valores de 3,2 s , 1,2 s e 1 s , respectivamente.

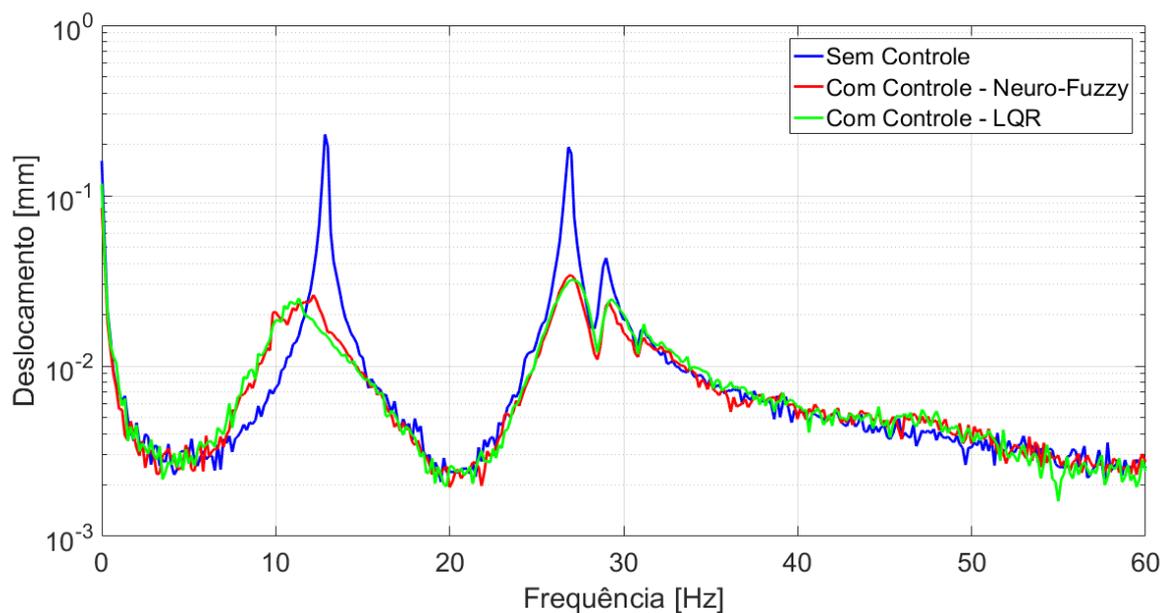
Figura 37 – Comparação das respostas experimentais - LQR X *Neuro-Fuzzy*



Fonte: Autoria própria

Os gráficos apresentados pela Figura 38, mostra a comparação realizada entre os sistemas sem controle, com Controle *Neuro-Fuzzy* e o Controle LQR. Os valores do Modo 1 e do Modo 2, tanto para sistema sem controle, quanto para o sistema *Neuro-Fuzzy* já foram apresentados anteriormente. Para o sistema com Controle LQR, o Modo 1 obteve uma atenuação de 0,0250 mm e o Modo 2 de 0,03203 mm.

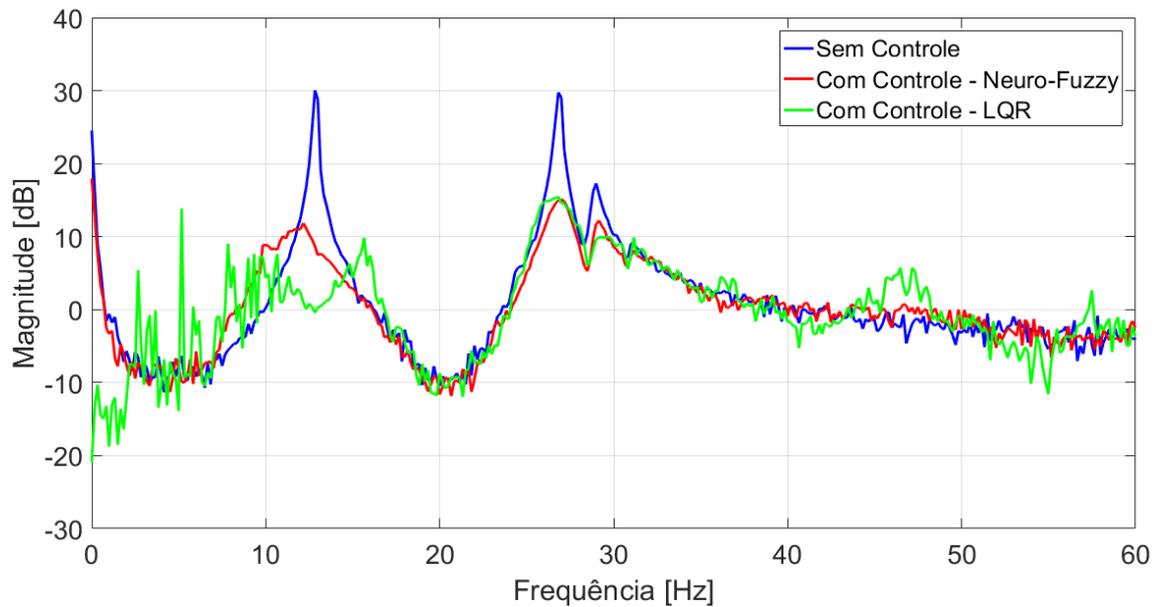
Figura 38 – Comparação das Respostas Experimentais no domínio da Frequência - LQR *Neuro-Fuzzy*



Fonte: Autoria própria

A Figura 39 ilustra a resposta no domínio da frequência do sistema de Controle *Neuro-Fuzzy* e para o sistema de controle LQR. Com o controlador *Neuro-Fuzzy*, a redução foi de 18,2dB e 14,92dB, respectivamente, para o Modo 1 e Modo 2. Para o sistema utilizando controlador LQR, a redução para este caso foi de 20,182 dB no Modo 1 e de 14,48 dB no Modo 2.

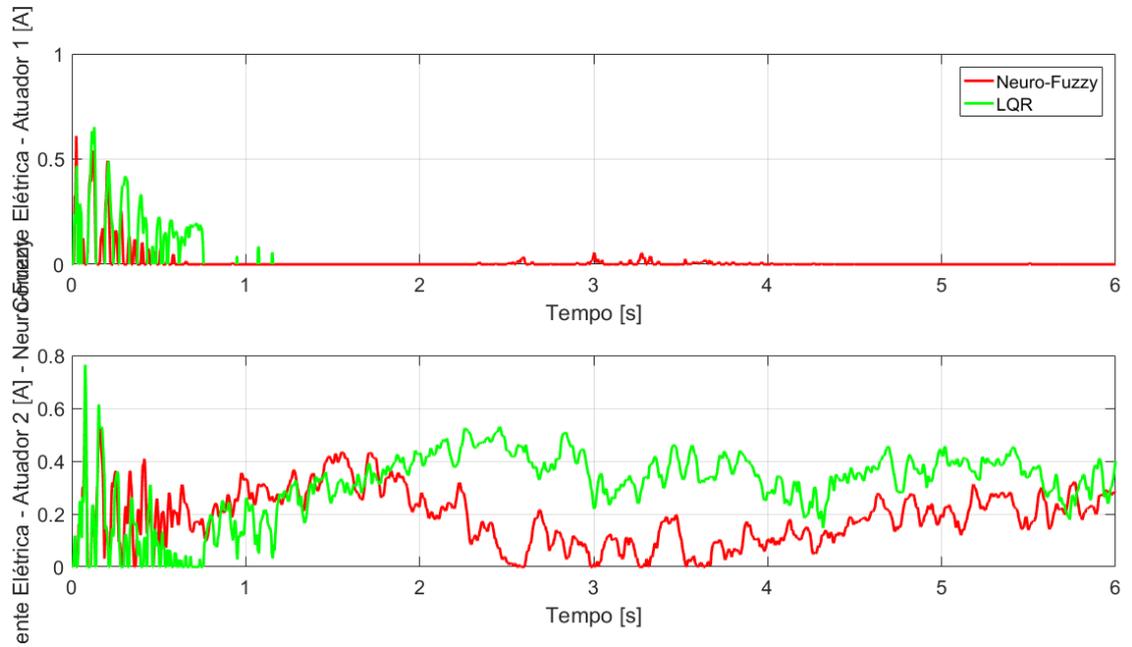
Figura 39 – Comparação das Funções Respostas na Frequência experimentais - LQR X *Neuro-Fuzzy*



Fonte: Autoria própria

Os gráficos da Figura 40 mostram os valores referentes as correntes elétricas associadas aos Atuadores 1 e 2 do Controlador *Neuro-Fuzzy* e do Controlador LQR.

Figura 40 – Comparação das Correntes Elétricas experimentais - LQR X *Neuro-Fuzzy*



Fonte: Autoria própria

7 CONCLUSÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo estudar o controle ativo de vibrações em uma estrutura de dois graus de liberdade. Para esta finalidade, foram abordados dois tipos de controladores: LQR e *Neuro-Fuzzy*, sendo que inicialmente utilizou-se no sistema de controle o modelo inverso do atuador eletromagnético. Porém no sistema de controle final, o controlador *Neuro-Fuzzy* foi projetado considerando a retirada do modelo inverso do atuador, desta forma o controlador *Neuro-Fuzzy* incorporou tanto o cálculo do esforço de controle como também do modelo inverso do atuador.

Os resultados das simulações numéricas apresentaram a eficácia dos controladores projetados LQR e *Neuro-Fuzzy*. O primeiro caso considerou-se o uso do Controlador LQR com o Modelo Inverso do Atuador Eletromagnético. A partir dos resultados numéricos aplicados no sistema com 2 gdl implementados neste trabalho pode-se verificar que para este caso o tempo de acomodação do controlador apresentou um resultado mais satisfatório que nos casos do sistema *Neuro-Fuzzy* com o Modelo Inverso e do sistema *Neuro-Fuzzy* sem o modelo inverso. Ainda, tanto o Modo 1 quanto o Modo 2 obtiveram redução em seus picos, como pode ser observado ao analisar a resposta na frequência.

O Controlador *Neuro-Fuzzy* com o Modelo Inverso do Atuador Eletromagnético obteve atenuação considerável no primeiro modo, o que explica o tempo de acomodação maior quando comparado com o Controlador LQR em conjunto com Modelo Inverso do Atuador Eletromagnético. Para este caso, o Modo 2 apresentou uma atenuação melhor.

Para o último caso, sistema *Neuro-Fuzzy* sem o Modelo Inverso, embora tenha sido retirado o Modelo Inverso do Controlador *Neuro-Fuzzy*, e o controlador apresente uma situação menos favorável aos demais controladores, é possível verificar-se por meio dos resultados numéricos obtidos nas simulações que ele também possui um controle eficaz. Ainda neste último caso, ressalta-se a eficiência no uso do controlador *Neuro-Fuzzy* sem o modelo inverso do atuador eletromagnético, assim, além de calcular o esforço de controle, este já era na forma de corrente elétrica que era utilizada pelos atuadores eletromagnéticos.

Com relação aos resultados experimentais, estes consideraram apenas o sistema de controle com controlador *Neuro-Fuzzy* sem o modelo inverso do atuador eletromagnético, visto que esta foi a principal contribuição do presente trabalho, permitindo uma simplificação do sistema de controle.

Conforme observado nos resultados apresentados na Seção 6.2, a redução das amplitudes de vibração tanto no domínio do tempo como da frequência. Com finalidade de comparação, apresentou-se os resultados experimentais obtidos com o controlador LQR, visto que estes dados foram utilizados para o treinamento do controlador *Neuro-Fuzzy* sem o modelo inverso do atuador eletromagnético.

Desta forma, com este trabalho, pode-se concluir a validade no uso de controlador *Neuro-Fuzzy* para o cálculo do esforço de controle e substituindo também o modelo inverso do atuador eletromagnético, de maneira que o esforço de controle calculado é a própria corrente elétrica utilizada pelos atuadores eletromagnéticos.

Visando a continuidade do presente trabalho, tem-se como propostas para trabalhos futuros:

- Otimizar os parâmetros dos controladores visando melhorar a relação entre atenuação de vibrações e consumo de energia;
- Aplicar a presente metodologia em estruturas mais complexas.

REFERÊNCIAS

- ALATIQUI, Imad; ETTOUNEY, Hisham; EL-DESSOUKY, Hisham. Process control in water desalination industry: an overview. **Desalination**, Elsevier, v. 126, n. 1-3, p. 15–32, 1999.
- ANH, Nguyen Dong; NGUYEN, Nguyen Xuan; QUAN, Nguyen Hoang. Global-local approach to the design of dynamic vibration absorber for damped structures. **Journal of Vibration and Control**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 22, n. 14, p. 3182–3201, 2016.
- BRESSAN, Glaucia Maria. **Classificação do risco de infestação de regiões por plantas daninhas utilizando lógica fuzzy e redes bayesianas**. 2007. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.
- BUENO, Douglas Domingues. Controle ativo de vibrações e localização ótima de sensores e atuadores piezelétricos. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2007.
- CARNEIRO, Rúbia Borges. Controle semi-ativo de vibrações em estruturas utilizando amortecedor magnetorreológico. 2009.
- CHAVES, Luciano Eustáquio *et al.* Modelos computacionais fuzzy e neuro-fuzzy para avaliarem os efeitos da poluição do ar. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2013.
- CUNHA, Bruno Sousa Carneiro da *et al.* Controle passivo de vibrações induzidas por vórtices utilizando materiais viscoelásticos. Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- GARRIDO, Hernán; CURADELLI, Oscar; AMBROSINI, Daniel. Semi-active friction tendons for vibration control of space structures. **Journal of Sound and Vibration**, Elsevier, v. 333, n. 22, p. 5657–5679, 2014.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física 3**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2007.
- HAYKIN, Simon. **Neural networks and learning machines**. 1. ed. Canada: Pearson Prentice Hall, 2009.
- HU, Yefa; CHEN, Changhao; WU, Huachun; SONG, Chunsheng. Study on structural optimization design and cascade pid control of maglev actuator for active vibration isolation system. **Journal of Vibration and Control**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 24, n. 10, p. 1829–1847, 2018.

JANG, J-SR. Anfis: adaptive-network-based fuzzy inference system. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics**, IEEE, v. 23, n. 3, p. 665–685, 1993.

JR, BrnF Spencer; DYKE, SJ; SAIN, MK; CARLSON, JdF. Phenomenological model for magnetorheological dampers. **Journal of engineering mechanics**, American Society of Civil Engineers, v. 123, n. 3, p. 230–238, 1997.

KOROISHI, Edson Hideki *et al.* Controle de vibrações em máquinas rotativas utilizando atuadores eletromagnéticos. Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

KWAK, Moon K; YANG, Dong-Ho. Dynamic modelling and active vibration control of a submerged rectangular plate equipped with piezoelectric sensors and actuators. **Journal of Fluids and Structures**, Elsevier, v. 54, p. 848–867, 2015.

LI, DongXu; LIU, Wang; JIANG, JianPing; XU, Rui. Placement optimization of actuator and sensor and decentralized adaptive fuzzy vibration control for large space intelligent truss structure. **Science China Technological Sciences**, Springer, v. 54, n. 4, p. 853–861, 2011.

LIMA, Andressa Fernanda Rosa de *et al.* Controle passivo de vibrações de sistemas não-lineares empregando ligas com memória de forma. Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

MACHADO, Celiane Costa. Modelagem matemática e controle ativo de um manipulador com um elo flexível. 2007.

MEDEIROS, Philippe Eduardo de; SAVI, Marcelo Amorim; BESSA, Wallace Moreira. Compensação fuzzy proporcional-derivativa de incertezas no controle de vibrações de treliças com memória de forma. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 3, p. 1370–1385, 2020.

MORAES, Yuri José Oliveira *et al.* Análise dinâmica aplicada ao controle de vibrações em protótipo de edifício incorporando molas lmf superelásticas. Revista Principia, 2019.

MORAIS, Tobias Souza *et al.* Contribuição ao estudo de máquinas rotativas na presença de não-linearidades. Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

MURADOVA, Aliko D; TAIRIDIS, Georgios K; STAVROULAKIS, Georgios E. Adaptive neuro-fuzzy vibration control of a smart plate. **Numerical Algebra, Control & Optimization**, American Institute of Mathematical Sciences, v. 7, n. 3, p. 251, 2017.

OGATA, Katsuhiko. **Modern control engineering**. [S.l.]: Prentice hall, 1997.

PADILHA, PAULO CESAR CARNEIRO. **Desenvolvimento de uma metodologia de sintonia de controladores fuzzy utilizando redes neurais aplicações em processos petroquímicos**. 2001. Tese (Doutorado) — Tese de Mestrado, IME, 2001.

PEDRYCZ, Witold; GOMIDE, Fernando *et al.* **An introduction to fuzzy sets: analysis and design**. [S.l.]: MIT press, 1998.

PINHEIRO, Breno Carneiro *et al.* Sistema de controle tempo real embarcado para automação de manobra de estacionamento. Florianópolis, SC, 2009.

RAO, Singerusu S. **Vibrações Mecânicas**. 1. ed. São Paulo, Brasil: Person, 2008. Traduzido para o português do original em inglês "Electric Energy Systems Theory".

REPINALDO, Joana Pereira *et al.* **Controle modal aplicado a uma estrutura de 2 graus de liberdade utilizando atuadores eletromagnéticos**. 2018. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

RIBEIRO, Marcelo *et al.* Controle ativo de vibrações estruturais induzidas pela ação do vento. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.

ROSYID, Abdur; ALATA, Mohanad; ELMADANY, Mohamed. Adaptive neuro-fuzzy inference system controller for vibration control of reduced-order finite element model of rotor-bearing-support system. **International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy**, Citeseer, v. 55, p. 1–11, 2015.

SANCHEZ, Eleazar Cristian Mejia. Controle por aprendizado acelerado e neuro-fuzzy de sistemas servo-hidráulicos de alta frequência. **Rio de Janeiro: PUC-Rio**, 2009.

SANTOS, Rodrigo Borges. Controle ativo de vibrações em estruturas flexíveis utilizando desigualdades matriciais lineares (lmis). Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008.

SHIRAIISHI, Toshihiko; MISAKI, Hirotaka. Vibration control by a shear type semi-active damper using magnetorheological grease. *In*: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2016. v. 744, n. 1, p. 012012.

SILVA, Camila Albertin Xavier da; TAKETA, Erik; KOROISHI, Edson Hideki; LARA-MOLINA, Fabian Andres; FARIA, Albert Willian. Optimization of parameters of a modal active control in a beam of composite material. *In*: EDP SCIENCES. **MATEC Web of Conferences**. [S.l.], 2018. v. 211, p. 19002.

SILVA, CAX da; TAKETA, E; KOROISHI, EH; LARA-MOLINA, FA; FARIA, AW; LOBATO, FS. Determining the parameters of active modal control in a composite beam

using multi-objective optimization flower pollination. **Journal of Vibration Engineering & Technologies**, Springer, v. 8, n. 2, p. 307–317, 2020.

SILVA, Emerson Ravazzi Pires da; TEIXEIRA, Marcelo; ASSUNÇÃO, Edvaldo; FARIA, Flávio Andrade. Stabilization of uncertain ts fuzzy systems using statederivative feedback. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 22, n. 3, p. 273–283, 2011.

SIMÕES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S. **Controle e modelagem fuzzy**. [S.l.]: Editora Blucher, 2007.

SIMONOVIĆ, Aleksandar M; JOVANOVIĆ, Miroslav M; LUKIĆ, Nebojša S; ZORIĆ, Nemanja D; STUPAR, Slobodan N; ILIĆ, Slobodan S. Experimental studies on active vibration control of smart plate using a modified pid controller with optimal orientation of piezoelectric actuator. **Journal of Vibration and Control**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 22, n. 11, p. 2619–2631, 2016.

TEIXEIRA, Rafael Luís *et al.* Uma metodologia de projeto de controladores híbridos inteligentes com aplicações no controle ativo de vibrações mecânicas. Universidade Federal de Uberlândia, 2001.

THINH, Nguyen Truong; YANG, Young-Soo; OH, Il-Kwon. Adaptive neuro-fuzzy control of ionic polymer metal composite actuators. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 18, n. 6, p. 065016, 2009.

WANG, Hua; SHEN, Xian-Hai; ZHANG, Liang-Xu; ZHU, Xiao-Jin. Active vibration suppression of flexible structure using a lmi-based control patch. **Journal of Vibration and Control**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 18, n. 9, p. 1375–1379, 2012.

WENZHONG, Qu; JINCAI, Sun; YANG, Qiu. Active control of vibration using a fuzzy control method. **Journal of sound and vibration**, Elsevier, v. 275, n. 3-5, p. 917–930, 2004.

XU, R; LI, D-X; JIANG, J-P; LIU, W. Adaptive fuzzy vibration control of smart structure with vlife modeling. **Journal of Mechanics**, Cambridge University Press, v. 31, n. 6, p. 671–682, 2015.

YEH, Ken; CHIANG, WEILING; JUANG, DERSHIN. Application of fuzzy control theory in active control of structures. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems**, World Scientific, v. 4, n. 03, p. 255–274, 1996.

ZADEH, Lotfi A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. **IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics**, IEEE, n. 1, p. 28–44, 1973.