



*Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Mestrado-Doutorado*

# **UTILIZAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DE VIBRAÇÃO POR EXCITADOR ELETROMAGNÉTICO**

**por**

**Rômulo de Souza Damião**

*Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da  
Paraíba para obtenção do Grau de Mestre*

**RÔMULO DE SOUZA DAMIÃO**

**UTILIZAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DE  
VIBRAÇÃO POR EXCITADOR ELETROMAGNÉTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Dinâmica e Controle de Sistemas Mecânicos

**Orientador: Professor Dr. Simplício Arnaud da Silva**

D158u Damião, Rômulo de Souza.

Utilização da Lógica Fuzzy no Controle de Vibração por  
Excitador Eletromagnético / Rômulo de Souza Damião. -  
João Pessoa, 2019.

115 f. : il.

Orientação: Simplício Arnaud da Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Amplitude de Vibração. Controle Fuzzy. I. Silva,  
Simplício Arnaud da. II. Título.

UFPB/BC

# UTILIZAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DE VIBRAÇÃO POR EXCITADOR ELETROMAGNÉTICO

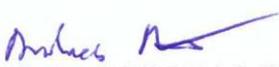
por

**RÔMULO DE SOUZA DAMIÃO**

*Dissertação aprovada em 16 de dezembro de 2019*

  
**Prof. Dr. SIMPLICIO ARNAUD DA SILVA**  
Orientador – UFPB

  
**Prof. Dr. CÍCERO DA ROCHA SOUTO**  
Examinador Interno - UFPB

  
**Prof. Dr. ANDREAS RIES**  
Examinador Externo – UFPB

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos meus pais, José Damião (*in memoriam*) e Osair Damião, que iluminaram o caminho da minha vida, e a minha noiva Lilly pela compreensão, atenção, ajuda e por acreditar na minha capacidade de crescimento acadêmico e profissional.

*“Eu sou o caminho, e a verdade, e a vida;  
ninguém vem ao Pai senão por mim”. João  
14:6.*

*– Jesus Cristo*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu Deus, todo poderoso criador dos céus e da Terra, onde meu mestrado não seria possível se não houvesse a sua mão estendida sobre mim. Tenho a convicção que Ele me ergueu com suas poderosas mãos, me sustentando nos momentos de grandes dificuldades, Ele não deixou que eu desistisse dos meus sonhos, me capacitando a cada momento de dificuldade, cumprindo-se assim a promessa Dele na minha vida, dessa forma consegui vencer mais uma etapa de minha vida.

Agradeço aos meus pais, José Damião Filho (*in memoriam*) e Osair de Souza Damião, pelo companheirismo e apoio incondicional durante toda a minha vida. Agradeço imensamente a minha noiva Lilly Barbosa de Lucena por ter ficado ao meu lado nos momentos mais difíceis dessa jornada e suportado todas as minhas dificuldades.

Agradeço a minha pastora e amiga Raquel Cabral Oliveira, pelo seu carinho e grande dedicação de oração pela minha vida, como também ao seu esposo e meu amigo Josenildo Porto Wanderley. Aos meus amigos Evandson Claude Seabra Dantas, Merques N. Freitas, Fábio Araújo, José Anselmo L. Jr., Júlio César da Silva, Vicente de Vasconcelos, e Manoel B. Soares, pelo suporte técnico que iniciou comigo esta jornada e me ajudou bastante durante toda minha pesquisa.

Sou grato ao meu orientador, Simplício Arnaud da Silva, por toda a paciência, assistência, competência e dedicação ao que faz, me ajudando nas horas mais difíceis.

Agradeço também a instituição da Universidade Federal da Paraíba, em especial ao setor de pós-graduação PPGEM, pela oportunidade para essa formação e a CNPq pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

# UTILIZAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DE VIBRAÇÃO POR EXCITADOR ELETROMAGNÉTICO

## RESUMO

As vibrações ou oscilações mecânicas são movimentos que se repetem após um determinado período de tempo. Estas oscilações são utilizadas para caracterizar sistemas dinâmicos quanto as suas propriedades. Estas caracterizações são fundamentais nas áreas de construção civil e mecânica, sendo amplamente utilizadas para testar a resistência de estruturas, na prevenção ao surgimento de fadigas, quando submetidos a uma determinada vibração. Nesse trabalho foram realizados ensaios de vibrações e controle Fuzzy em um sistema dinâmico composto por um oscilador eletromagnético e um transdutor de aceleração. Os parâmetros utilizados para o controle do sistema foram: varredura do sinal de controle para frequências de 100 a 1 kHz; controle mediante as cargas de 100 a 500 gramas; implementação de 49 regras difusas distribuídas entre a análise do erro e variação do erro; análise do erro percentual médio e o controle de tensão de pico em 1 volt de amplitude que equivale à aceleração de  $61,730 \text{ m/s}^2$  sem carga. Os resultados deste trabalho apresentaram o controle do sistema com erros médios variando de 0,35% a 1,51%. Em que foram adicionadas cargas entre zero e 500 gramas. A conclusão desse estudo consistiu na correção da amplitude de vibração, pela técnica de controle Fuzzy por meio da programação em LabVIEW<sup>TM</sup> para uma determinada frequência, em que possibilitou a análise mais precisa de estruturas a impactos e vibrações mecânicas.

Palavras-Chave: Amplitude de Vibração. Controle Fuzzy. Excitador Eletromagnético.

# **EMPLOYING FUZZY LOGIC ON VIBRATIONS CONTROL THROUGH ELECTROMAGNETIC EXCITER**

## **ABSTRACT**

The mechanical vibrations or oscillations are movements that are repeated after a certain period of time. These oscillations are used to characterize dynamic systems in terms of their properties. These characteristics are fundamental in the areas of civil and mechanical construction, being widely used to test the strength of structures, in preventing to the appearance of fatigues, when applied in a specific vibration. In this work, vibration and diffuse control tests were performed in an advanced system composed of an electromagnetic oscillator and an acceleration transducer. The parameters used for system control were: scanning the control signal for frequencies from 100 to 1 kHz; control using loads of 100 to 500 grams; implementation of 49 fuzzy rules distributed between error analysis and error variation; analysis of the average percentage error and control of the peak voltage at 1 volt of amplitude equivalent to the acceleration of  $61.730 \text{ m/s}^2$  without load. This paper presents the control of the system with average errors varying from 0,35% to 1.51%. In which loads between zero and 500 grams were added. The conclusion of this study consisted in the correction of the vibration amplitude, by the Fuzzy control technique through of LabVIEW<sup>TM</sup> programming for a given frequency, in that enabled the most accurate analysis of structures and impacts and mechanical vibrations.

Keywords: Vibration Amplitude. Fuzzy Control. Electromagnetic Exciter.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS E QUADROS .....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGRLAS .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>vii</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	2
1.3. MOTIVAÇÃO .....	3
1.4. ESCOPO DO TRABALHO.....	3
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>4</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	4
2.2 QUADRO COM RESUMO DOS TRABALHOS RELACIONADOS.....	5
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>7</b>
<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>7</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	7
3.2 VIBRAÇÃO MECÂNICA.....	7
3.2.1 <i>Análise Modal em Vibração Mecânica</i> .....	8
3.3 SISTEMAS DE CONTROLE .....	14
3.4 SISTEMA DE CONTROLE FUZZY .....	18
3.4.1 <i>Introdução a Lógica Fuzzy</i> .....	18

3.4.2 Fuzzificação.....	23
3.4.3 Inferência Fuzzy.....	23
3.4.4 Defuzzificação.....	26
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>28</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	28
4.2 BANCADA DE EXPERIMENTOS .....	28
4.3 EXCITADOR ELETROMAGNÉTICO .....	31
3.4 ACELERÔMETRO PIEZOELÉTRICO.....	38
4.4 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS NI-DAQ USB 1262.....	40
4.5 DISPOSITIVO DINAMÔMETRO .....	41
4.6 FONTE DE ALIMENTAÇÃO .....	43
4.7 AMPLIFICADOR DE SINAIS .....	43
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>44</b>
<b>IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE FUZZY.....</b>	<b>44</b>
5.1 INTRODUÇÃO.....	44
5.2 NOTA SOBRE O SISTEMA INTELIGENTE (LÓGICA FUZZY).....	44
5.3 MODELAGEM DO CONTROLADOR FUZZY PARA O SISTEMA .....	45
5.3.1 Fuzzificação.....	46
5.3.2 Defuzzificação.....	47
5.3.3 Inferência Fuzzy.....	49
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>51</b>
<b>IMPLEMENTAÇÃO DO DIAGRAMA DE BLOCOS NO LABVIEW™ .....</b>	<b>51</b>
6.1 INTRODUÇÃO.....	51
6.2 MODELAGEM DO DIAGRAMA DE BLOCOS .....	52
6.2.1 Bloco de Aquisição de Dados (DAQ Assistant).....	52
6.2.2 Bloco de Medições Espectrais (Spectral Measurements) .....	54
6.2.3 Bloco de Gerador de Sinais (Simulate Signal).....	55
6.2.4 Varredura das Frequências e do Tempo.....	57
<b>CAPÍTULO VII.....</b>	<b>59</b>

<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>59</b>
7.1 INTRODUÇÃO .....	59
7.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	59
7.2.1 <i>Experimento sem Carga</i> .....	61
7.2.2 <i>Experimento com Carga de 100 g</i> .....	62
7.2.3 <i>Experimento com Carga de 200 g</i> .....	63
7.2.4 <i>Experimento com Carga de 300 g</i> .....	64
7.2.5 <i>Experimento com Carga de 400 g</i> .....	66
7.2.6 <i>Experimento com Carga de 500 g</i> .....	67
<b>CAPÍTULO VIII .....</b>	<b>69</b>
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>74</b>
<b>PROGRAMA DA PLANTA EXPERIMENTAL EM LABVIEW™ .....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>81</b>
<b>TABELA DA BASE DE REGRAS DO CONTROLADOR FUZZY .....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>83</b>
<b>APRESENTAÇÃO DAS TABELAS DE INTERPOLAÇÃO DOS GANHOS VERSUS FREQUÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>89</b>
<b>APRESENTAÇÃO DAS TABELAS DO ERRO PERCENTUAL MÉDIO.....</b>	<b>89</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da Análise Modal Experimental.....	9
Figura 2 - Ilustração do Modelo de Vibração.....	10
Figura 3 - Diagrama de Bloco de Controle.....	14
Figura 4 - Diagrama de Bloco de Controle em Malha Aberta.....	15
Figura 5 - Diagrama de Bloco de Controle em Malha Fechada.....	15
Figura 6 - Controlador PID Genérico.....	17
Figura 7 - Conjunto de Idade: (a) Abordagem booleana e (b) Abordagem Fuzzy...20	
Figura 8 - Funções de Pertinência.....	22
Figura 9 - Exemplo de Cálculo da Saída Discreta de um Controlador Fuzzy.....	25
Figura 10 - Defuzzificação pelo Método (C-o-A).....	26
Figura 11 - Defuzzificação pelo Método (C-o-M).....	27
Figura 12 - Bancada Instrumental.....	29
Figura 13 - Diagrama de Blocos da Bancada Instrumental.....	30
Figura 14 - Mini-Shaker da <i>Bruel&amp;Kjaer</i> <sup>®</sup> Modelo 4810.....	31
Figura 15 - Fixação do Mini-Shaker na Estrutura de Bancada.....	32
Figura 16 - Curva de Desempenho Senoidal para o <i>Mini-Shaker Bruel&amp;Kjaer</i> <sup>®</sup> 4810.....	32
Figura 17 - Aceleração em Função da Carga.....	37
Figura 18 - Acelerômetro Piezoelétrico <i>Bruel&amp;Kjaer</i> <sup>®</sup> 4370.....	38
Figura 19 - Esquema do Atuador Acelerômetro <i>Bruel&amp;Kjaer</i> <sup>®</sup> 4370.....	39
Figura 20 - Curvas de Resposta em Frequência para Acelerômetro <i>Bruel&amp;Kjaer</i> <sup>®</sup> 4370.....	39
Figura 21 - Módulo de Aquisição de Dados NI-DAQ USB 1262.....	40
Figura 22 - Porta de Entrada e Saída NI-DAQ USB 1262.....	41
Figura 23 - Instrumento Dinamômetro.....	41
Figura 24 - Sistema de Carga com Dinamômetro.....	42
Figura 25 - Fonte de Alimentação <i>Agilent</i> <sup>®</sup> DC E3848A.....	43

Figura 26 - Amplificador de Sinal <i>STETSOM</i> <sup>®</sup> TH 2030.....	43
Figura 27 - Diagrama de Blocos do Processo de Inferência de um Controlador Fuzzy.....	45
Figura 28 - Malha Fechada para Controlador Fuzzy. ....	46
Figura 29 - Funções de Pertinência da Variável de Entrada (Erro).....	46
Figura 30 - Funções de Pertinência da Variável de Entrada (Derro). ....	47
Figura 31 - Funções de Pertinência da Variável de Controle Saída. ....	48
Figura 32 - Representação de Duas Variáveis de Entradas e Uma de Saída do Controlador Fuzzy. ....	49
Figura 33 - Superfície de Controle gerada por Controlador Fuzzy. ....	50
Figura 34 - Bloco <i>DAQ</i> Assistant de Entrada. ....	53
Figura 35 - Bloco <i>DAQ</i> Assistant de Saída. ....	53
Figura 36 - Bloco Spectral Measurements. ....	54
Figura 37 - Bloco Simulate Signal. ....	56
Figura 38 - Varredura das Frequências e do Tempo. ....	57
Figura 39 – Comportamento do Sistema de Controle Fuzzy para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz. ....	60
Figura 40 - Gráfico da Simulação Automática do Controlador Fuzzy a Zero de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz. ....	61
Figura 41 - Gráfico dos Erros Percentuais versus Amplitude a Zero de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz. ....	61
Figura 42 - Gráfico da Simulação Automática do Controlador Fuzzy na Adição de 100 g de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.....	62
Figura 43 - Gráfico dos Erros Percentuais versus Amplitude com Carga de 100 g para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz. ....	63
Figura 44 - Gráfico da Simulação Automática do Controlador Fuzzy na Adição de 200 g de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.....	63
Figura 45 - Gráfico dos Erros Percentuais versus Amplitude com Carga de 200 g para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz. ....	64

Figura 46 - Gráfico da Simulação Automática do Controlador Fuzzy na Adição de 300 g de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.....	65
Figura 47 - Gráfico dos Erros Percentuais versus Amplitude com Carga de 300 g para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz. ....	65
Figura 48 - Gráfico da Simulação Automática do Controlador Fuzzy na Adição de 400 g de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.....	66
Figura 49 - Gráfico dos Erros Percentuais versus Amplitude com Carga de 400 g para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz. ....	66
Figura 50 - Gráfico da Simulação Automática do Controlador Fuzzy na Adição de 500 g de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.....	67
Figura 51 - Gráfico dos Erros Percentuais versus Amplitude com Carga de 500 g.	67
Figura A.1 - Diagrama de Blocos em LabVIEW™ .....	74
Figura A.2 - Rotinas do MatLab® <i>Script Node</i> .....	75
Figura A.3 - Painel Frontal em LabVIEW™ .....	76
Figura A.4 - Configuração do Bloco <i>DAQ</i> de Entrada.....	77
Figura A.5 - Configuração do Bloco <i>DAQ</i> de Saída.....	78
Figura A.6 - Configuração do <i>Spectral Measurements</i> .....	79
Figura A.7 - Configuração do Bloco <i>Simulate Signal</i> .....	80

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos Trabalhos Relacionados: Métodos Baseados em Lógica Fuzzy para o Controle de Vibração Mecânica em Estruturas e Máquinas.....	5
Tabela 1 – Desempenho Senoidal do Mini-Shaker da <i>Bruel&amp;Kjaer</i> <sup>®</sup> .....	33
Tabela 2 - Base de Regras do Controlador Fuzzy.....	50
Tabela B.1 – Base de Regras do Controlador Fuzzy do Projeto.....	81
Tabela C.1 – Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 0 g.....	83
Tabela C.2 - Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 100 g.....	84
Tabela C.3 - Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 200 g.....	85
Tabela C.4 - Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 300 g.....	86
Tabela C.5 - Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 400 g.....	87
Tabela C.6 - Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 500 g.....	88
Tabela D.1 - Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 0 g.....	89
Tabela D.2 - Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 100 g.....	90
Tabela D.3 - Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 200 g.....	91
Tabela D.4 - Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 300 g.....	92
Tabela D.5 - Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 400 g.....	93
Tabela D.6 - Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 500 g.....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGRLAS

<i>ADM</i>	Microdispositivos avançados.
<i>AI0</i>	Porta analógica de entrada no canal 0 (zero).
<i>AI GND</i>	Porta analógica de entrada da linha terra.
<i>AO1</i>	Porta analógica de saída no canal 1.
<i>AO GND</i>	Porta analógica de saída da linha terra.
<i>CA</i>	Corrente alternada.
<i>CC</i>	Corrente contínua.
<i>CNPq</i>	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
<i>C-o-A</i>	Centro de Área.
<i>C-o-M</i>	Centro de Máximo.
<i>D</i>	Controlador Derivativo.
<i>DAQ</i>	Módulo de aquisição de dados.
<i>DBL</i>	Terminal numérica de ponto flutuante de precisão dupla.
<i>FFT</i>	Transformada Rápida de Fourier.
<i>LINC</i>	Laboratório de Instrumentação e Controle.
<i>MAX</i>	Conectivo OU (união Fuzzy dos termos de saída).
<i>MIN</i>	Conectivo E (interseção Fuzzy dos termos de entrada).
<i>M-o-M</i>	Média dos Máximos.

<i>N</i>	Número de graus de liberdade do sistema.
NB	Função de pertinência grande máximo negativo.
<i>NI</i>	<i>National Instruments</i> <sup>®</sup> .
NM	Função de pertinência médio negativo.
NS	Função de pertinência pequeno negativo.
NVB	Função de pertinência grande máximo negativo.
<i>P</i>	Controlador Proporcional.
PB	Função de pertinência grande positivo.
PD	Controlador Proporcional Derivativo.
PI	Controlador Proporcional Integral.
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo.
PM	Função de pertinência médio positivo.
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
PS	Função de pertinência pequeno positivo.
PVB	Função de pertinência grande máximo positivo.
<i>RMS</i>	Root Mean Square (valor quadrático médio ou valor eficaz).
<i>TH</i>	Thunder Line (Linha Trovão dos amplificadores STEPSOM <sup>®</sup> ).
UFPB	Universidade Federal da Paraíba.
<i>UNF</i>	Tipo de rosca fina para parafuso.
<i>USB</i>	Porta Universal.
<i>VI</i>	Instrumento virtual.
ZE	Função de pertinência zero.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Conjunto de elementos.
$a$	Aceleração final em metros por segundo ao quadrado.
$a_0$	Aceleração inicial em metros por segundo ao quadrado.
$\alpha$	Constante do denominador do expoente da função exponencial.
$\alpha(\omega)$	Função de resposta em frequência.
$\beta$	Constante do expoente da função exponencial.
$B(s)$	Função de transferência da retroalimentação.
$c$	Cargas em gramas.
$c$	Coefficiente de amortecimento do modelo.
$[C]$	Matriz de amortecimento.
$C(s)$	Função de transferência de saída.
$diag[C]$	Matriz diagonal de amortecimento modal.
$diag[K]$	Matriz diagonal de rigidez modal.
$diag[M]$	Matriz diagonal de massa modal.
$e(t)$	Erro em função de tempo $t$ .
$e(\tau)$	Erro em função de tempo de integração $\tau$ .
$\in$	Símbolo de pertence ao conjunto.

$\notin$	Símbolo de não pertence ao conjunto.
$E(s)$	Função complexa de erro.
$f$	Força externa aplicada na massa.
$f(t)$	Função degrau no domínio do tempo.
$F_q$	Força harmônica aplicada à outra coordenada.
$G_1(s)$	Controlador do sistema.
$G_2(s)$	Planta do sistema.
$H$	Função de transferência do oscilador eletromagnético.
$H(s)$	Sistema de controle de retroalimentação.
$i_{RMS}$	Corrente elétrica máxima do oscilador eletromagnético.
$k$	Coefficiente de rigidez molar do modelo.
$k_d$	Ganho derivativo.
$k_i$	Ganho integral.
$k_p$	Ganho proporcional.
$[K]$	Matriz de rigidez normalizada.
$m$	Massa do modelo estrutural.
$[M]$	Matriz de rigidez normalizada da massa de autovalores.
$R(s)$	Função de transferência complexa de entrada.
$T(u)$	Conjunto de termos de $u$ definido em $U$ .
$u$	Variável Fuzzy.
$u(t)$	Variável de entrada a ser controlada.

$U$	Universo de discurso.
$U(s)$	Função de transferência complexa de ligação.
$V$	Tensão elétrica em volt.
$\omega_i$	$i$ -ésima frequência natural.
$x$	Deslocamento da massa.
$\mathbf{x}$	Elemento qualquer de um conjunto.
$\mathbf{x}$	Saída discreta da defuzzificação.
$\dot{x}$	Velocidade da massa.
$x(t)$	Deslocamento em função do tempo.
$X$	Matriz de deslocamento.
$X_p$	Resposta harmônica de uma coordenada.
$y_i$	Forma modal de vetores.
$y(t)$	Variável de saída do controlador.
$[Y]$	Matriz modal de autovetores.
$[Y]^T$	Matriz transposta modal de autovetores.
$\ddot{x}$	Aceleração da massa.
$Z_c$	Impedância da bobina medida em ohms ( $\Omega$ ).
$\mu_A(x)$	Função de pertinência $x$ em $A$ .
$\phi_i$	Elementos do modo $i$ .
$\zeta_i$	Fator de amortecimento no modo $i$ .
$[\Phi]$	Matriz de elementos do modo $\phi_i$ .

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUÇÃO**

#### **1.1. INTRODUÇÃO**

O controle de vibrações é uma área de estudo da Engenharia Mecânica, que tem como o principal objetivo encontrar as frequências de ressonâncias para que estas possam relacionar-se com as possíveis fadigas de materiais e estruturas. Há técnicas e métodos variados que permitem o controle de vibrações, e dentre estas existem aquelas que utilizam os observadores dinâmicos de vibração. Testes de vibração mecânica são conduzidos no desenvolvimento, qualificação e aceitação de equipamentos e componentes estruturais. Esses testes envolvem o emprego de dispositivo capaz de produzir vibração mecânica, sensor que mede as oscilações e sistemas de controle de vibração. Excitadores eletromagnéticos são geralmente utilizados na realização de testes de vibração e a verificação das características dinâmicas constitui um requisito de confiabilidade indispensável para a integridade dos testes conduzidos.

Outros componentes essenciais para a realização deste experimento são tais que, um amplificador de potência, um acelerômetro e um sistema de controle em malha fechada para garantir a integridade do teste experimental (BUZDUGAN; MIHAILESCU; RADES, 1986).

A lógica Fuzzy é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle (SHAW e SIMÕES, 2007). A lógica Fuzzy representa o processo que o ser humano utiliza para inferir conclusões baseadas em informações que possuem pela combinação lógica de multivalores, teoria probabilística e inteligência artificial, podendo assim obter tal conhecimento humano, possibilitando a implementação de um controlador

computacional com desempenho semelhante à operação controlada pelo pensamento humano, por exemplo, operadores humanos podem controlar processos industriais e plantas com características não lineares ou até mesmo com comportamento dinâmico pouco conhecido sobre inferência de relações e experiência entre as variáveis do processo. O mecanismo em estudo é composto basicamente por um gerador de vibração eletromagnético, da *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> modelo 4810, onde tal gerador de vibração é controlado por um amplificador de sinal de áudio para autos, modelo *STETSOM*<sup>®</sup> TH 2030, um dinamômetro com capacidade de 10 N e um dispositivo acelerômetro da *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> modelo 4370, conectado via USB a um computador, por meio de uma placa de aquisição de dados *NI-DAQ USB 6212*, fabricada pela *National Instruments*<sup>®</sup> para obter os sinais das amplitudes de ondas, os quais são processados por meio de plataformas *LabVIEW*<sup>™</sup>, para a implementação do controlador Fuzzy, na análise dos parâmetros de ondas vibracionais.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Tem como objetivo realizar ensaios de vibração para desenvolver um sistema de controle utilizando à lógica Fuzzy. Esse sistema será capaz de controlar as grandezas físicas por meio de um excitador eletromagnético. O controle do sistema permitirá ajustar parâmetros como amplitudes de tensão, aceleração e frequências em uma faixa de ondas de vibração.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

São objetivos específicos deste trabalho:

- Desenvolver a bancada de teste;
- Realizar experimentos iniciais a fim de conhecer os parâmetros de controle;
- Realizar o controle de amplitude em uma varredura de frequência via programa em *LabVIEW*<sup>™</sup>.

### **1.3. MOTIVAÇÃO**

O trabalho foi formado por uma ideia de controlar a vibração por meio de atuador eletromagnético, que pode ser encontrado em várias pesquisas de publicações na área. A maioria dos trabalhos pesquisados é voltada para o estudo de vibração mecânica em estruturas e em máquinas. A motivação do presente trabalho se deu em desenvolver o sistema de controle inteligente que possibilite a execução por meio de experimentos de vibração em estruturas utilizando técnicas de varredura em frequência com a amplitude de vibração sob controle.

### **1.4. ESCOPO DO TRABALHO**

O estudo dessa dissertação está organizado na seguinte sequência: O capítulo II trata-se da revisão bibliográfica com revisões relacionadas ao tema desta dissertação. O capítulo III é composto de uma fundamentação teórica, iniciando pela visão histórica da vibração mecânica por meio de excitadores eletromagnéticos, do sistema de controle e se encerra com a realização do sistema de controle Fuzzy. Já o capítulo IV trata-se de materiais e métodos que apresentam todos os dispositivos elétricos e mecânicos de toda a estrutura da planta, além dos seus respectivos funcionamentos para a obtenção dos sinais de entrada e saída do sistema. O capítulo V apresenta todo desenvolvimento da implementação do controle Fuzzy da planta analisada, em que são mostradas as configurações das variáveis de entrada, estratégia do controle e regras do controlador. O capítulo VI apresenta toda implementação do diagrama de blocos na plataforma LabVIEW<sup>TM</sup>, explicando todo seu funcionamento da planta analisada com seu respectivo controle. O capítulo VII apresentam-se todos os resultados experimentais obtidos pelo controlador por gráficos de amplitude constante referencial em relação ao tempo em uma varredura que vai de 100 Hz a 1 kHz. E por fim, o capítulo VIII, refere-se à conclusão desta dissertação além das sugestões para futuros trabalhos na análise de vibração mecânica para com o controle de planta.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 INTRODUÇÃO**

O presente trabalho propõe o controle das amplitudes de vibrações na variação de frequência de 100 Hz a 1 kHz, por meio de um atuador de vibração, conhecido como excitador eletromagnético, com intuito de manter a aceleração do sistema constante na faixa de frequência desejada.

A teoria de controle utilizada foi o controle Fuzzy, que é adequado para controlar os níveis de amplitudes nas estruturas com comportamento não linear.

Nesse projeto, a análise modal teórica e experimental apresenta um papel de interligação entre áreas como análise estrutural, dinâmica e controle de máquinas, tendo como objetivo, na obtenção dos parâmetros de deslocamento, velocidade ou aceleração.

Com o uso de métodos e técnicas computacionais e experimentais de simulação, identificação e determinação das características dinâmicas de estruturas, a análise modal vem se tornando uma área interdisciplinar, agregando conceitos de engenharia mecânica, elétrica e computacional (ALLEMANG, 1994).

Foi construído um quadro com o resumo dos trabalhos mais relevantes relacionados a esta linha de pesquisa, relacionados à aplicação da lógica Fuzzy como ferramenta de controle para as amplitudes de vibração originadas do excitador eletromagnético.

O Quadro 1 apresenta o resumo dos trabalhos relacionados ao método baseado em lógica Fuzzy para o controle de vibração mecânica em estruturas e máquinas.

## 2.2 QUADRO COM RESUMO DOS TRABALHOS RELACIONADOS

Ano	Autor	Publicação	Trabalho	Resultado
2019	DONADEL, Juliane; MARTINS GOMES, Herbert.	Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 27 N° 1, 2019, pp. 101-112.	Realizaram o controle de um oscilador eletromagnético utilizando métodos heurísticos como o controle Fuzzy e o controle PID.	Os autores conseguiram um tempo de subida em 2,7 segundos para o controle PID e 3,7 segundos para o controle Fuzzy. Apresentaram ainda overshoot de 11% para o PID e de 17% para a lógica Fuzzy.
2019	YAO, Jianjun <i>et al.</i>	2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC).	Fizeram um esquema de controle de três parâmetros baseado na atribuição de pólo adaptável para um Sistema subaquático da tabela da agitação.	O módulo oscilador trabalhou com uma pressão de 690 Mpa com uma área efetiva do pistão de 706,9 micros metro <sup>2</sup> . A massa do fluido correspondeu a 135 kg e foi possível atingir a frequência de 1 kHz com tempo de subida de 0,2 segundos.
2019	HE, Ping <i>et al.</i>	2019 Conferência Chinesa de Controle e Decisão (CCDC). IEEE, 2019. p. 2578-2583.	Projetaram um controlador PR aprimorado com controle difuso proposto a melhorar o desempenho do controle do sistema de vibração sinusoidal e eliminar o efeito do distúrbio de vibração no desempenho do controle.	O controlador possui melhor desempenho de controle na frequência de multi-ressonância, atraso de tempo, perturbação e incerteza do modelo para o sistema de controle de teste de vibração.
2019	CARDENAS-MACIEL, Selene L.; CORIA, Luis N; CONTRERAS-HERNANDEZ, Sergio.	Otimização numérica e evolutiva - NEO 2017, v. 785, p. 261, 2019.	Propuseram um esquema para atenuação dos efeitos da vibração em estruturas verticais por meio de um sistema de controle baseado em um sistema de inferência Fuzzy (Mamdani). As regras nebulosas do controlador foram projetadas de forma que o sistema seja garantido para satisfazer o critério de estabilidade de Lyapunov.	Simulações numéricas foram realizadas para em que foi avaliado que o controlador atenuou a vibração na estrutura que realizou o objetivo do controle proposto.
2018	REPINALDO, Joana Pereira <i>et al.</i>	Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.	Utilizaram os controladores Neuro-Fuzzy e o Fuzzy para fins de comparação. O projeto dos controladores foi utilizando duas abordagens, sendo a primeira a teoria de controle aplicado no sistema de coordenadas físicas e na segunda abordagem, os controladores foram projetados no domínio modal.	Os resultados foram analisados através de simulações numéricas e posteriormente validados experimentalmente, demonstrando a eficácia do controle.
2017	ALIJANI, Zahra <i>et al.</i>	IEEE - 2017 International Conference on High Performance	Utilizaram a lógica Fuzzy para resolver equações diferenciais em problemas clássicos. A lógica Fuzzy foi aplicada nas equações	Resultados do trabalho apresentaram rápida convergência para resolução das equações diferenciais.

		Computing & Simulation.	diferenciais como método numérico, corrigindo as amplitudes de um sinal de referência.	
2017	DA SILVA, Camila Albertin Xavier <i>et al.</i>	DINCON 2017.	Utilizaram atuadores eletromagnéticos, com intuito de obter uma redução na resposta do deslocamento do sistema. A teoria de controle utilizada foi o Controle Fuzzy.	Resultados obtidos pelas simulações numéricas para a resposta do deslocamento do sistema no domínio do tempo, e da função resposta em frequência, nas quais a vibração da viga e os dois primeiros modos de vibrar foram atenuados.
2016	SEKHAR, Y. e VINOTHKUMAR, C.	2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies [ICCPCT].	Fizeram o controle das oscilações de piezoelétricos para classificar estruturas do tipo centilitro no espaço. O controle foi realizado pelo método PID utilizando o software LabView. O sensor produz uma carga que é proporcional à tensão dinâmica no sensor.	Resultados do trabalho apresentaram o controle para a frequência de 26,26 rad/seg; frequência natural de 26,28 rad/seg.; fator de amortecimento de 0,019, tempo de acomodação de 0,6 segundos e tempo de subida de 0,015 segundos.
2015	CALA, Martin.	Proceedings of the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC).	Foi utilizado sistemas de filtros para realizar o controle de um oscilador eletromagnético. Para isto é realizado a varredura do sinal de controle baseado em testes por meio de filtros.	Resultados apontaram boa acurácia para o controle em frequência de 20 até 1 kHz. O autor conseguiu ainda um ganho de +- 6 dB de amplitude.
2013	EREMIN, Eugenia L.; SHELENOK, Eugenia A.	2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).	Foi proposto o controle de um oscilador eletromagnético utilizando o critério de hipersensibilidade de um sinal sintético.	Resultados deste trabalho apresentaram um controle melhor que o método clássico Proporcional-Integral.
2010	LI, Xingu <i>et al.</i>	IEEE - 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation.	Realizaram a caracterização de um sensor eletromagnético e aplicaram o controle Fuzzy de forma proporcional, integral e diferencial por meio de malha fechada. Os autores ainda tentaram diminuir o erro de rastreamento do sistema por meio da alteração da variável de entrada.	Resultados do trabalho apresentam um erro aceitável com aceleração de até 2,98 m/s <sup>2</sup> . O Tempo de resposta ficou entre 3,6 e 4,3 segundos.
2006	FLORA, Leandro Delia; GRÜNDLING, Hilton Abílio.	In Power Electronics Specialists Conference. 37th IEEE.	Implementaram o controle digital da aceleração por meio do chaveamento de fontes. O controle de aceleração de um excitador eletrodinâmico alimentado por inversor.	Foram utilizadas duas malhas para realizar este controle que permitiu trabalhar no range de 20 a 1 kHz.

Quadro 1 – Resumo dos Trabalhos Relacionados: Método Baseado em Lógica Fuzzy para o Controle de Vibração Mecânica em Estruturas e Máquinas.

## **CAPÍTULO III**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Nesse capítulo abordam-se os fundamentos teóricos e revisão bibliográfica de acordo com o tema da pesquisa do projeto analisado. A seção 2.2, aborda-se o tema de vibração mecânica fornecido pelo conjunto, excitador eletromagnético e acelerômetro, os quais captam sinais de tensão a serem controlados na varredura de frequências desejadas do projeto. A seção 2.3, apresenta uma abordagem sobre um estudo de controle para os diversos tipos de plantas a serem controladas. E a seção 2.4, mostra um estudo sobre o sistema de controle Fuzzy.

#### **3.2 VIBRAÇÃO MECÂNICA**

O estudo da vibração mecânica despertou o interesse de estudá-la quando foram descobertos os primeiros instrumentos musicais, no entanto, o estudo foi se desenvolvendo ao longo do tempo, sendo assim aplicadas engenhosidades e investigação crítica ao estudo do fenômeno da vibração.

A vibração mecânica é definida como um movimento de oscilação de um corpo em torno de sua posição de equilíbrio. A frequência de um movimento vibratório pode ser definida como o número de oscilações completas, por um intervalo de tempo.

O número de ciclos de movimento em um segundo é chamado de frequência, medido em hertz (Hz) (RAO, 2008).

Caso haja ruído, a frequência é uma escala que indica a intensidade sonora, o período desse movimento vibratório é o tempo que ele gasta em uma vibração completa, ou seja, é o tempo gasto em um ciclo, sendo assim, pode-se estabelecer que a vibração estivesse sempre presente nas máquinas e equipamentos, esta irá ocorrer por causa dos efeitos dinâmicos de tolerâncias de fabricação, por folgas, contatos, o atrito entre peças de uma máquina e, muitas vezes, pelas forças desequilibradas de componentes rotativos e de movimentos alternados.

Já a amplitude desse movimento será a medida da intensidade da vibração descrita pelo sistema, tal movimento será descrito como uma frequência natural, onde é analisada a variação da amplitude do deslocamento do sistema e do período com a variação da massa do mesmo.

Quando ocorrer o aumento da amplitude dessa frequência natural, devido à ação de um agente externo, é entendido como sendo uma frequência de ressonância, podendo este agravar os níveis de vibrações.

Portanto, os equipamentos devem estar sempre em condições distantes de sua frequência natural, para que não fique sujeitos às ressonâncias, o que reduziria a vida útil dos mesmos. (RAO, 2008).

### **3.2.1 Análise Modal em Vibração Mecânica**

O método de análise modal em vibrações mecânica tem como objetivo representar a dinâmica de modelos mecânicos lineares e ajudar a desenvolver um entendimento das técnicas desse método, em que a resposta total do sistema pode ser construída ou montada pela combinação de modos individuais de vibração.

A fundamentação teórica da análise modal de vibração para a dissertação em estudo teve como base as recomendações das literaturas RAO (2008) e INMAM (2013). Segundo RAO (2008), a resposta dinâmica de uma estrutura pode ser obtida como uma combinação de

seus modos, tais como as frequências e os fatores de amortecimentos modais que configuram a dinâmica estrutural da máquina por meio de testes de vibração.

Para a medição da vibração na análise modal, são necessários os seguintes equipamentos: um excitador de vibração, o qual produz uma força de vibração na estrutura a ser analisada; um transdutor capaz de converter o movimento físico de oscilação em um sinal elétrico; um amplificador de condicionamento de sinal para mudar as características do transdutor equivalente à eletrônica de entrada de sinais do sistema digital de aquisição de dados e um analisador para executar as tarefas de processamento de sinal e análise modal, que o caso foi utilizado em programação LabVIEW<sup>TM</sup> para o estudo da dissertação.

Na Figura 1 ilustra-se o esquema de medição de vibração para a análise modal experimental.



Figura 1 - Esquema da Análise Modal Experimental.

Aplicam-se as leis do movimento vibracional que apresenta um modelo matemático simples mostrado na Equação 1.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \quad (1)$$

Em que os parâmetros característicos são tais que:  $m$  é a massa do modelo estrutural;  $c$  é o coeficiente de amortecimento do modelo;  $k$  é o coeficiente de rigidez do modelo;  $x$  é o deslocamento da massa;  $\dot{x}$  é a velocidade da massa;  $\ddot{x}$  é a aceleração da massa e  $f$  é a força externa aplicada na massa.

Na Figura 2 ilustra-se o modelo estrutural para o movimento de vibração em que há a representação de cada parâmetro necessário para a análise de condição do movimento.

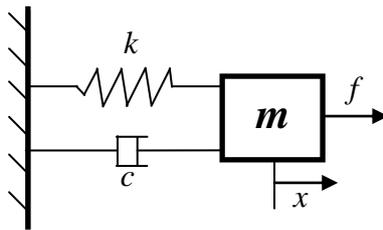


Figura 2 - Ilustração do Modelo de Vibração.

No teste de vibração são determinadas as formas modais por meio das equações de movimento do sistema com vários graus de liberdade em suas respectivas coordenadas físicas. Inicialmente deve ser considerado o sistema não amortecido com vários graus de liberdade.

$$[M]\ddot{x} + [K]x = f \quad (2)$$

Onde a vibração harmônica livre da Equação 2 equivale a Equação 3.

$$[[K] - \omega_i^2 [M]]y_i = 0 \quad (3)$$

Neste caso,  $\omega_i$  é a  $i$ -ésima frequência natural e  $y_i$  é a forma modal correspondente, e com base nas relações de ortogonalidade para as formas modais que podem ser apresentadas nas expressões seguintes.

$$[Y]^T \cdot [M] \cdot [Y] = \text{diag}[M] \quad (4)$$

$$[Y]^T \cdot [K] \cdot [Y] = \text{diag}[K] \quad (5)$$

Logo se sabe que  $[Y]$  é a matriz modal que possui os vetores  $y_1, y_2, \dots, y_N$ , como colunas e  $N$  representa o número de graus de liberdade do sistema, ou seja, também igual ao número de frequências naturais.

Já os elementos  $diag[M]$  e  $diag[K]$  são chamados de massa modal e rigidez modal respectivamente, podendo ser assim expressa como a Equação 6.

$$\omega_i^2 = \frac{diag[K]}{diag[M]} \quad (6)$$

Para as funções forçantes  $f$  são harmônicas, temos que  $f(t) = Fe^{i\omega t}$ , com  $i = \sqrt{-1}$ , logo a Equação 2 se torna a equação a seguir.

$$x(t) = Xe^{i\omega t} = [[K] - \omega^2 [M]]^{-1} \cdot Fe^{i\omega t} = [\alpha(\omega)] \cdot Fe^{i\omega t} \quad (7)$$

O  $\alpha(\omega)$  denomina-se de função de resposta em frequência, em que são utilizadas as relações de ortogonalidade das Equações 4 e da Equação 5, então a Equação 7 pode ser expresso através da Equação 8.

$$[\alpha(\omega)] = [Y] \cdot [[K] - \omega^2 [M]]^{-1} \cdot [Y]^T \quad (8)$$

Caso o elemento  $[\alpha(\omega)]$  que esteja linha  $p$  e coluna  $q$  que representa a resposta harmônica de uma coordenada,  $X_p$ , causada por uma força harmônica aplicada à outra coordenada,  $F_q$ , deve ser escrita como na Equação 9.

$$\alpha_{pq}(\omega) = [\alpha(\omega)]_{pq} = \frac{X_p}{F_q} \bigg|_{j \neq q} = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i)_p \cdot (y_i)_q}{[K_i] - \omega^2 [M_i]} \quad (9)$$

Caso a matriz modal  $[Y]$  for normalizada ainda mais, chaga-se a Equação 10.

$$[\Phi] = [Y] \cdot [M]^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Os elementos do modo  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$  não mudará, mas a Equação 9 tornará na Equação 11.

$$\alpha_{pq}(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i)_p \cdot (\phi_i)_q}{\omega_i^2 - \omega^2} \quad (11)$$

O problema de autovalor simétrico para a matriz de rigidez normalizada da massa  $[M]$  de autovalores fornece a transformação  $[Y]$ , de autovetores, que diagonaliza  $[M]$  e desacopla as equações de movimento.

Esse processo de transformação de  $[M]$  em uma forma diagonal é chamado de análise modal (INMAM, 2013).

No caso dos sistemas amortecidos com vários graus de liberdade, que é representada pela Equação 12.

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = f \quad (12)$$

Simplificando a Equação 12, supondo que o amortecimento proporcional, de modo que a matriz de amortecimento  $[C]$  gera a Equação 13.

$$[C] = a[K] + b[M] \quad (13)$$

Em que  $a$  e  $b$  são constantes qualquer, logo se verifica que as formas modais do sistema não amortecido  $y_i$  e  $\phi_i$  não só diagonalizam as matrizes de massa e rigidez, como também a matriz do próprio amortecimento indicada na Equação 14.

$$[Y]^T \cdot [C] \cdot [Y] = \text{diag}[C] \quad (14)$$

No entanto, as formas modais do sistema amortecido são semelhantes aos dos sistemas não amortecido, porém as frequências naturais variam. Para o vetor forçante  $f$  da Equação 12 seja harmônico, a função de resposta em frequência pode ser derivada conforme mostra a Equação 15.

$$\alpha_{pq}(\omega) = [\alpha(\omega)]_{pq} = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i)_p \cdot (y_i)_q}{[K_i] - \omega^2 [M_i] + i\omega [C_i]} \quad (15)$$

Para o uso das formas modais normalizadas para massa, a Equação 15 se transforma na Equação 16, sabendo que  $\zeta_i$  é o fator de amortecimento no modo  $i$ .

$$\alpha_{pq}(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i)_p \cdot (\phi_i)_q}{\omega_i^2 - \omega^2 + 2i\zeta_i \omega_i \omega} \quad (16)$$

### 3.3 SISTEMAS DE CONTROLE

Um sistema de controle atende vários tipos de componentes físicos, em que apresenta as funções executadas para cada componente, na engenharia de controle estes componentes são representados por meio de diagrama de blocos.

Segundo OGATA (2010), um diagrama de blocos são representações gráficas das funções desempenhadas para cada componente além do fluxo de sinais entre ambos.

Um sistema de controle é uma interconexão de vários componentes, os quais formam uma configuração característica de sistema em que produz uma resposta desejada do sistema (DORF e BISHOP, 2018).

Na Figura 3 ilustra-se o diagrama de bloco de controle, onde o mesmo possui uma função de transferência de entrada  $R(s)$  na planta a ser processado e controlado a resposta de saída chamada de  $C(s)$ .

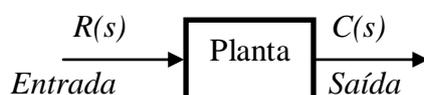


Figura 3 - Diagrama de Bloco de Controle.

Um sistema de malha aberta é representado por diagrama de blocos, em que a sua entrada de referência  $R(s)$  é enviada para o bloco controlador que aciona um processo a planta por meio da função de transferência  $U(s)$ , enquanto a saída  $C(s)$  que é a variável controlada, porém sem a retroalimentação, podendo haver possíveis sinais de perturbações adicionais, nos quais fornecem a soma algébrica dos sinais de entrada na execução dos sinais a esses associados.

O sistema de blocos em malha aberta, não efetuam correções por causa das possíveis perturbações (distúrbios) e são comandados pela entrada (NISE, 2012).

Na Figura 4 ilustra-se o diagrama de blocos de controle em malha aberta com suas funções de transferência.

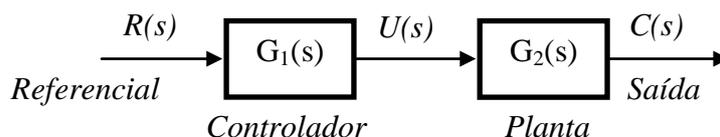


Figura 4 - Diagrama de Bloco de Controle em Malha Aberta.

Conhecido como controle de retroalimentação, o diagrama de blocos em malha fechada, determinam a resposta mais apropriada de controle baseado em variáveis medidas, em que faz a comparação contínua do valor de entrada de referência, calculando-a para seu ajuste e correção.

O sistema de controle consiste em subsistemas e processos construídos, que possui o objetivo de ter uma saída desejada, com desempenho desejado para uma entrada específica enviada (NISE, 2012).

Na Figura 5 ilustra-se o sistema de controle de retroalimentação  $H(s)$ , em que utiliza a função de saída  $C(s)$  se relacionando com a função de entrada  $R(s)$  para controlar o processo.

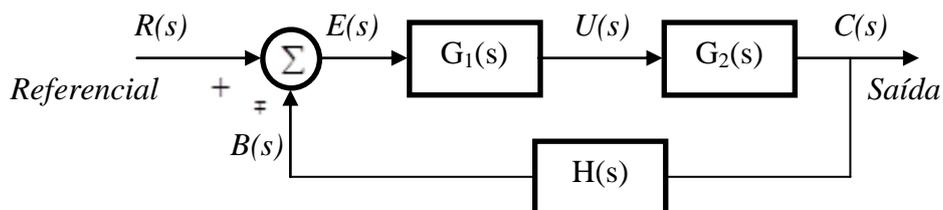


Figura 5 - Diagrama de Bloco de Controle em Malha Fechada.

Logo a diferença entre a função de saída e de entrada referencial denominada de erro  $E(s)$ , em que esse processo contínuo seja reduzido e então ajustado pelo controlador  $G_1(s)$ . O exemplo típico de controle é quando um avião se direciona incorretamente à esquerda, logo o controle inteligente ajusta essa direção para a posição desejada à direita.

Para esse controle, a relação entre entrada e saída indica a relação de causa-efeito do processo, podendo assim ser interpretada matematicamente através das equações diferenciais,

conhecidos como modelos matemáticos. Devido a esses sistemas serem dinâmicos, faz-se então o uso da Transformada de Laplace, em que a relação da transformada de Laplace da saída pela transformada de Laplace da entrada para um dado sistema de controle, tendo como hipótese de que todas as condições iniciais são nulas.

Com base de controle em malha fechada, segue-se um roteiro para os problemas relacionados a esses sistemas dinâmicos, onde são definidos os sistemas e seus componentes, em seguida obter a fórmula do modelo matemático e listar as hipóteses possíveis, depois descrever o modelo pelas equações diferenciais, resolvendo-as em função das variáveis de saída desejáveis, examinar as soluções e as hipóteses, e se necessário, reavaliar o sistema.

A Equação 17 representa a função de transferência do diagrama de blocos de malha fechada e a Equação 18, representa a função de transferência de malha aberta do ramo direto.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s) \cdot G_2(s)}{1 \mp G_1(s) \cdot G_2(s)} \quad (17)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) \quad (18)$$

Os controladores ditos industriais são classificados como: controladores de duas posições (on-off), proporcionais (P), integrais (I), proporcional-integrais (PI), proporcional-derivativos (PD) e proporcional-integral-derivativos (PID).

Segundo OGATA (2010), deve ser escolhido o tipo mais adequado de controlador para ser utilizada, com base da natureza e nas condições de operação, adicionando algumas considerações como segurança, custo, disponibilidade, confiabilidade, exatidão, peso e tamanho. Um dos controladores mais utilizados em processos industriais é o chamado de PID, onde são combinadas as ações de controle proporcional com o integral mais o derivativo, pois essa combinação possui grandes vantagens individuais para cada ação. Esta técnica consiste em calcular um valor de ação em um processo a partir das informações do valor desejado e do

valor atual da variável de processo. A Equação 19 representa um controlador com as ações combinadas correspondentes ao controlador PID e na Figura 6 ilustra-se o diagrama de blocos do controlador PID genérico.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (19)$$

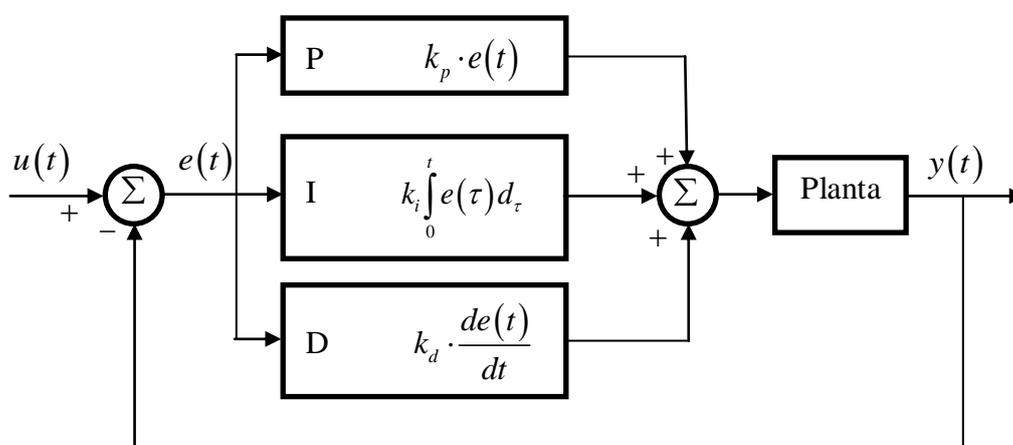


Figura 6 - Controlador PID Genérico.

A definição dos parâmetros das ações combinadas do controlador PID indicadas na Equação 19, podem ser caracterizadas da seguinte forma:

- $k_p$  - o ganho proporcional, pois quando  $k_p$  diminui, o tempo de resposta reduz, mas o sistema torna-se mais instável, o qual amplia a oscilação e o sobressinal.
- $k_i$  - o ganho integral, quando  $k_i$  aumenta, o tempo de resposta reduz, logo o sistema torna-se mais instável, ampliado à oscilação e o sobressinal.
- $k_d$  - o ganho derivativo, quando  $k_d$  diminui, o tempo de resposta reduz, logo o sistema torna-se mais instável, ampliado o sobressinal.
- $e(t)$  - erro em função de tempo  $t$ .
- $e(\tau)$  - erro em função de tempo de integração  $\tau$ .

### 3.4 SISTEMA DE CONTROLE FUZZY

#### 3.4.1 Introdução a Lógica Fuzzy

A lógica Fuzzy foi desenvolvida primeiramente na década de 20 por Jan Lukasiewicz em que a técnica foi introduzida pelos conjuntos com graus de pertinência, o qual se associava aos conceitos desenvolvidos por Aristóteles em relação à lógica nebulosa. O estudo em desenvolvimento deu condições necessárias para o professor de Ciências da Computação da Universidade da Califórnia, nos anos 60, Lofti Asker Zadeh, ter sido o primeiro autor em uma publicação sobre lógica Fuzzy (RIGUEL, *et al* 2011).

Zadeh observou que as características e as simulações de várias regras presentes no cotidiano da população, nas atividades industriais, biológica ou química seriam muito difíceis de compreender no uso das técnicas convencionais da época. Mais tarde os sistemas nebulosos (Fuzzy) foram aperfeiçoados e implementados, como por exemplo, em um controle de máquina a vapor nos anos 70 pelo professor Mamdani, em Londres na *Queen Mary College*. No entanto, não se havia conseguido automatizar tais máquinas com alguma técnica de controle, nem mesmo com o algoritmo PID (VILLE *et al*, 2007).

A maior parte do estudo dessa dissertação, na fundamentação teórica no sistema de controle Fuzzy, teve como base a literatura de SIMÕES e SHAW (2007), e se complementa em outros autores de fundamental importância.

As características na forma de pensar do ser humano, que são imprecisas, ambíguas, e muitas vezes incompleta em diversas informações, já as máquinas não conseguem expressar as características, como expressões verbais humanas, pois as máquinas apenas processam as informações de dados a elas introduzidas, de forma exata através da linguagem bivalente: 0 ou 1. Há uma diferença entre a lógica tradicional, booleana e a lógica nebulosa, em que a lógica booleana identifica apenas os resultados do tipo, pertence ou não pertence ao conjunto, ou é falsa ou verdadeira, já a lógica nebulosa tem a condição de apresentar parcialmente de um elemento, um grau de possibilidade existente entre valores no intervalo de números reais [0,1].

De acordo com a teoria dos conjuntos, sendo  $x$  um elemento pertencente a um conjunto  $A$ , é representado por  $x \in A$ .

Desta forma é indicada simbolicamente pela função de pertinência  $\mu_A(x)$  (SIMÕES e SHAW, 2007). Na lógica booleana,  $\mu_A(x)$  é uma função bivalente, em que o valor indica se o elemento  $x$  pertence ou não ao conjunto  $A$ .

$$\mu_A(x) = 1 \text{ se } x \in A$$

$$\mu_A(x) = 0 \text{ se } x \notin A$$

Na lógica Fuzzy, a função de pertinência  $\mu_A(x)$  estar presente em cada elemento  $x$ , pertencente ao conjunto  $A$ , compreendendo dentro do intervalo  $[0,1]$ , no qual mensura o grau de pertinência  $x$  ao conjunto  $A$  (SIMÕES e SHAW, 2007).

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 < \mu_A(x) \leq 1 \text{ se } x \in A \\ \mu_A(x) = 0 \text{ se } x \notin A \end{array} \right.$$

Segundo NOGUSHI (2004), o valor de pertinência  $\mu_A(x)$  quanto mais se aproxima do valor 1, maior irá ser o grau de pertinência do elemento pertencente ao conjunto  $A$ .

Na Figura 7.a ilustra-se como exemplo os conjuntos de idade de um indivíduo, seguindo a forma conceitual de conjuntos booleano e o outro de Fuzzy em sequência.

Apresentam-se na abordagem booleana as mudanças entre os conjuntos *Jovem* e *Adulto*, e entre os conjuntos *Adulto* e *Idoso*, que são bruscas.

No entanto, uma pessoa que completar 21 anos de idade, em um dia de vida não fará mais parte do conjunto *Jovem*, pois pertencerá ao conjunto *Adulto*.

Observando a Figura 7.b, que implementa a lógica nebulosa, as mudanças são progressivas, no qual uma pessoa de 21 anos de idade deixa de ser 100% *Jovem* e inicia assim, gradualmente, a fazer parte da região dos dois conjuntos *Jovem* e *Adulto*, de acordo com o seu respectivo grau de pertinência (BEZERRA, 2009).

Este grau de pertinência representa a compatibilidade entre a teoria Fuzzy com a lógica de pensamento humano.

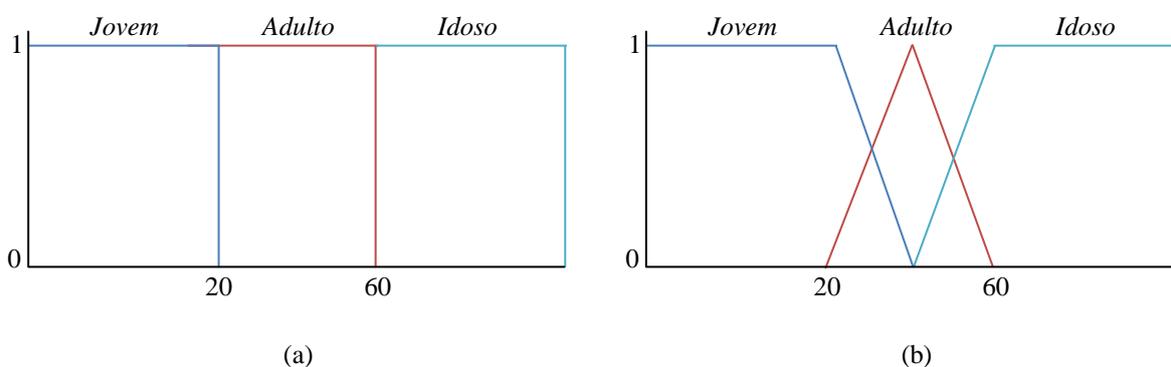


Figura 7 - Conjunto de Idade: (a) Abordagem booleana e (b) Abordagem Fuzzy.

De maneira geral, um conjunto Fuzzy  $A$ , definido no universo de discurso  $U$ , é representado por:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\}$$

onde  $\mu_A(x)$  é a função de pertinência de  $x$  em  $A$  e é definida como o mapeamento de  $U$  no intervalo fechado  $[0,1]$ .

$$\mu_A(x): U \rightarrow [0,1]$$

O universo de discurso  $U$  de uma variável representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais em que ele pode assumir.

Quando há uma variável  $u$  conhecida no universo de discurso  $U$  em que é determinada pelo conjunto de elementos, logo  $T(u)$  com valores definidos no universo  $U$ .

Tem-se então como exemplo, a amplitude de tensão de um sistema oscilatório, o qual pode ser a variável nebulosa, obtendo valores como  *muito baixa, baixa, média, alta, muito alta* (SIMÕES e SHAW, 2007).

Logo se pode dizer que a variável Fuzzy de amplitude de tensão para o caso aqui mencionado, é uma variável linguista, em que se considera  $u$  é a amplitude de um sistema, logo seu conjunto de termos  $T(u)$  deveria ser tal que,

$$T(\text{Amplitude}) = \{\text{muito baixa, baixa, média, alta, muito alta}\}.$$

A variável linguística tem como função principal de dar uma forma sistemática de aproximação de propriedades características de condições complexas ou mal definidas (GONÇALVES, 2007).

São apresentados os valores assumidos pela variável linguística através do conjunto Fuzzy que definem as funções de pertinências (BEZERRA, 2009).

A função numérica gráfica ou tabulada é chamada de função de pertinência que dão valores de pertinência nebulosa para valores discretos de uma variável, podendo assim esses valores assumir várias formas de representação.

As condições principais dessas formas de representação são: do tipo triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal e Fuzzy-tom.

Segundo SIMÕES e SHAW (2007) as funções mais utilizadas para numérica gráfica são as triangulares e as trapezoidais, por serem de mais fácil implementação.

Na Figura 8 ilustra-se um exemplo de funções de pertinência para uma variável chamada Erro.

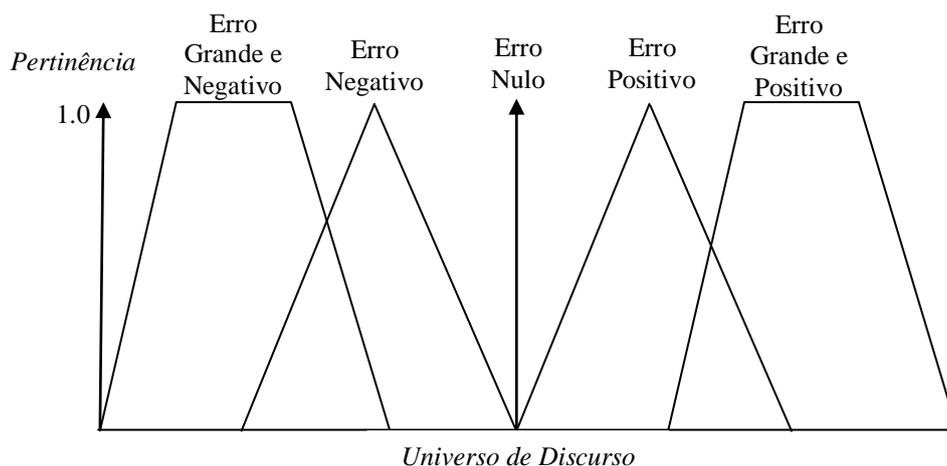


Figura 8 - Funções de Pertinência.

Como exemplo, para um conjunto Fuzzy  $A = \langle \text{baixo} \rangle$ , com universo de discurso  $U = [0,10]$ , alguns valores de uma função de pertinência poderiam ser:

$$\mu_A(0) = \mu_A(0,1) = 1 \text{ (Total pertinência)}$$

$$\mu_A(0,1) = 1$$

$$\mu_A(0,5) = 0,9$$

$$\mu_A(4) = 0,1$$

$$\mu_A(7) = \mu_A(10) = 0 \text{ (Não pertinência)}$$

Segundo BORDON (2004), as técnicas de controle convencionais não são capazes de solucionar problemas reais, de modo que a modelagem matemática para essas técnicas é impraticável.

Para casos de difícil modelagem, os controladores nebulosos são bastante eficientes, pois esses controladores não precisam da modelagem matemática para o processamento, uma

vez que simulação a modelagem conhecida do projetista, por meio dos mecanismos de inferência baseados em regras de controle.

As regras de controle Fuzzy são estabelecidas a partir de um conjunto de condições conhecida como “*Se Então*”, em que a estratégia de ação estabelecida se encontra em consonância ao desempenho do processo, e são compostas por uma base de regra de conhecimento estável, sendo assim possível de se determinar uma relação precisa entre variáveis de entrada e ações de controle (saída).

O controlador Fuzzy é constituído basicamente por três etapas de controle, que são:

- Fuzzificação;
- Inferência Fuzzy;
- Defuzzificação.

### **3.4.2 Fuzzificação**

A fuzzificação é a transformação das variáveis de entrada, no domínio de números reais para o domínio nebuloso, pois nesta etapa são atribuídos valores linguísticos, para com os graus de pertinência 0 e 1, aos sinais de entrada.

A sua composição é feita entre os dados de entrada e os seus termos linguísticos, é a etapa mais crítica na elaboração de um modelo Fuzzy, pois a um cuidado especial na escolha que deve ser a mais adequada para o tipo de função para cada conjunto Fuzzy.

### **3.4.3 Inferência Fuzzy**

A inferência Fuzzy é a etapa de operação para com os conjuntos Fuzzy. É nesta etapa que acontece o mapeamento de conjunto Fuzzy, além de determinar a maneira de como as regras de controle serão iniciadas e combinadas por meio das condicionais “*SE Então*” (XAVIER, 2008).

Há dois tipos de modelos clássicos para a inferência Fuzzy: Mamdani (MAMDANI E ASSILAN, 1974), em que este modelo foi adotado para o estudo dessa dissertação, e Takagi-Sugeno (TAKAGI E SUGENO, 1985), pois a diferença entre eles se encontram na maneira de apresentar o tipo de informação de inferência Fuzzy.

Os métodos linguísticos de Mamdani são baseados no uso de regras estreitamente linguística, em que se utiliza a linguagem natural para descrever o comportamento dos sistemas em estudo, que mostra como característica básica de tanto os seus antecedentes como os consequentes serão mapeados por conjuntos linguísticos.

Havendo mais de uma variável de entrada, para cada regra de controle, faz-se necessário introduzir uma técnica de agregação dos conjuntos antecedentes, para que se possa ser gerado um conjunto consequente.

A maneira de como uma variável de entrada no controlador Fuzzy baseados em regras se relaciona com os conjuntos Fuzzy são:

*Se <antecedente> Então <consequente>*

*Se amplitude = <pequeno> Então tensão = <aumente pouco>*

O método de inferência conhecido como MAX-MIN é a mais usual na composição dos vários conjuntos Fuzzy de entrada para cada regra correspondente.

O MIN implica em um conectivo "E", chamado de operação de agregação, que resulta na interseção Fuzzy dos termos de entrada, e o MAX em um conectivo "OU", chamado de operação de composição, em que resulta na união dos termos de saída.

No entanto, cada sentença "Se E Então" é modelada pela a implementação MIN e as relações entre as regras são modeladas pela a implementação MAX (MENDOÇA, 2008).

Na Figura 9 ilustra-se um exemplo representativo de cálculo do valor discreto (*crisp*) da saída de um controlador nebuloso com cinco regras (MAX-MIN). Na ilustração a seguir, observa-se o cálculo da saída discreta de um controlador Fuzzy em relação as duas entradas e a saída controlada.

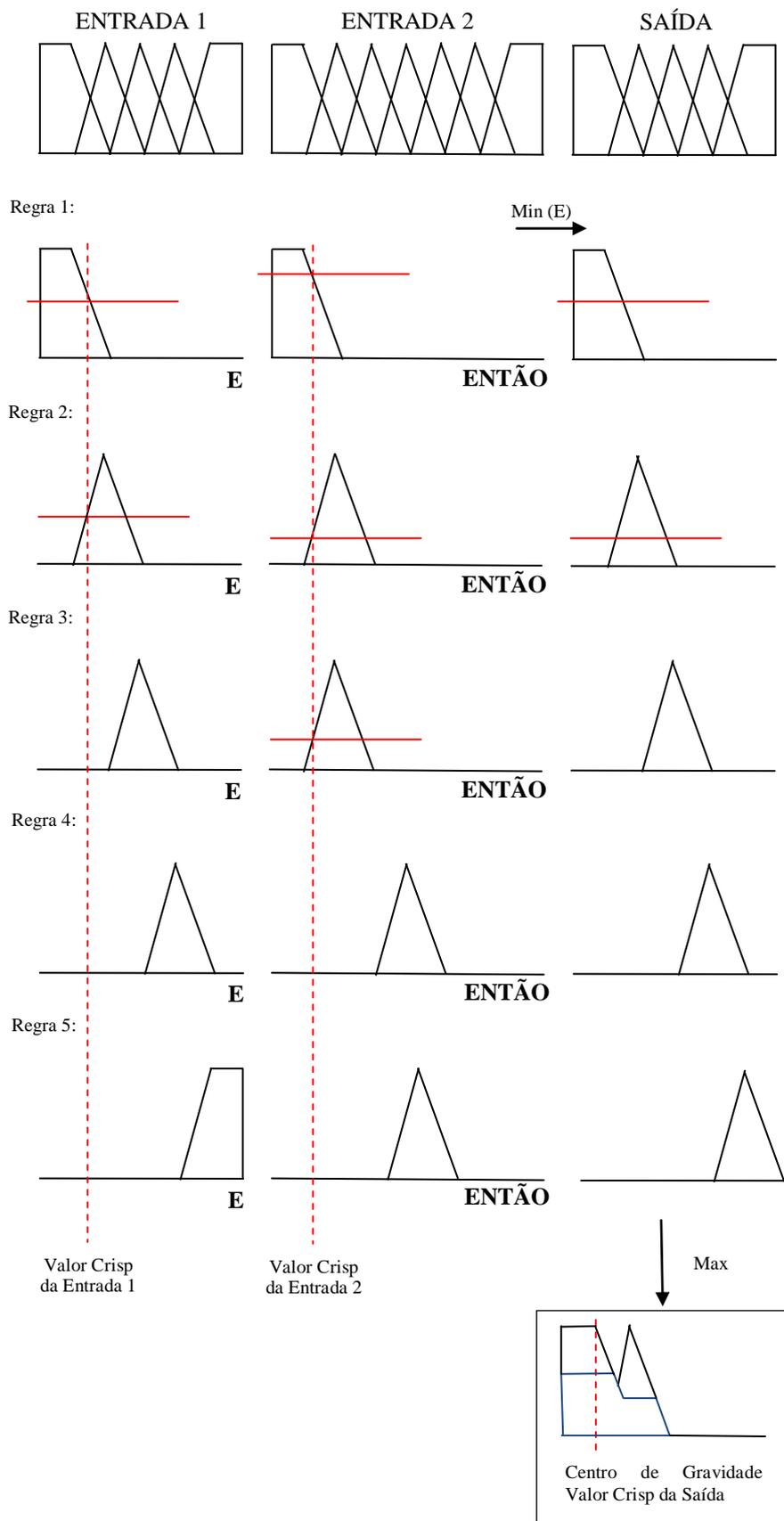


Figura 9 - Exemplo de Cálculo da Saída Discreta de um Controlador Fuzzy.

### 3.4.4 Defuzzificação

Na defuzzificação é associada ao valor da variável linguística de saída, implementadas por meio das regras Fuzzy, em que é interpretado em um valor discreto, com o objetivo de se ter um único valor discreto mais representativo para os valores Fuzzy implementados da variável de saída.

Logo a defuzzificação é uma maneira de modificar inversamente, na interpretação a saída do domínio Fuzzy para o domínio discreto.

Os principais métodos de defuzzificação são: Centro-de-Área (C-o-A), Centro-do-Máximo (C-o-M) e a Média-do-Máximo (M-o-M), um deles podem ser o método selecionado mais adequado para a defuzzificação, pois elas baseiam-se no centroide ou nos valores máximos que acontecem na função de pertinência resultante.

O método Centro-da-Área (C-o-A) apresentada na Figura 10 calcula a saída discreta  $x$  através do cálculo do centroide da área composta pelo termo de saída Fuzzy, em que a centroide é a referência que divide a área de saída Fuzzy em duas partes iguais, resultando numa união de todas as contribuições de regras.

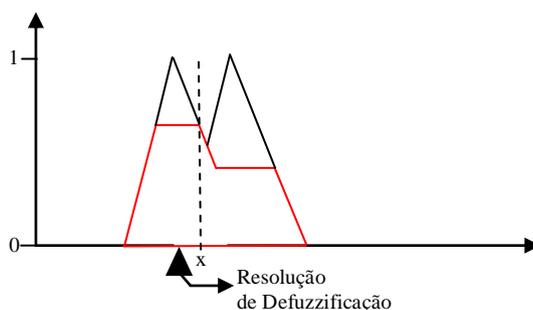


Figura 10 - Defuzzificação pelo Método (C-o-A).

O método Centro-do-Máximo (C-o-M), ilustrado na Figura 11, representam os picos das funções de pertinência no universo de discurso da variável de saída, onde as áreas das funções de pertinência são rejeitadas e apenas os máximos são utilizados. Observam-se os

valores diferentes de zero das funções de pertinência de saída que são localizados na posição indicada nos picos representados por setas de cor vermelha.

Para esse caso, a saída discreta  $x$  ilustrada na Figura 11 é o ponto de apoio de equilíbrio para o valor de saída defuzzificado.

Conclui-se então que o valor defuzzificado é calculado como uma média ponderada dos máximos valores, cujos valores são resultados da inferência Fuzzy (SIMÕES e SHAW, 2007).

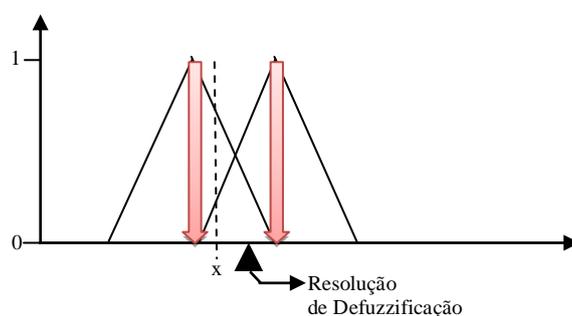


Figura 11 - Defuzzificação pelo Método (C-o-M).

Segundo XAVIER (2008), a respeito da defuzzificação através do método Média-do-Máximo (M-o-M), a saída desejada é obtida através do cálculo da média entre dois elementos pertencentes ao universo de discursos, resultando assim aos maiores valores da função de pertinência.

## CAPÍTULO IV

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo foram abordadas inicialmente as características dinâmicas do mecanismo de excitação para com os dados de entrada e saída de vibração.

Em seguida serão apresentados todos os componentes que auxiliaram na busca de dados para o controle da faixa desejada, tais como o próprio excitador eletromagnético (Mini-Shaker da *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> 4810), o acelerômetro piezoelétrico da *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> modelo 4370, um dinamômetro de 10 N para efetuar carga no sistema vibratório, um amplificador de sinal de áudio para autos, *STETSOM*<sup>®</sup> modelo TH 2030, uma fonte de alimentação *Agilent*<sup>®</sup> CC modelo E3648A, uma placa de aquisição de dados *NI-DAQ USB 6212*, fabricada pela *National Instruments*<sup>®</sup>, conectada ao computador AMD Athlon II X3 455, em que há os programas nele instalados, o LabVIEW<sup>™</sup> e o MATLAB<sup>®</sup>, o primeiro para a implementação do controlador Fuzzy e o segundo para construção de gráficos a serem analisados.

#### 4.2 BANCADA DE EXPERIMENTOS

A fim de se obter as características dinâmicas de uma determinada estrutura, busca-se conhecer a resposta da mesma a entradas específicas. Há inúmeras técnicas de excitação dependendo das exigências para um determinado tipo de teste. Para tanto, vários mecanismos

de excitação estão disponíveis comercialmente com as funções e características dirigidas a cada necessidade.

A bancada de instrumentação, organizada no laboratório do LINC que fica localizada no centro de tecnologia da UFPB, que é composta por uma mesa rígida, sobre ela há um computador desktop, um amplificador de alta potência, um oscilador eletromagnético (conhecido na literatura como Mini-Shaker), um acelerômetro piezoelétrico Bruel&Kjaer, um dinamômetro de 10 N, um amplificador de sinal de áudio para autos, uma fonte de alimentação CC *Agilent*<sup>®</sup> E3848A, uma placa de aquisição de dados NI-DAQ USB 6212, fabricada pela *National Instruments*<sup>®</sup>, conectada ao computador AMD *Athlon* II X3 455.

Na Figura 12 ilustra-se a bancada montada com todos os seus componentes necessários para a aquisição de dados que serão importantes para o controle.

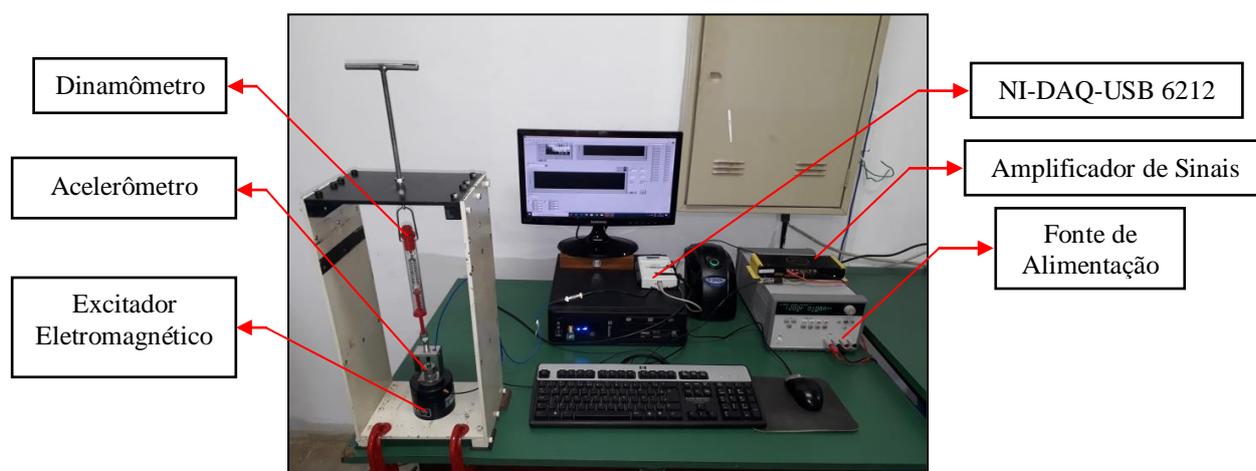


Figura 12 - Bancada Instrumental.

Foi montada a bancada de instrumentação para adquirir os dados experimentais necessários para o sistema de controle.

Todos os dispositivos elétricos e eletrônicos da bancada foram alimentados pela fonte de energia de tensão com limite de 12 V. Lembrando que há um estabilizador de energia que tem a função de proteger os aparelhos eletrônicos das variações de tensão que recebe da rede elétrica. A planta construída em programação LabVIEW<sup>TM</sup> para o controle do sistema é explicada no capítulo VI.

Na Figura 13 ilustra-se o diagrama de blocos da bancada instrumental. Pela programação em LabVIEW™, aplica-se um valor de tensão de 1 volt de referência para a placa de aquisição de dados *NI-DAQ USB 6212*, em seguida a tensão é enviada para o amplificador de sinais, pela porta analógica de saída AO1, o amplificador recebe o sinal, em uma menor intensidade de energia de tensão e aumenta esta intensidade de energia, elevando assim o nível de tensão que alimenta o excitador eletromagnético, então o excitador produz as vibrações para serem analisadas e controladas pelo sistema de controle Fuzzy.

O acelerômetro capta e mede todas as vibrações exercidas pelo excitador eletromagnético, logo as oscilações captadas são enviadas para a interface *NI-DAQ USB 6212* pela porta analógica de entrada AI0, em que os sinais são convertidos de sinais digitais e, em seguida, para o controle do sinal por intermédio do programa computacional LabVIEW™, em que realimenta o sistema pela porta analógica de saída AO1, retorna-se assim todo o ciclo do sistema de aquisição de dados.

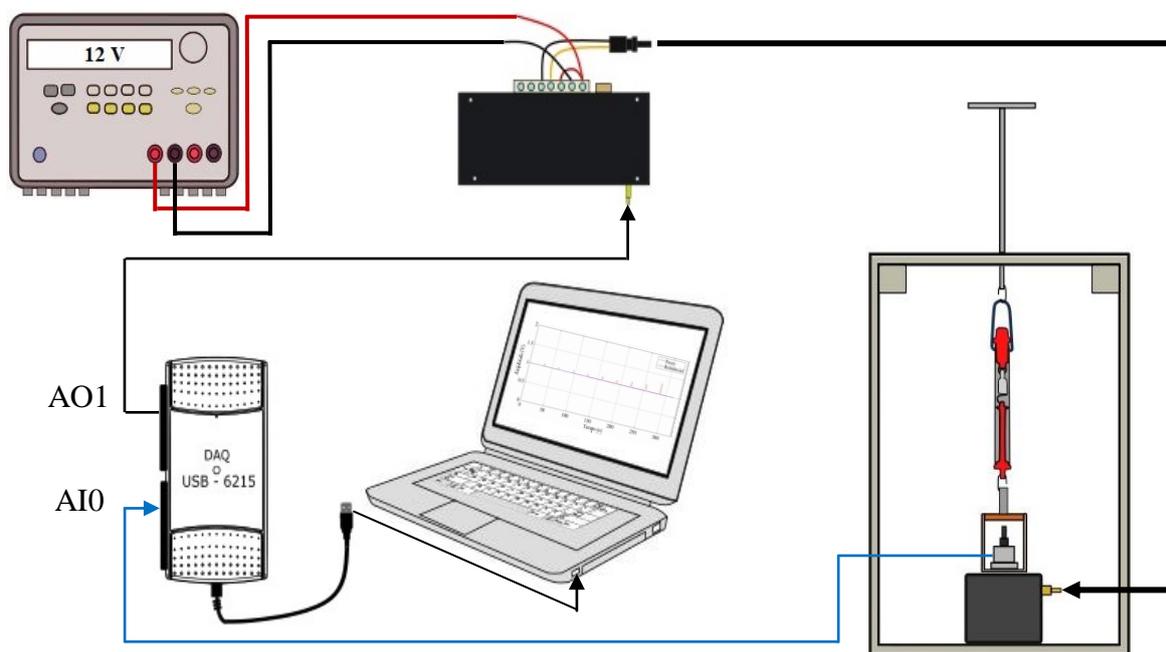


Figura 13 - Diagrama de Blocos da Bancada Instrumental.

### 4.3 EXCITADOR ELETROMAGNÉTICO

Um dos principais mecanismos de excitação, em se tratando de testes ou ensaios de vibração, trata-se do excitador eletromagnético.

Apresenta-se em uma vasta gama de configurações, podendo encontrar desde pequenos excitadores que fornecem menos de 0,5 N numa faixa de frequência de praticamente 0 a 10 kHz, até excitadores que fornecem 200 kN numa faixa mais reduzida que vai de aproximadamente 0 a 3 kHz (McCONNELL, 1995).

O excitador eletromagnético é um dispositivo capaz de produzir vibração mecânica o qual possui diversas aplicações, em especial nas Engenharias. No estudo desta dissertação foi implementado o *Mini-Shaker da Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> modelo 4810 com um ímã de campo permanente. A estrutura básica do *Mini-Shaker da Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> pode ser vista na Figura 14.



Figura 14 - Mini-Shaker da *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> Modelo 4810.

O atuador é empregado como gerador de força em testes gerais de vibração, medições de impedância e mobilidade mecânicas e análise modal experimental em que apenas níveis de força menores são necessários, também podem ser usados na calibração de transdutores de vibração, tanto para determinar sua sensibilidade, em comparação com um acelerômetro padrão quanto com sua resposta de frequência de até 18 kHz. Esse atuador de vibração é composto por molas radiais de flexão que restringem o elemento móvel ao movimento quase perfeitamente retilíneo. As Molas de flexão laminadas fornecem um alto grau de amortecimento para minimizar a distorção devido a ressonâncias de flexão

(*Bruel&Kjaer*<sup>®</sup>, 2019). O *Mini-Shaker* deve ser fixado a uma base estrutural por meio de um parafuso UNF 10–32, pois normalmente é o tamanho da rosca comumente utilizado para montar acelerômetros, na Figura 15 ilustra-se a fixação do *Mini-Shaker* na estrutura de bancada.

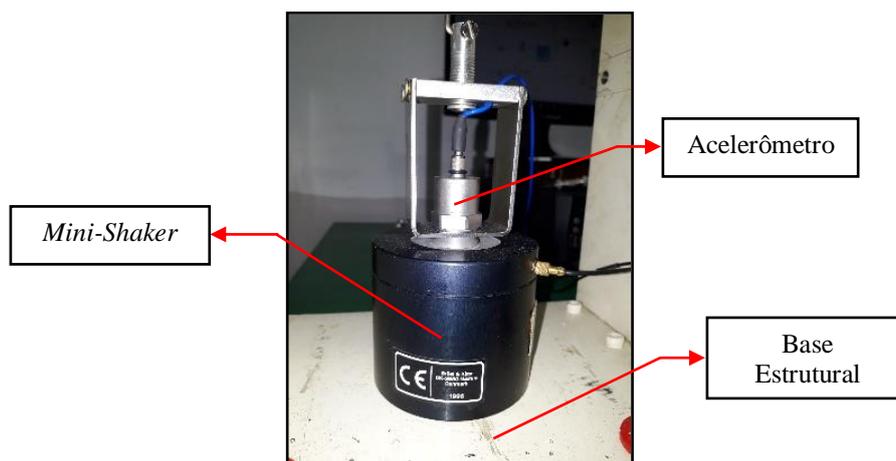


Figura 15 - Fixação do Mini-Shaker na Estrutura de Bancada.

Segundo *BRUEL&KJAER*<sup>®</sup> (2019), os limites de desempenho definidos pelo deslocamento máximo (4 mm), força máxima (10 N ou 7 N, dependendo da frequência) e a primeira ressonância axial do elemento móvel (acima de 18 kHz).

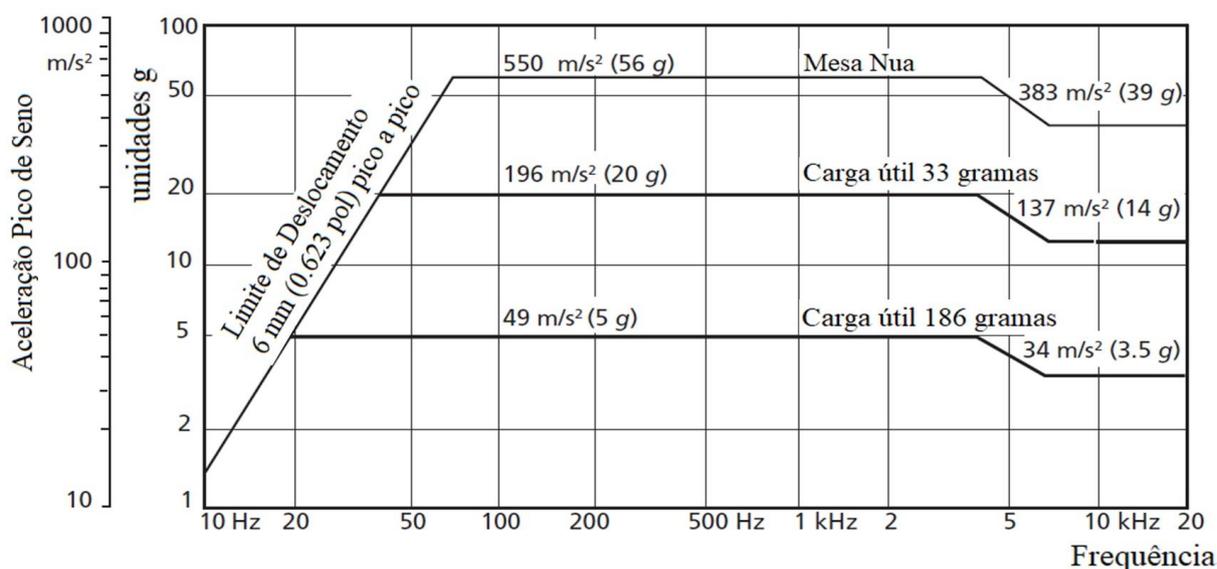


Figura 16 - Curva de Desempenho Senoidal para o *Mini-Shaker Bruel&Kjaer*<sup>®</sup>.

RAO (2008) divide a interação entre excitador e estrutura em duas parcelas, a mecânica e a eletrodinâmica. A interação mecânica depende basicamente da massa da armadura e do fator de amortecimento modal da estrutura.

A interação eletrodinâmica depende de dois outros fatores: rigidez e amortecimento eletromagnéticos.

Em resumo, segundo RAO (2008), estruturas leves requerem armaduras mais pesadas enquanto estruturas engastadas, armaduras mais leves.

A partir do gráfico da curva de desempenho senoidal para o Mini-Shaker *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> modelo 4810 (Figura 16) é possível extrair os seguintes pontos de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 - Desempenho Senoidal do Mini-Shaker da *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup>.

<b>Carga (gramas)</b>	<b>Aceleração (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Equação da Gravidade</b>
<b>0</b>	550	= 56 g
<b>33</b>	196	= 20 g
<b>186</b>	49	= 5 g

Nota-se que o sistema possui um decaimento exponencial que pode ser descrito pela Equação 20:

$$a = a_0 \cdot e^{-\left(\frac{c}{a}\right)^\beta} \quad (20)$$

Nota-se que, as letras  $a$  e  $a_0$  representam o comportamento para cada aceleração do excitador eletromagnético mostrados em sua curva de desempenho senoidal. A letra  $a$ , representa a aceleração final, e letra  $a_0$ , representa a aceleração inicial, com suas respectivas

cargas em gramas, representadas pela letra  $c$ , além da representação das constantes  $\alpha$  e  $\beta$ . Transportando para um sistema de equações, tem-se que:

$$\left\{ \begin{array}{l} 550 = a_0 \cdot e^{-\left(\frac{0}{\alpha}\right)^\beta} \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 196 = a_0 \cdot e^{-\left(\frac{33}{\alpha}\right)^\beta} \end{array} \right. \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 49 = a_0 \cdot e^{-\left(\frac{186}{\alpha}\right)^\beta} \end{array} \right. \quad (23)$$

Sabe-se que pela Equação 21, chega-se ao resultado de  $a_0 = 550 \text{ m/s}^2$ , e calculando a Equação 22:

$$196 = 550 \cdot e^{-\left(\frac{33}{\alpha}\right)^\beta}$$

$$\alpha^\beta \cong \frac{33^\beta}{1,032} \quad (24)$$

Da Equação 23 associado à Equação 24, obtém-se o valor da constante  $\beta$ , logo tem se que:

$$49 = 550 \cdot e^{-\left(\frac{186}{\alpha}\right)^\beta}$$

$$\beta \cong 0,4923 \quad (25)$$

Substituindo a Equação 25 na Equação 24, obtém-se o valor da constante  $\alpha$ , então:

$$\alpha^\beta \cong \frac{33^\beta}{1,032}$$

$$\alpha \cong \frac{33}{1,032^{\frac{1}{0,4923}}}$$

$$\alpha \cong 30,9547 \tag{26}$$

Logo, o oscilador eletromagnético utilizado apresentará uma relação entre a aceleração, carga e tensão de alimentação aproximada pela Equação 27:

$$a = 550 \cdot e^{-\left(\frac{c}{30,9547}\right)^{0,4923}} \tag{27}$$

Diante do exposto, a função de transferência do oscilador eletromagnético, da relação aceleração  $a$  e da tensão  $V$ , dado por:

$$H = \frac{a}{V} \left[ \frac{m}{V \cdot s^2} \right] \tag{28}$$

A unidade da Equação 28 é representada em colchetes, onde se lê metros por volt segundo ao quadrado.

A Equação 28 ainda pode ser reescrito da seguinte forma:

$$H = \frac{550 \cdot e^{-\left(\frac{c}{30,9547}\right)^{0,4923}}}{i_{RMS} \cdot Z_c \cdot \sqrt{2}} \quad (29)$$

Em que:  $i_{RMS}$  representa a corrente RMS máxima do oscilador e  $Z_c$  a impedância da bobina medida em ohms  $\Omega$ . A constante  $\sqrt{2}$  representa à conversão do valor RMS em valor de pico.

Neste sentido, a aceleração do oscilador eletromagnético em função da carga e tensão de entrada é dada por:

$$a = \frac{550 \cdot V \cdot e^{-\left(\frac{c}{30,9547}\right)^{0,4923}}}{i_{RMS} \cdot Z_c \cdot \sqrt{2}} \quad (30)$$

Segundo o manual do Mini-Shaker da *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> 4810, a máxima corrente de entrada é de 1,8 A<sub>RMS</sub> e que a impedância da bobina é de 3,5  $\Omega$  a 500 Hz.

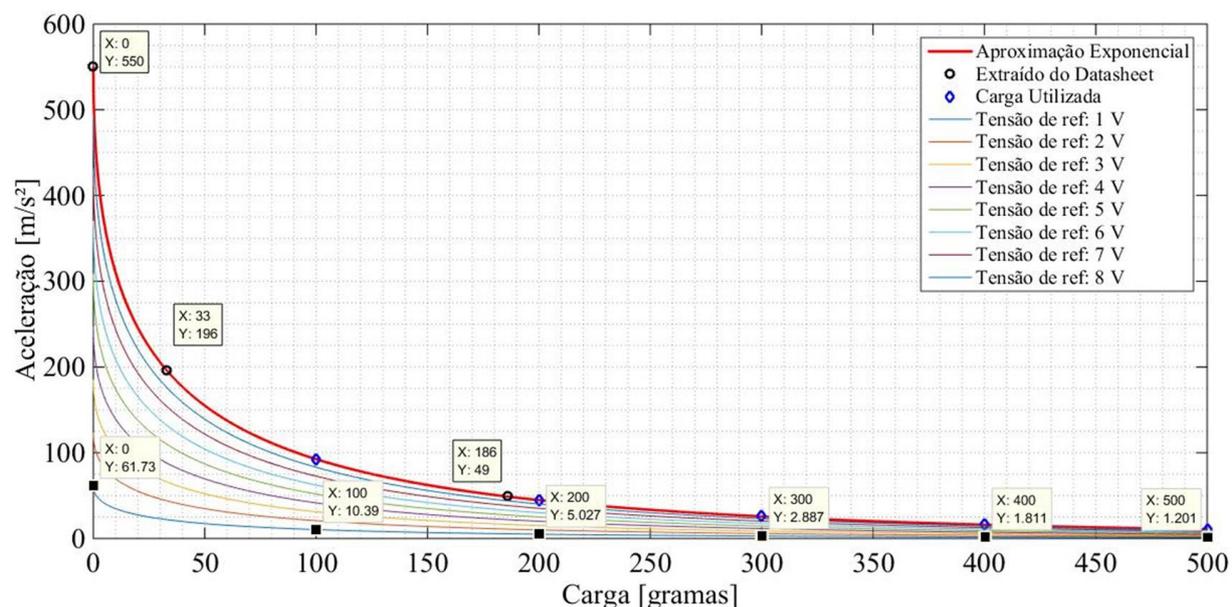
Na Figura 17 ilustra-se o gráfico do comportamento da relação entre os parâmetros de tensão, aceleração e carga.

O eixo das abscissas representa as cargas em gramas, o eixo das ordenadas representa as acelerações em metros por segundo ao quadrado, e as curvas representam cada tensão em volt.

A curva vermelha indica a tensão máxima de 8,91 volts do excitador eletromagnético (Mini-Shaker da *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup>), nessa curva há três pontos coordenados, extraídos do gráfico da curva de desempenho senoidal, segundo o manual. O primeiro ponto com zero de carga, ou seja, mesa nua para uma aceleração de 550 m/s<sup>2</sup>, o segundo ponto com 33 gramas equivale à

aceleração de 196 m/s<sup>2</sup>, e o terceiro ponto com 186 gramas equivale à aceleração de 49 metros por segundo ao quadrado.

Nota-se que, quanto mais carga introduzida no sensor de vibração menor será sua aceleração.



**Figura 17 – Aceleração em Função da Carga.**

Observa-se que na curva de referência de 1 volt são indicados seis pontos coordenados: no primeiro ponto com zero de carga equivale à aceleração de 81,730 m/s<sup>2</sup>.

No segundo ponto há uma carga de 100 gramas que equivale à aceleração de 10,390 m/s<sup>2</sup>, no terceiro ponto com 200 gramas que equivale à aceleração de 5,027 m/s<sup>2</sup>, no quarto ponto com 300 gramas que equivale à aceleração de 2,887 m/s<sup>2</sup>, no quinto ponto com 400 gramas que equivale a 1,811 m/s<sup>2</sup> e o sexto ponto com carga de 500 gramas que equivale à aceleração de 1,201 m/s<sup>2</sup>.

Portanto, na Figura 17 ilustra-se todos os pontos coordenados em sua tensão máxima, segundo o manual do próprio excitador eletromagnético, tendo assim como base para as demais tensões experimentais, que por meio do método de decaimento exponencial, pode ter exatamente as conversões de tensões para aceleração em metros por segundo ao quadrado.

### 3.4 ACELERÔMETRO PIEZOELÉTRICO

O acelerômetro é um instrumento que mede a aceleração de um corpo vibratório (RAO, 2008).

Na Figura 18 ilustra-se um acelerômetro piezoelétrico, do fabricante *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> modelo 4370, o qual foi utilizado no conjunto da bancada dessa dissertação.



Figura 18 - Acelerômetro Piezoelétrico *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> 4370.

O mesmo é considerado como atuador que se tornam eletricamente polarizado quando uma força é aplicada.

Essa força cria um dipolo elétrico e a magnitude desse efeito é proporcional à força aplicada. Esse efeito é conhecido como piezoeletricidade.

A expressão piezo é uma derivação do grego que indica pressionar, logo, piezoeletricidade é a geração de eletricidade através de uma pressão mecânica (SANTOS, 2008).

Durante a vibração, os elementos piezoelétricos produzem uma carga que é coletada entre o alojamento e o anel de aperto.

O elemento piezoelétrico usado é um elemento de titanato de zirconato de chumbo PZ 23 e o material da caixa é de aço inoxidável (*BRUEL&KJAER*<sup>®</sup>, 2019).

Na Figura 19 ilustra-se o esquema do atuador acelerômetro *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> 4370 usado para ler os sinais de vibração oriundos do excitador eletromagnético (*Mini-Shaker*) a ser controlada.

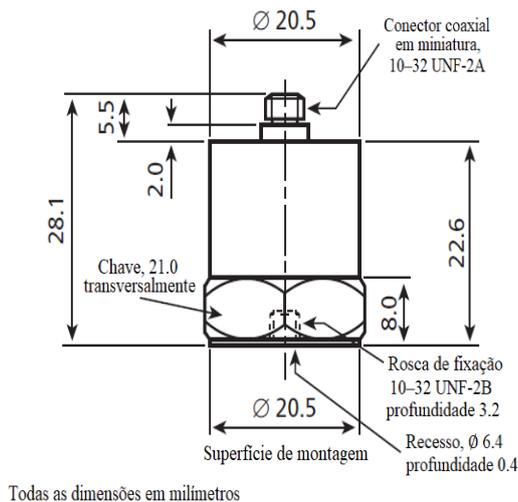


Figura 19 - Esquema do Atuador Acelerômetro *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> 4370.

Em termo de calibração, a sensibilidade individual medida está dentro de  $\pm 2\%$  da sensibilidade especificada, por exemplo, a sensibilidade é calibrada para um valor conveniente, como 1, 3.16 ou  $31.6 \text{ pC/ms}^{-2}$  (*BRUEL&KJAER*<sup>®</sup>, 2019).

Na Figura 20 ilustra-se o gráfico das curvas de resposta por frequência para o acelerômetro tipo 4370.

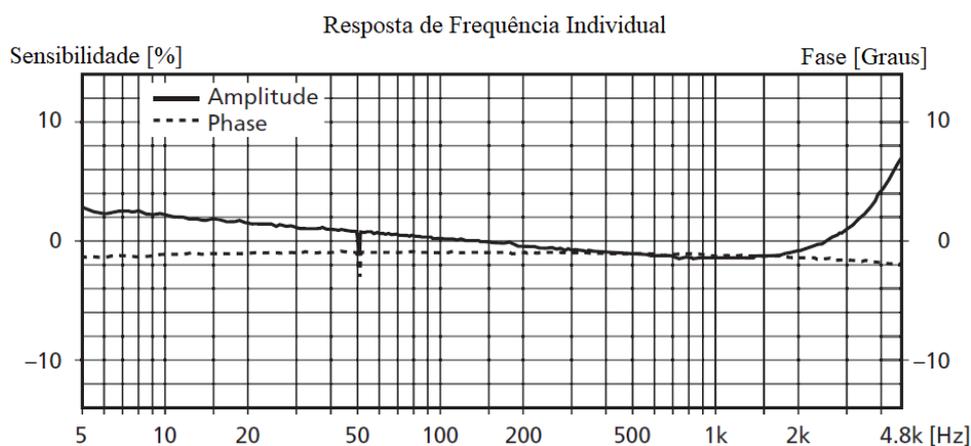


Figura 20 - Curvas de Resposta em Frequência para Acelerômetro *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> 4370.

#### 4.4 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS NI-DAQ USB 1262

O processo de aquisição de dados (*DAQ*) é responsável pela medição de um fenômeno elétrico ou físico, como tensão, corrente, temperatura, pressão ou som, com o auxílio e um microcomputador.

O sistema *DAQ* é constituído por sensores, hardware de aquisição e medição de dados e um microcomputador com uma plataforma de programação (LabVIEW™).

Em comparação com os sistemas tradicionais de medição, os sistemas *DAQ* baseados em computadores que exploram a capacidade de processamento, produtividade, sistemas de visualização e recursos de conectividades dos computadores padrão industrial.

Com isso, tem-se uma solução de medição mais potente, flexível e de melhor custo-benefício (NI, 2019).



Figura 21 - Módulo de Aquisição de Dados NI-DAQ USB 1262.

Na Figura 21 ilustra-se o dispositivo USB-6212 que oferecem entradas analógicas, entradas digitais, saídas digitais e 2 contadores de 32 bits, possui também um amplificador integrado, projetado para proporcionar uma rápida estabilização em altas taxas de varredura (NI, 2019).

Os sinais oriundos do acelerômetro piezoelétrico *Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> 4370 são coletados e enviados à placa de aquisição de dados *NI-DAQ USB 6212*, por intermédio da porta analógica de entrada AI0, em que tais sinais são convertidos em sinais digitais em binário e, em seguida, para codificação decimal por meio do programa computacional *LabVIEW*<sup>™</sup>, que em seguida realimenta o sistema pela porta analógica de saída AO1. Na Figura 22 ilustra-se as portas analógicas de entradas e de saídas do dispositivo *DAQ USB 1262* para o condicionamento de sinais da planta em estudo.



Figura 22 - Porta de Entrada e Saída NI-DAQ USB 1262.

#### 4.5 DISPOSITIVO DINAMÔMETRO

Para medir a carga no sistema de vibração, usou-se um dinamômetro, dispositivo este que permite medir forças exercidas no sistema de vibração. Na Figura 23 ilustra-se o dispositivo dinamômetro usado na bancada de estudo.



Figura 23 - Instrumento Dinamômetro.

O dinamômetro é constituído por um cilindro e um conjunto haste e mola, externamente no cilindro possui as graduações gravadas em força (Newton), variando de zero a 10 N, e também em gramas, variando de zero a 1000 g, com resolução de 0,1 respectivamente. Lembrando que para este dispositivo fisicamente a aceleração gravitacional é considerada de  $10 \text{ m/s}^2$ .

Em uma das suas extremidades, o aparelho possui um gancho que está acoplado numa estrutura de aço localiza entre o excitador eletromagnético e o acelerômetro, já na outra extremidade está acoplado a um eixo sem fim rosqueado, pois o sem fim rosqueado serve para aumentar ou diminuir a carga no sistema de vibração a ser controlado pelo sistema nebuloso.

Devido ao passo da rosca do sem fim, quando se dá uma volta completa manualmente, no sentido anti-horário, equivale então a um aumento de 20 g de carga no sistema.

Localizado entre o eixo sem fim rosqueado e a estrutura metálica de acoplamento, a estrutura de acoplamento metálica se localiza entre o sensor acelerômetro e o transdutor de vibração que se encontra fixado na estrutura de aço da bancada.

Na Figura 24 ilustra-se o sistema de carga com o instrumento dinamômetro que é responsável por medir as variações de cargas.

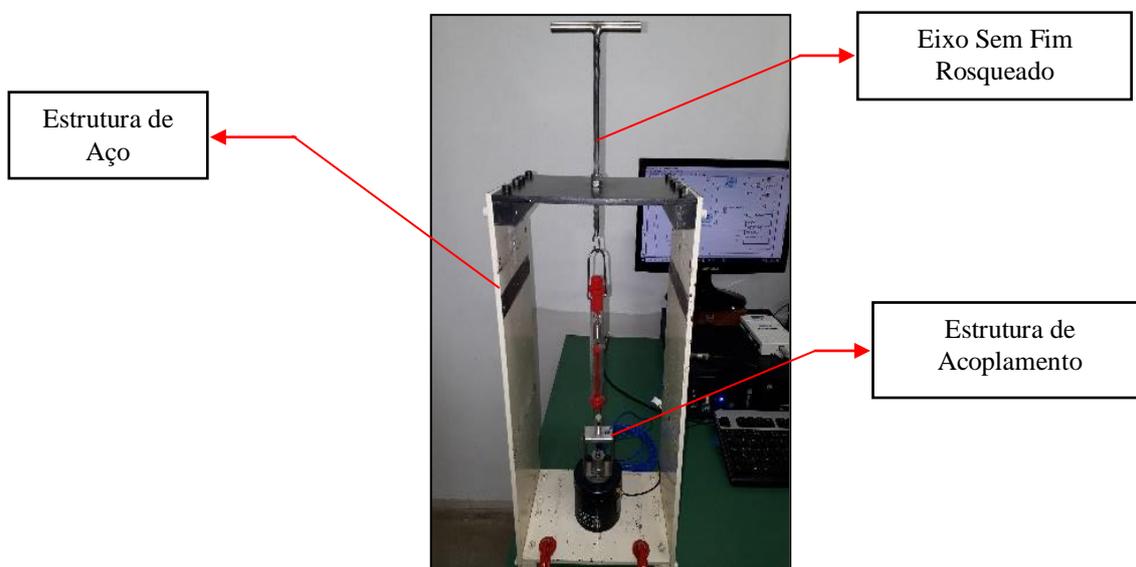


Figura 24 - Sistema de Carga com Dinamômetro.

#### 4.6 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

A fonte de alimentação utilizada na bancada foi da *Agilent*<sup>®</sup> modelo E3848A de corrente contínua, sendo esta adequada para a alimentação dos dispositivos elétricos e eletrônicos do sistema. Esta fonte tem como objetivo transformar a energia elétrica da rede na forma de corrente alternada (CA) para a energia elétrica de corrente contínua (CC) especificada, alimentando assim os equipamentos elétricos e eletrônicos da bancada experimental. Na Figura 25 ilustra-se a fonte de alimentação *Agilent*<sup>®</sup> CC E3848A utilizado na bancada de estudo.



Figura 25 - Fonte de Alimentação *Agilent*<sup>®</sup> DC E3848A.

#### 4.7 AMPLIFICADOR DE SINAIS

O amplificador de sinais é um equipamento que recebe quantidades menores de energia e aumenta esta quantidade de energia, ou seja, eleva os níveis de tensão dos sinais para o sistema. Na Figura 26 ilustra-se o equipamento amplificador de sinal *STETSOM*<sup>®</sup> TH 2030 utilizado na bancada de estudo.



Figura 26 - Amplificador de Sinal *STETSOM*<sup>®</sup> TH 2030.

## **CAPÍTULO V**

### **IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE FUZZY**

#### **5.1 INTRODUÇÃO**

É apresentado nesse capítulo a implementação do controlador Fuzzy para o sistema de vibração oriunda do excitador eletromagnético. Na seção 4.2, há um específico comentário sobre o sistema inteligente (lógica nebulosa). Na seção 4.3, mostra toda a montagem para a modelagem dos blocos funcionais do controlador, tais como, a interface de fuzzificação, a interface de defuzzificação e a inferência Fuzzy.

#### **5.2 NOTA SOBRE O SISTEMA INTELIGENTE (LÓGICA FUZZY)**

A lógica nebulosa é uma forma de simular o pensamento humano em um sistema de controle inteligente, o qual possibilita a introdução de um controlador computacional para processos complexos na manipulação de máquinas.

Segundo SIMÕES et al. (2007), um sistema de controle dito inteligente é aquele que introduz a criação de sistemas autônomos que executam complexas tarefas de controle sob todas as condições de operação de um processo ou de uma planta, mesmo na presença de falhas, sem supervisão ou intervenção de operadores externos.

### 5.3 MODELAGEM DO CONTROLADOR FUZZY PARA O SISTEMA

A modelagem do controlador Fuzzy para a análise de vibração em estudo, por meio de um excitador eletromagnético, tem como base pré-determinada as respostas experimentais de vibração medidas pelo sensor acelerômetro para com um regime permanente.

Neste sentido, foi desenvolvido o controlador baseada na sequência apresentada pelos blocos do processo de inferência de um controlador Fuzzy ilustrada na Figura 27.

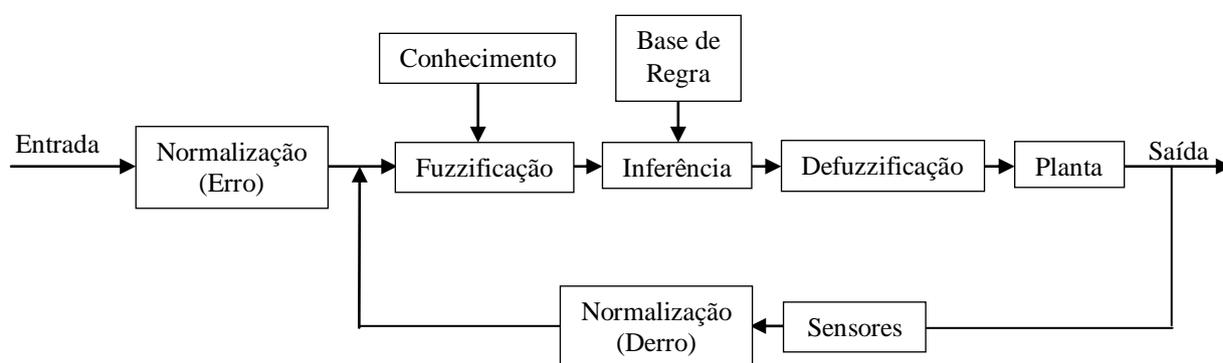


Figura 27 - Diagrama de Blocos do Processo de Inferência de um Controlador Fuzzy.

No controle por lógica nebulosa, as variáveis de entradas e de saída, para com Fuzzy linguísticos, chamados de funções de pertinência, estão entre duas e sete a quantidades de variáveis aceitas na prática, pois quanto maior for o número de variáveis maior será a precisão, tornando a demanda computacional mais significativa (SIMÕES E SHAW, 2007).

Neste artigo o controlador Fuzzy foi projetado mediante as seguintes etapas, em seu desenvolvimento, nos quais são, em termos linguísticos, com variáveis de entrada, inferências e variáveis de controle (Saída).

Com o auxílio do comando "*Fuzzy Logic Toolkit*", que pertencente ao programa LabVIEW™ para a implementação do controlador desejável.

Na Figura 28 ilustra-se a malha fechada para o controlador nebuloso, em que destaca a entrada como referencial ligado ao bloco de controle Fuzzy mais o bloco da planta que produz a saída a ser controlada.



Figura 28 – Malha Fechada para Controlador Fuzzy.

### 5.3.1 Fuzzificação

Na fuzzificação do controlador foram criadas duas variáveis de entrada: o "Erro", que é a diferença entre o valor da tensão de referência e o valor da tensão a ser controlada, e a derivada desse erro representada por "Derro".

A faixa de varredura para o controle foi compreendida entre 100 Hz a 1 kHz, que possui um range de 900 Hz.

Logo o universo de discurso de entrada da variável "Erro" ficou compreendido no intervalo entre -450 Hz a 450 Hz, no eixo horizontal, para uma normalização de 1 V (61,73 m/s<sup>2</sup> sem carga).

Representado no eixo vertical no intervalo de [0,1], pois tais parâmetros nos ensaios experimentais foram os melhores para o controle desta tensão.

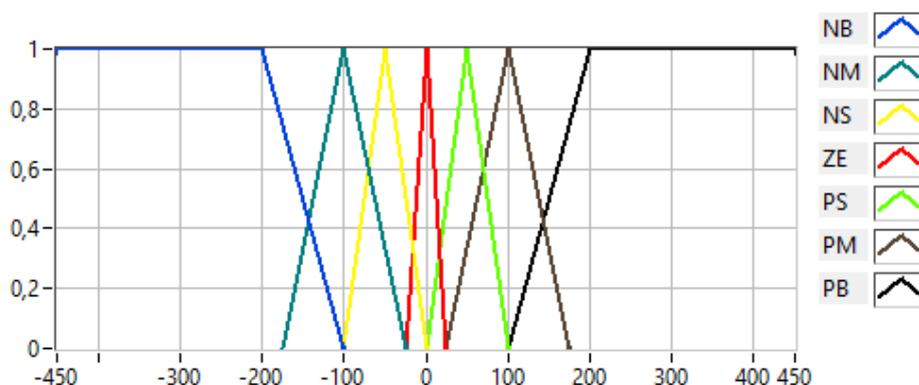


Figura 29 - Funções de Pertinência da Variável de Entrada (Erro).

Na Figura 29 ilustra-se a disposição dos termos linguísticos do "Erro" no universo de discurso, onde as variáveis linguísticas deste "Erro" são representadas por sete funções de pertinência, com formas triangulares e trapezoidais, e cada forma é representada por: NB (Grande Negativo), NM (Médio Negativo), NS (Pequeno Negativo), ZE (Zero), PS (Pequeno Positivo), PM (Médio Positivo) e PB (Grande Positivo).

Já na Figura 30 ilustra-se a variável "Derro" com sete funções de pertinência, pois nota-se que próximo do ponto central de equilíbrio (ZE) as funções de pertinência são mais densas, por isso garante uma maior sensibilidade para o ajuste de controle, com o range da variável "Erro", que equivale a 45 Hz, segundo o critério de estabilidade, compreendendo assim um intervalo entre -22,5 Hz a 22,5 Hz no eixo horizontal, com formas triangulares e trapezoidais, e cada forma é representada também por: NB (Grande Negativo), NM (Médio Negativo), NS (Pequeno Negativo), ZE (Zero), PS (Pequeno Positivo), PM (Médio Positivo) e PB (Grande Positivo).

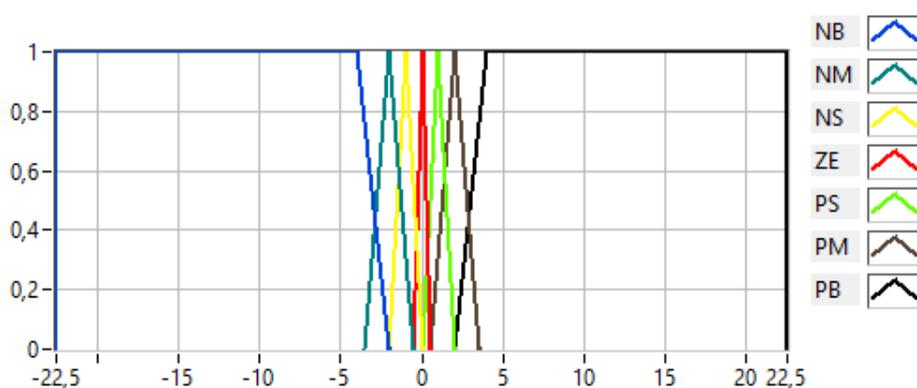


Figura 30 - Funções de Pertinência da Variável de Entrada (Derro).

### 5.3.2 Defuzzificação

Na defuzzificação, o controlador possui apenas uma variável de Saída a ser controlada, ou seja, a tensão de controle de 1 V ( $61,73 \text{ m/s}^2$  sem carga) a ser mantida constante como referencial que aciona o excitador eletromagnético da planta. Neste projeto o range da Saída foi de 6 V ( $370,38 \text{ m/s}^2$  sem carga), pois o excitador eletromagnético (*Mini-*

*Shaker da Bruel&Kjaer*<sup>®</sup> modelo 4810) suporta uma tensão máxima de 8,91 V (550 m/s<sup>2</sup> sem carga) segundo fabricante, logo a faixa de intervalo ficou entre -3 V (-30,865 m/s<sup>2</sup> sem carga) a 3 V (30,865 m/s<sup>2</sup> sem carga) no eixo horizontal, e um intervalo de [0,1] no eixo vertical. Lembrando que a faixa de tensão permitida pelas saídas analógicas da NI-DAQ é entre 0 V a 5 V.

Na Figura 31 ilustra-se a configuração da Saída de controle, as funções de pertinência, em triângulo e trapézio, tais que: NVB (Grande máximo Negativo), NB (Grande Negativo), NM (Médio Negativo), NS (Pequeno Negativo), ZE (Zero), PS (Pequeno Positivo), PM (Médio Positivo), PB (Grande Positivo) e PVB (Grande Máximo Positivo).

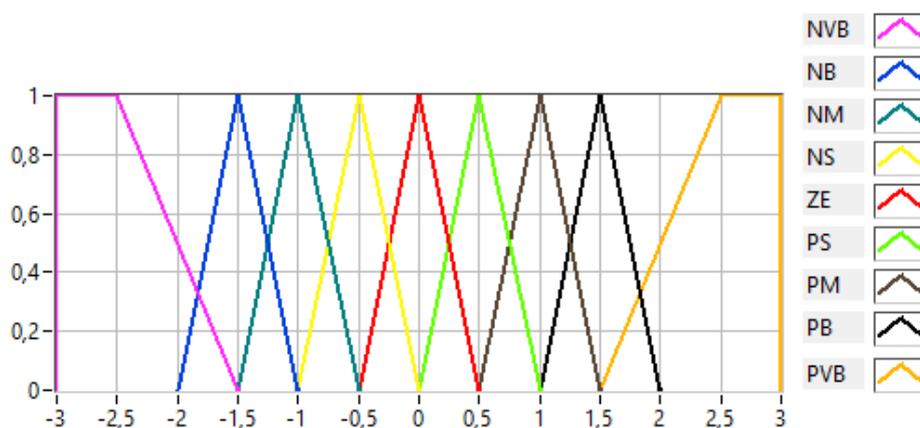


Figura 31 - Funções de Pertinência da Variável de Controle Saída.

Neste projeto optou-se pelo método de defuzzificação Centro-da-Área (C-o-A), pois o método é aceitável na continuidade de sinal da Saída do controlador, para evitar distúrbios e instabilidade no sistema, quando houver mudanças nas variáveis de entrada.

Segundo SIMÕES E SHAW (2007), este método de defuzzificação calcula o centroide da área composta pela união de todas as contribuições de regras das variáveis de saída.

### 5.3.3 Inferência Fuzzy

Pela aquisição dos dados, dos valores numéricos, normalizados em relação às variáveis dos sinais das entradas e do sinal de saída de controle que foram realizadas pelo a inferência Fuzzy, em que faz a interligação entre tais variáveis de projeto.

É ilustrado na Figura 32 o modelo geral do controlador Fuzzy, com duas variáveis de entrada e uma variável de controle (saída), em que estas estão associadas as suas sete funções de pertinência para cada variável de entrada e nove para a variável de controle, nas formas de triângulos e trapézios.

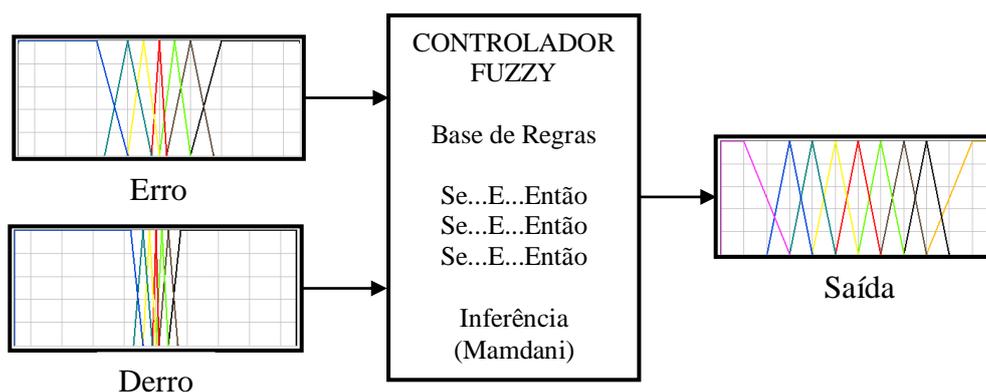


Figura 32 - Representação de Duas Variáveis de Entradas e Uma de Saída do Controlador Fuzzy.

Para este projeto, foi escolhida a inferência Fuzzy do tipo MAX-MIN em relação à composição das variáveis de entradas e saída Fuzzy como regra de controle. O método deste projeto teve como base na proposta de *Mamdani*, o qual possibilita tais regras linguísticas.

Foi construído um mapa de regras Fuzzy, que representa todas as combinações de variáveis de entradas e saída, em termos de seus conjuntos Fuzzy linguísticos, para se obter as curvas de respostas típicas de um sistema em malha fechada.

Na Tabela 2 estão inseridas as regras Fuzzy do controlador para a vibração mecânica exercida do excitador eletromagnético.

Tabela 2 - Base de Regras do Controlador Fuzzy.

		Erro						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Derro	NB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB

Com base na tabela de regras do controlador Fuzzy para vibração mecânica, oriunda do excitador eletromagnético, foram desenvolvidas quarenta e nove regras de controle.

Regras que foram escolhidas por meio de vários ensaios experimentais, que mostraram um melhor resultado do controlador Fuzzy para com o comportamento da análise de vibracional do estudo. As 49 combinações de controle estão escritas na Tabela B.1, que se encontra no Apêndice B.

Portanto, obteve-se o resultado das curvas de respostas típicas do sistema do projeto, a partir das configurações das regras do controlador, gerou-se então a superfície de controle das oscilações mecânicas, que mantém a tensão constante, em relação à varredura de frequência do estudo, ilustrada na Figura 33.

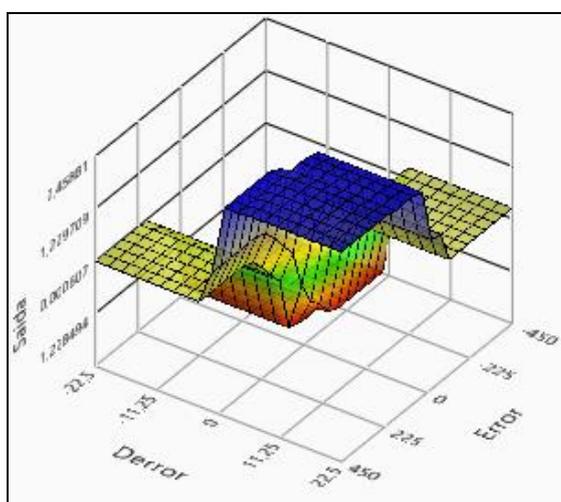


Figura 33 - Superfície de Controle Gerada por Controlador Fuzzy.

## CAPÍTULO VI

### IMPLEMENTAÇÃO DO DIAGRAMA DE BLOCOS NO LABVIEW™

#### 6.1 INTRODUÇÃO

No estudo dessa dissertação foi implementado um programa em LabVIEW™ da *National Instruments Corporation*.

Esse programa é de linguagem gráfica que utiliza blocos, diferentemente de outros tipos de programação que usam textos para a criação de diversas aplicações.

No entanto, ele utiliza uma programação baseada em fluxo de dados, onde os mesmos determinam a execução do programa desejável.

O programa LabVIEW™ pode ser utilizado para realizar vários processos na aquisição de dados, tais como; adquirir dados de instrumentos, dos processos de filtragem, de transformação, na análise de variáveis de dados, com o uso de instrumentos e equipamentos de controle.

Segundo LARSEN (2011), para os engenheiros, o programa LabVIEW™ torna possível obter informações do mundo exterior para um computador, o qual toma decisões com base nos dados adquiridos e envia resultados computados de volta ao mundo para controlar o funcionamento de um equipamento.

## 6.2 MODELAGEM DO DIAGRAMA DE BLOCOS

A modelagem por intermédio do diagrama de blocos feita para a bancada experimental deste projeto foi implementada no programa LabVIEW™, em malha fechada, apresentam-se todas as etapas de processo com os blocos necessários inseridos para aquisição de dados e controle.

Dentro desse sistema há os blocos representados pelas *DAQ Assistant* de entrada e saída, associados aos blocos de simulação de sinais e medidas de espectros, os blocos que formam a varredura de tempo e de frequências.

O bloco de interpolação de ganho em relação a suas respectivas frequências na saída do sistema, a composição de blocos para o controlador Fuzzy e os blocos *MatLab® Script*, para a obtenção do comportamento gráfico do sistema. Lembrando que o diagrama de blocos e as representações gráficas do painel frontal em LabVIEW™ se encontram no Apêndice A.

### 6.2.1 Bloco de Aquisição de Dados (*DAQ Assistant*)

O bloco *DAQ Assistant* é o responsável pela aquisição de dados dos instrumentos da banca do projeto. O diagrama de blocos da interface LabVIEW™ deste projeto, há dois blocos de aquisição de dados, o primeiro chama-se *DAQ Assistant* de entrada e o outro é a *DAQ Assistant* de saída, os quais estão inseridos dentro da estrutura de laço de repetição (*while loop*) para o funcionamento do experimento.

O laço de repetição (*while loop*) é uma instrução de fluxo de controle, onde todos os blocos do sistema estão localizados, que executa um bloco de subdiagrama repetidamente até que uma determinada condição booleana seja atendida (NI, 2019).

Todas as configurações dos blocos: *DAQ Assistant* de entrada, e do bloco *DAQ Assistant* de saída, associados aos blocos *Spectral Measurements*, e *Simulate Signal*, além dos gráficos existentes no painel frontal do programa LabVIEW™, encontram-se no Apêndice A.

Na Figura 34 ilustra-se o bloco *DAQ Assistant* de entrada que recebe os dados de tensão medida do acelerômetro, com uma frequência com total de amostras de 100 kHz, que o mesmo se associa ao bloco *Spectral Measurements*.

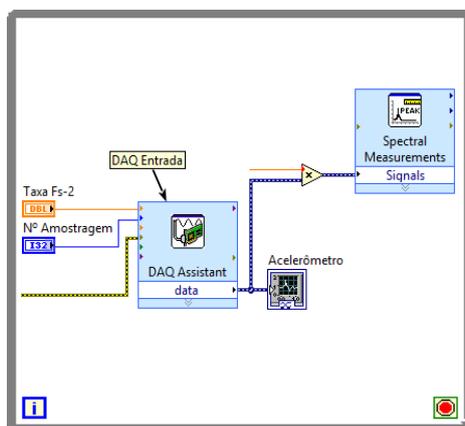


Figura 34 - Bloco *DAQ Assistant* de Entrada.

Na Figura 35 ilustra-se o bloco *DAQ Assistant* de saída, com uma taxa de frequência de 100 kHz, associado ao bloco de simulação de sinal (*Simulate Signal*), que envia os sinais gerados para o amplificador, este último amplifica os sinais recebidos e depois alimenta o excitador eletromagnético (*Mini-Shaker*) que gera as vibrações do sistema, em um regime permanente e constante, refazendo assim o ciclo do sistema de controle.

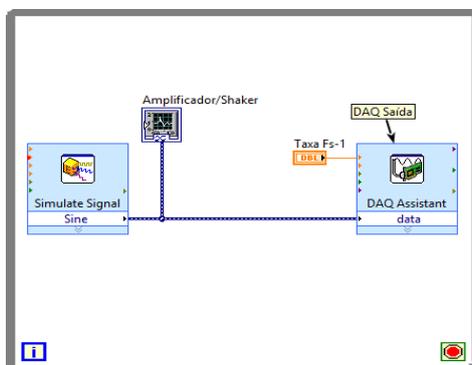


Figura 35 - Bloco *DAQ Assistant* de Saída.

### 6.2.2 Bloco de Medições Espectrais (*Spectral Measurements*)

O bloco *Spectral Measurements* é responsável por realizar medições espectrais baseadas em FFT (*Transformada Rápida de Fourier*), como amplitude média, espectro de potência e espectro de fase em um sinal (NI, 2019).

Na Figura 36 ilustra-se a funcionalidade deste bloco, que recebe dois sinais, um da aquisição de dados *DAQ* de entrada e o outro do bloco de interpolação dos ganhos relacionados à varredura das frequências em estudo.

Na saída, ele possui um gráfico FFT, associado a esta saída. Também há um bloco de manipulação de sinais chamado *Convert from Dynamic Data*, que tem como função converter os dados dinâmicos em numéricos em forma de ondas.

O mesmo está conectado ao bloco operador de sinal chamado de *Peak Detector*, esse bloco encontra a localização dos picos de amplitudes no sinal de vibração.

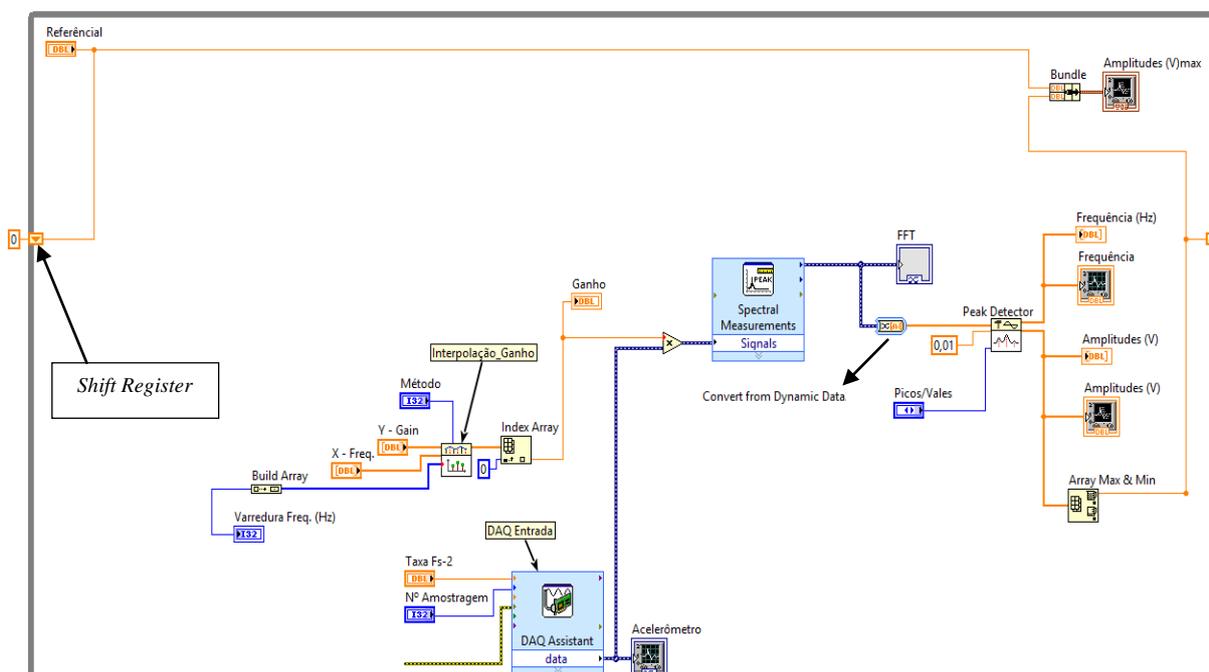


Figura 36 - Bloco Spectral Measurements.

Na sua entrada há um limitador com amplitudes maiores que 0,01 no espectro da FFT e em sua saída há os blocos gráficos das amplitudes e das frequências relacionados ao tempo.

O bloco anterior trabalha com bloco *Array Max & Min*, que retorna os valores máximo e mínimo encontrados na matriz de dados, com os índices para cada valor, ligando esse mesmo a saída de controle das máximas amplitudes através do comando registro de deslocamento (*Shift Register*). Esse registro faz a retroalimentação do sistema pela estrutura do *while loop*.

O comando adicional *Shift Register* também está ligado ao bloco *Bundle*, que agrupa os elementos de saída de controle com a tensão de referência lida pelo gráfico de máximas amplitudes.

O bloco de interpolação dos ganhos está relacionado a cada frequência da varredura que vai de 100 Hz a 1 kHz, num intervalo de 100 Hz em 100 Hz, em relação à análise de controle da tensão de referência.

Essa interpolação unidimensional usa o método de seleção baseado numa tabela de coordenadas x (Frequência) e y (Ganho), a varredura de frequência é ligada pelo bloco *Build Array*, o qual armazena todos os elementos de frequência ao bloco de interpolação, já o bloco *Index Array* anexa os elementos interpolados dos ganhos envia estes dados para bloco de gerador de sinais através do bloco *Multiply* que faz o produto das entradas entre os blocos da *Interpolate 1D* e *DAQ Assistant*.

Como não havia o instrumento condicionador de sinais na bancada, os ganhos foram obtidos por erros e tentativas na observação gráfica, em cada experimento executados com e sem cargas.

### **6.2.3 Bloco de Gerador de Sinais (*Simulate Signal*)**

O bloco *Simulate Signal* é responsável por simular um sinal de onda senoidal, triangular, dente de serra ou ruído (NI, 2019).

Esse bloco gera os sinais de ondas senoidais para este projeto, o mesmo se encontra interligado na entrada pelo conjunto de blocos do controlador Fuzzy, e na saída pelos blocos de aquisição de dados *DAQ Assistant* de saída e do bloco que gera gráficos em forma de onda senoidal. Nas Figura 37 ilustra-se o funcionamento desses blocos complementares no ciclo.

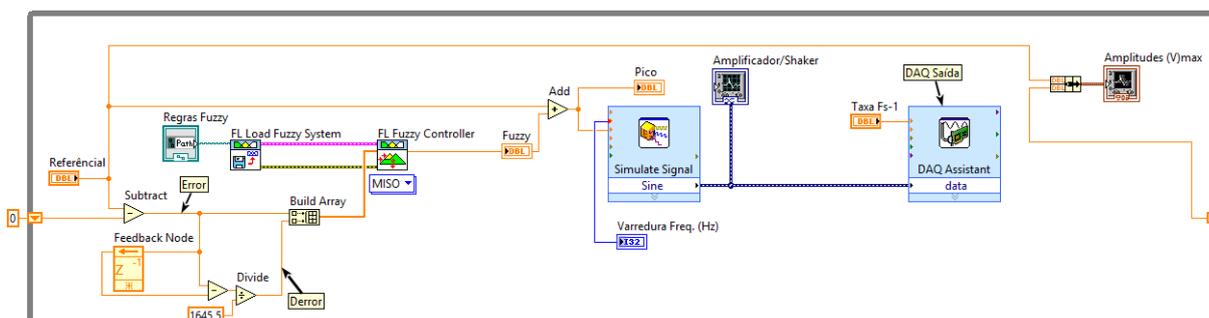


Figura 37 - Bloco Simulate Signal.

No bloco do controlador Fuzzy (*Fuzzy Controller*), programa-se o controle através da lógica difusa para o sistema desse projeto, esse bloco recebe os valores de entrada do "Erro" e da derivativa do erro "Derro", além de receber ao mesmo tempo todo sistema processado das regras difusas por intermédio do bloco das *Regras Fuzzy*, que especifica um caminho absoluto para com as regras introduzidas, e o bloco que processa e pesquisa o arquivo das regras Fuzzy configuradas (*FL Load Fuzzy System*).

A entrada "Erro" relaciona a diferença entre a tensão de referência (Amplitude máxima de 1 V que equivale a  $61,73 \text{ m/s}^2$  sem carga e a tensão lida pelo acelerômetro).

A derivada do erro "Derro" é captada pelo bloco que armazena os dados de tensões (*Feedback Node*) e em seguida divide-se por 1645 ms, pois cada aquisição dos dados de amplitude versus frequência se faz em 32,91 segundos.

Ambos os elementos de "Erro" e de "Derro" são enviados para o bloco que liga esses elementos a uma matriz de duas dimensões e conecta os mesmos como valores de entrada no controlador Fuzzy.

## 6.2.4 Varredura das Frequências e do Tempo

A varredura do tempo, num ciclo fechado por meio do comando registrador de deslocamento (*Shift Register*), ilustrada na Figura 38, se configura da seguinte maneira: a contagem inicia-se através do bloco comparador de maior ou igual que 1000 ms, e o outro bloco somam se encontra associado a um bloco de cronometragem de 50 ms.

O contador do laço é utilizado para produzir a base de tempo dos gráficos traçados pelo *MATLAB Script*. O valor inicial do tempo começa em zero ( $t = 0$ ) e é incrementado a cada execução do laço de repetição (*While Loop*).

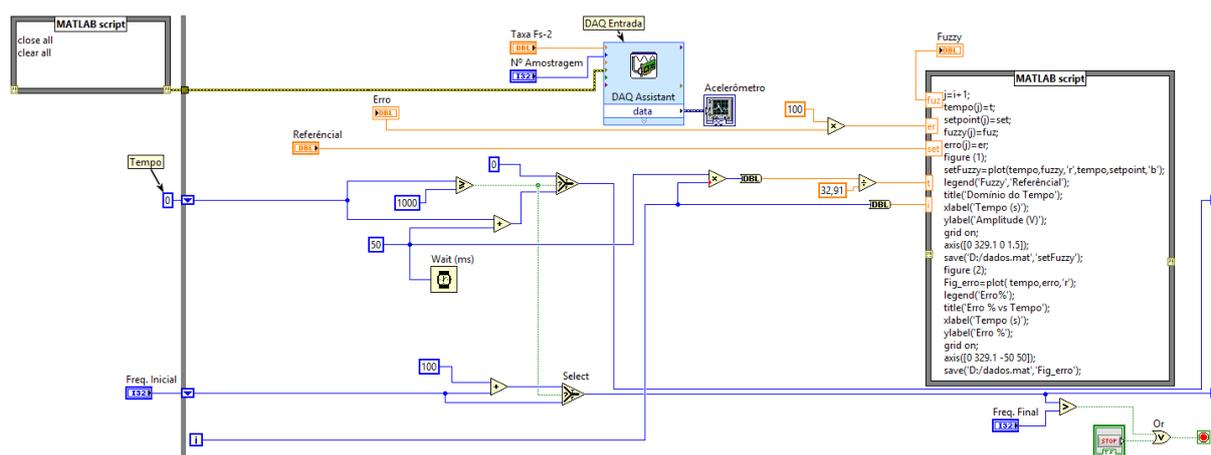


Figura 38 - Varredura das Frequências e do Tempo.

O bloco comparador maior ou igual ( $\geq$ ) e o bloco numérico soma (+) estão ligados a um bloco comparador chamado *Select*, em que o mesmo seleciona como verdadeiro valor igual a zero e falso valores do resultado do bloco de soma, em seguida o falso retorna ao tempo inicial para um novo recomeço do ciclo acumulado e assim continuamente.

A varredura na contagem do tempo está associada à varredura de frequência através dos blocos de comparação. Na varredura de frequência, inicia-se a partir da frequência inicial de 100 Hz até a frequência final de 1000 Hz, executa-se também dentro de um ciclo fechado pelo registrador de deslocamento (*Shift Register*).

O bloco numérico da soma possui uma de 100 Hz que se soma com a frequência inicial.

O resultado desta soma é ligado ao bloco comparador *Select*, que neste caso pode ser escolhido como novo valor de frequência dependendo da contagem do tempo.

O resultado do bloco comparador é retornado ao ciclo acumulando assim os valores para novos ciclos por diante.

Depois de transcorrido um intervalo de tempo determinado por um valor constante no bloco, a frequência do sinal gerado pelo simulador de sinais é também incrementada em passos pré-determinados.

Logo a frequência do sinal aplicado ao excitador eletromagnético varia do valor inicial (Freq. inicial) ao final (Freq. Final), fornecidos no painel frontal do bloco.

Quando a frequência atual tiver um valor maior do que a frequência final, este ciclo é finalizado, parando assim todo o processo.

Dentro e fora da estrutura de laço (*while loop*), são apresentados também os quadros do *MatLab Script Node*, este programa cria, em tempo real, os gráficos resultantes da aquisição de dados deste projeto, através das rotinas apresentadas no Apêndice A.2.

Foram usados blocos numéricos para condicionar as medidas necessárias em relação a unidades dos erros em porcentagem, e no tempo em segundos, com bloco *DBL*, para converter um número em um número de ponto flutuante de precisão dupla, podendo assim ser processado os gráficos de erros em relação à varredura das frequências e dos gráficos que mostra o comportamento do controlador Fuzzy em relação à tensão de referência versus tempo.

## **CAPÍTULO VII**

### **RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

#### **7.1 INTRODUÇÃO**

Inicialmente são abordados todos os resultados obtidos nas simulações feitas de vibração por meio do excitador eletromagnético em estudo, com os resultados adquiridos a partir da análise de projeto, foi executada para o controle do sistema difuso, em que permitiu ajustar parâmetros como amplitudes de tensão, aceleração e frequências em uma faixa de ondas escolhidas de vibração.

#### **7.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo apresentam-se todos os gráficos das simulações feitas para se obter as respostas de controle da tensão e da aceleração especificadas, foram executados os experimentos de carga em vazio, com carga de 100 g, de 200 g, de 300 g, de 400 g e de 500 g, por intermédio do parafuso sem fim conectado ao dinamômetro, com o sentido de rotação anti-horária, pois as aplicações dessas massas correspondem às cargas sobre o excitador eletromagnético.

Estas cargas foram medidas pelo instrumento dinamômetro que se encontra fixada entre o parafuso sem fim e a estrutura de base de aço. A relação da interpolação entre os

ganhos e a varredura de frequências em estudo para cada experimento, encontram se anexados nas tabelas do Apêndice C.

Na Figura 39 ilustra-se o comportamento do sinal de referência em relação ao sinal de controle quanto à amplitude e frequência.

O sinal de referência é ilustrado por meio da linha preta enquanto que o sinal de controle é ilustrado por meio da linha vermelha.

O experimento foi realizado utilizando uma carga de 500g, próxima à capacidade máxima do oscilador eletromecânico.

Resultados ilustrados nesta figura indicam que o controlador é capaz de corrigir a amplitude mediante a um degrau no tempo.

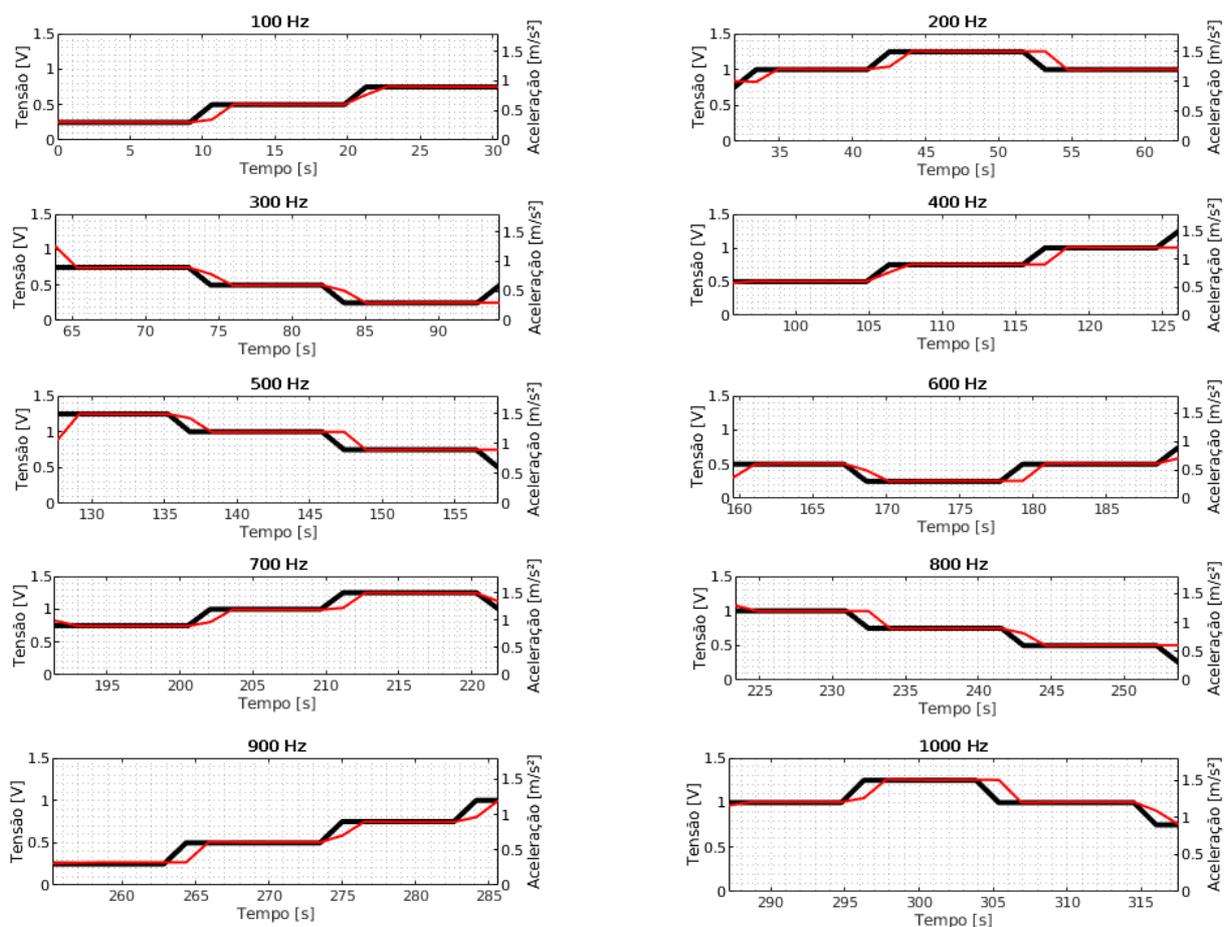


Figura 39 – Curvas de Resposta ao Degrau Variável de 100 Hz a 1 kHz.

### 7.2.1 Experimento sem Carga

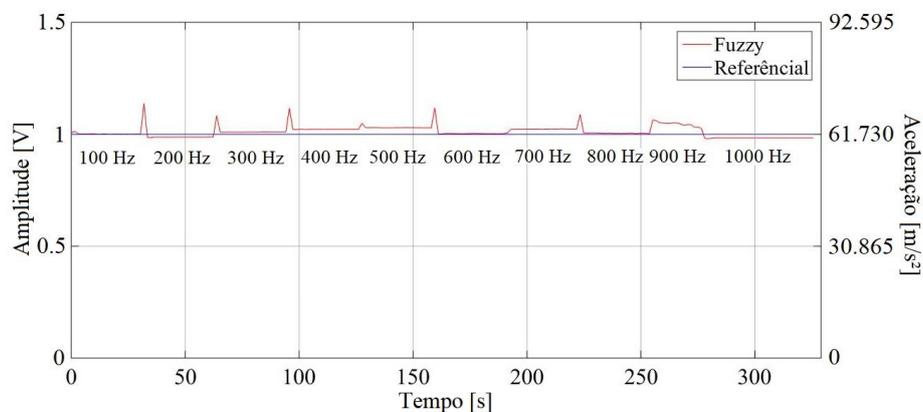


Figura 40 - Curva de Resposta ao Degrau Variável do Controlador Fuzzy sem Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

Na Figura 40 ilustra-se o comportamento da vibração controlada pelo sistema nebuloso automaticamente, por meio da planta do diagrama de blocos em programação LabVIEW™ com o auxílio do MatLab® para a simulação gráfica em tempo real.

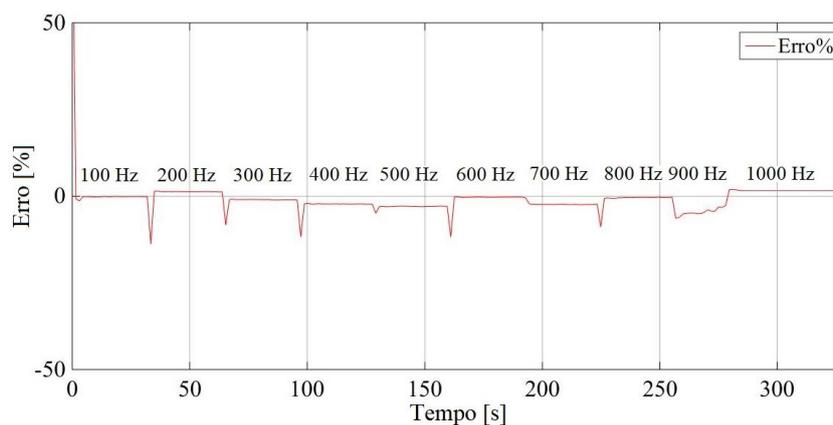


Figura 41 - Curva de Resposta ao Degrau Variável dos Erros Percentuais versus Amplitude sem Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

Na Figura 41 ilustra-se o gráfico do erro percentual em relação à amplitude de referência (Amplitude referencial de 1 V) em que essa tensão equivale a uma aceleração de

61,73 m/s<sup>2</sup>, da simulação gráfica automática do controlador Fuzzy na varredura desejada (de 100 Hz a 1 kHz). De acordo com o critério de estabilidade para o controle, o erro percentual médio se encontra abaixo de 2%, neste caso é considerável como aceitável, pois este experimento mostra uma média de erro de 1,51% em relação à linha da amplitude referencial.

Segundo OGATA (2010), o tempo de acomodação é o tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores dentro de uma faixa entre 2% a 5% em torno do valor final, em que pode ser determinar a porcentagem que deve ser utilizada no critério do erro.

A tabela de erros percentual médio versus frequências para o experimento com zero de carga, encontra-se no Apêndice D.1.

### 7.2.2 Experimento com Carga de 100 g

Neste experimento, foi aplicada uma carga de 100 g no excitador eletromagnético em funcionamento. A obtenção desta carga é feita por meio do parafuso sem fim, pois a cada volta completa no sentido anti-horário equivale a 20 g, devido ao passo da rosca deste parafuso sem fim. Foi preciso dar cinco voltas completa manualmente para o dinamômetro indicar 100 g de carga. Na Figura 42 ilustra-se o comportamento de controle desse sistema graficamente para com a adição desta carga.

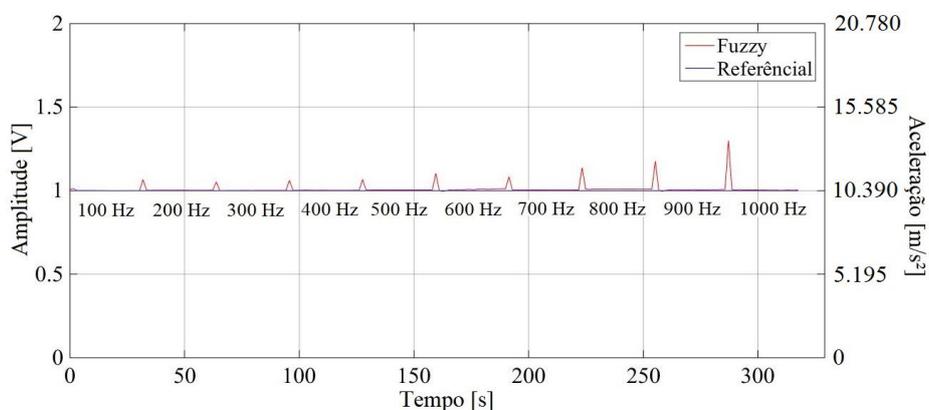


Figura 42 - Curva de Resposta ao Degrau Variável do Controlador Fuzzy na Adição de 100 g de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

Na Figura 43 ilustra-se o gráfico do erro percentual em relação à amplitude de referência com a média de erro de aproximadamente 0,35% em relação à linha da amplitude referencial para este experimento.

A tabela de erros percentual médio versus frequências para o experimento com 100g de carga, encontra-se no Apêndice D.2.

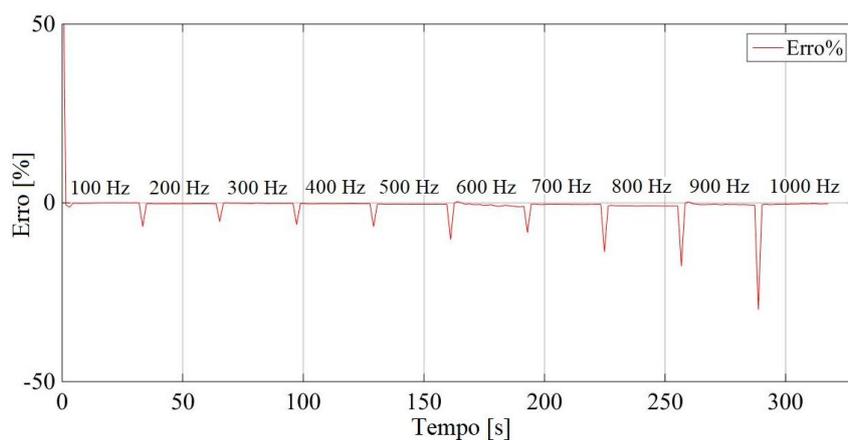


Figura 43 - Curva de Resposta ao Degrau Variável dos Erros Percentuais versus Amplitude com Carga de 100 g para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

### 7.2.3 Experimento com Carga de 200 g

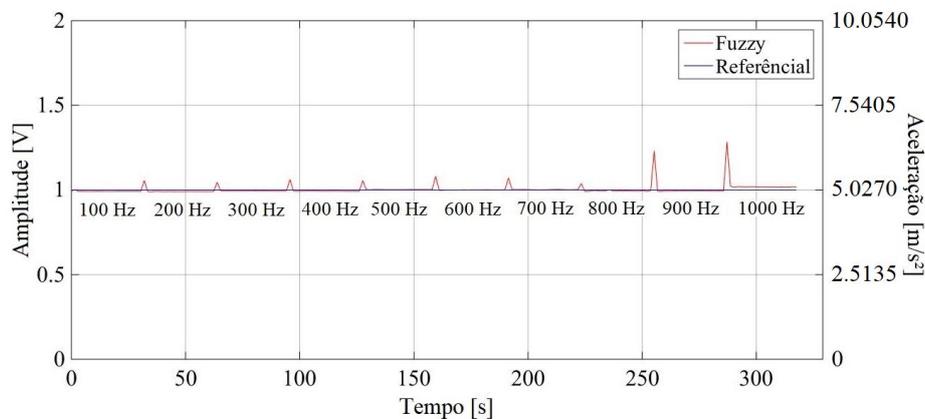


Figura 44 - Curva de Resposta ao Degrau Variável do Controlador Fuzzy na Adição de 200 g de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

Na Figura 44 ilustra-se o comportamento de controle desse sistema graficamente para o experimento com 200 g de carga. Para esse experimento, foi aplicada uma carga de 200 g no excitador eletromagnético em funcionamento.

Foi preciso dar mais cinco voltas completas manualmente, perfazendo assim 10 voltas completas, no sentido anti-horário, para o dinamômetro indicar 200 g de carga.

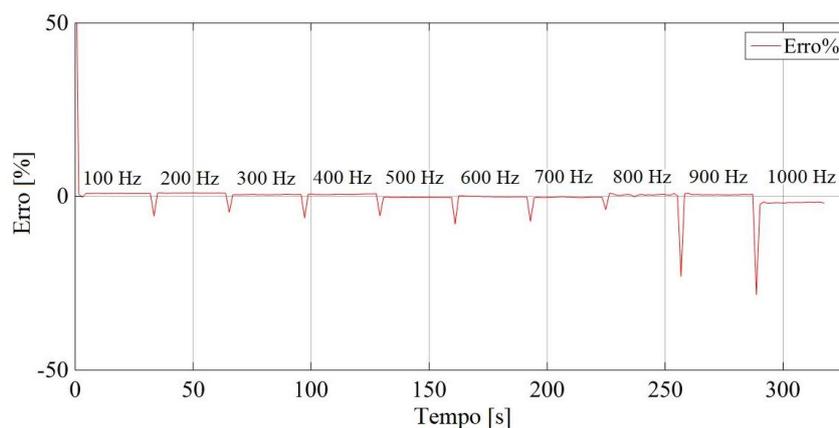


Figura 45 - Curva de Resposta ao Degrau Variável dos Erros Percentuais versus Amplitude com Carga de 200 g para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

Na Figura 45 ilustra-se o gráfico do erro percentual em relação à amplitude de referência com a média de erro de aproximadamente 0,58% em relação à linha de tensão referencial para este experimento com 200 g.

A tabela de erros percentual médio versus frequências para o experimento com 200g de carga, encontra-se no Apêndice D.3.

#### 7.2.4 Experimento com Carga de 300 g

Na Figura 46 ilustra-se o comportamento de controle desse sistema graficamente do experimento com 300 g de carga. Neste experimento, aplicou-se uma carga de 300 g no excitador eletromagnético.

Por mais cinco voltas completas manualmente, perfazendo assim 15 voltas completas, no sentido anti-horário, para o dinamômetro indicar 300 g de carga.

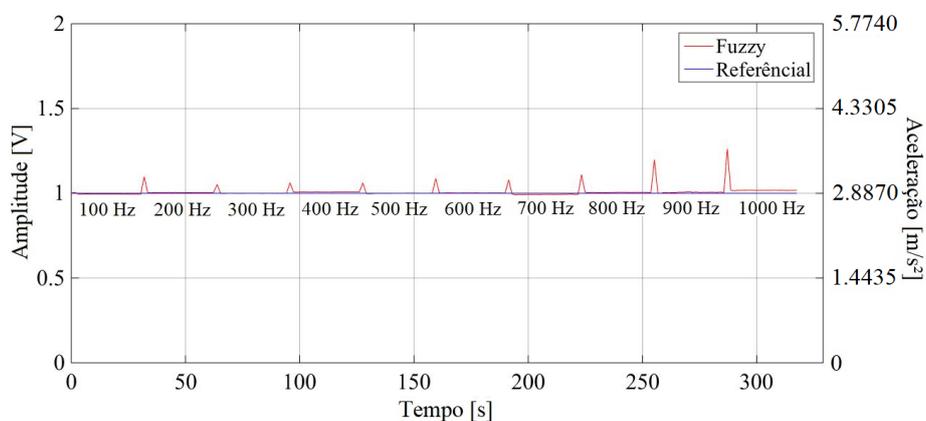


Figura 46 - Curva de Resposta ao Degrau Variável do Controlador Fuzzy na Adição de 300 g de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

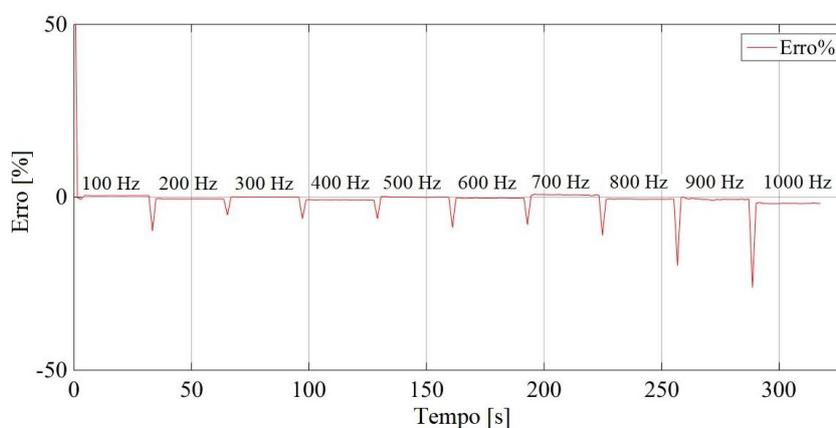


Figura 47 - Curva de Resposta ao Degrau Variável dos Erros Percentuais versus Amplitude com Carga de 300 g para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

Na Figura 47 ilustra-se o gráfico do erro percentual em relação à amplitude de referência com a média de aproximadamente 0,49% em relação à linha da amplitude referencial para este experimento com 300 g.

A tabela de erros percentual médio versus frequências para o experimento com 300g de carga, encontra-se no Apêndice D.4.

### 7.2.5 Experimento com Carga de 400 g

Da mesma forma do experimento anterior, para este experimento, foi adicionada uma carga de 400 g no excitador eletromagnético em funcionamento.

Dando-lhe mais cinco voltas completas manualmente, perfazendo assim 20 voltas completas, no sentido anti-horário, para o dinamômetro indicar 400 g de carga.

Na Figura 48 ilustra-se o comportamento de controle desse sistema graficamente.

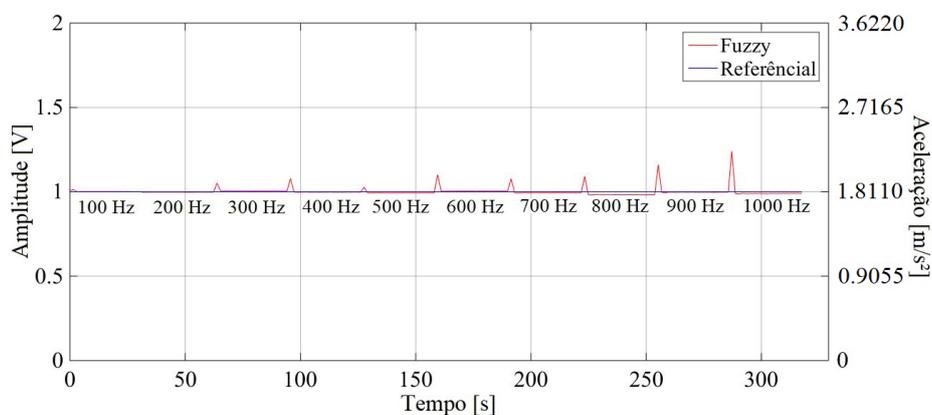


Figura 48 - Curva de Resposta ao Degrau Variável do Controlador Fuzzy na Adição de 400 g de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

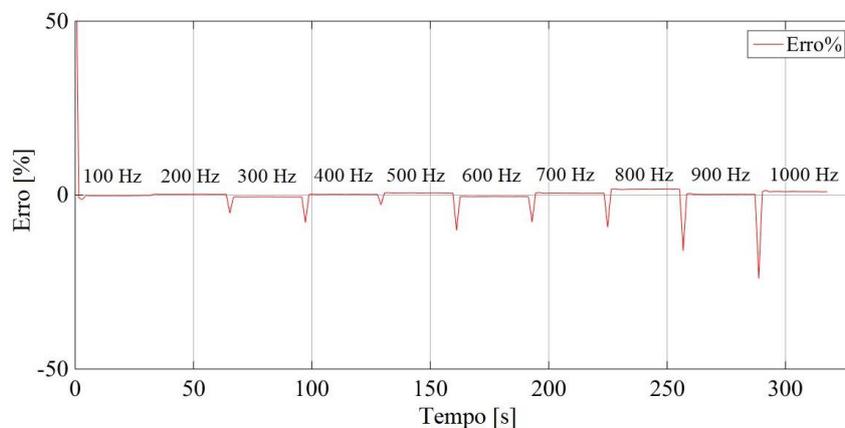


Figura 49 - Curva de Resposta ao Degrau Variável dos Erros Percentuais versus Amplitude com Carga de 400 g para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

Na Figura 49 ilustra-se o gráfico do erro percentual em relação à amplitude de referência com a média de erro de aproximadamente 0,52% em relação à linha da amplitude referencial para este experimento com 400 g.

A tabela de erros percentual médio versus frequências para o experimento com 400g de carga, encontra-se no Apêndice D.5.

### 7.2.6 Experimento com Carga de 500 g

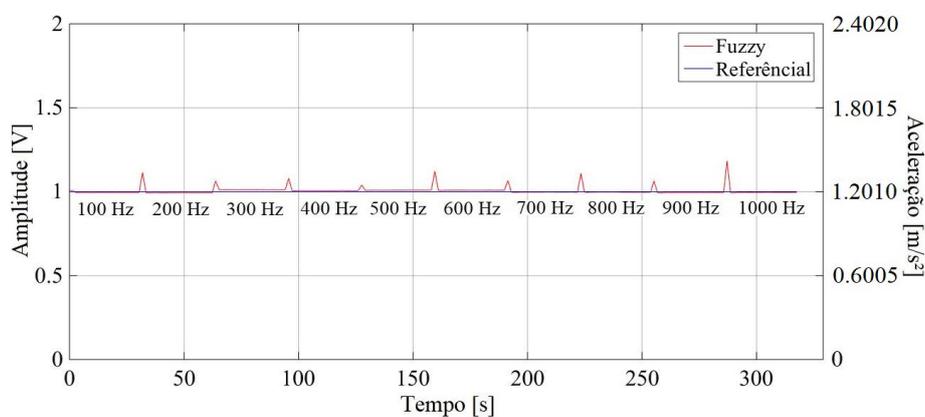


Figura 50 - Curva de Resposta ao Degrau Variável do Controlador Fuzzy na Adição de 500 g de Carga para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

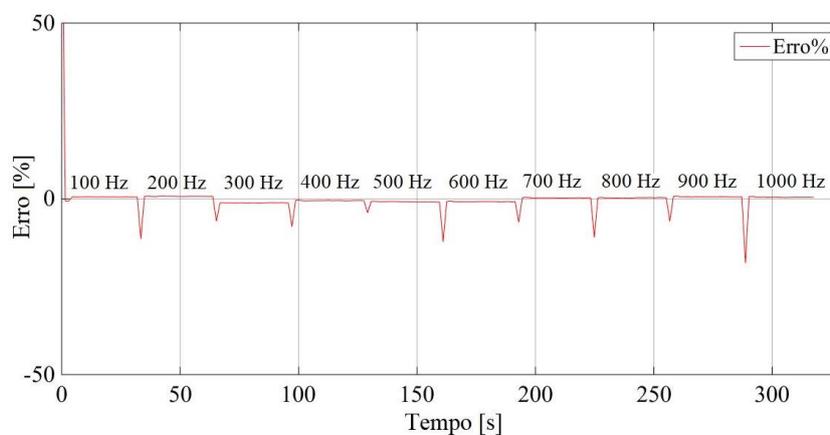


Figura 51 - Curva de Resposta ao Degrau Variável dos Erros Percentuais versus Amplitude com Carga de 500 g para a Frequência Variando de 100 Hz a 1 kHz em Passos de 100 Hz.

Na Figura 50 ilustra-se graficamente o comportamento de controle do experimento com carga de 500 g exercida no excitador eletromagnético em funcionamento, manualmente foram dadas mais cinco voltas completas, em que perfaz o total de 25 voltas, no sentido anti-horário de giro do parafuso rosqueado sem fim, em que o dinamômetro indica exatamente as 500 g de carga.

Conclui-se a análise experimental, por meio da Figura 51 a qual ilustra o gráfico do erro percentual em relação à amplitude de referência, com a média de erro de aproximadamente 0,56% em relação à linha da amplitude referencial para o experimento com carga de 500 g.

A tabela de erros percentual médio versus frequências para o experimento com 500g de carga, encontra-se no Apêndice D.6.

## **CAPÍTULO VIII**

### **CONCLUSÕES**

Neste trabalho foi desenvolvida uma forma de controle relacionado aos parâmetros da vibração de ondas provocada pelo atuador eletromagnético. Foi implementado um controlador Fuzzy para controlar o nível de vibração, de um excitador eletromagnético, numa faixa de frequência, entre 100 Hz a 1 kHz, com carga variável. Os experimentos mostraram que houve diferentes condições ao comportamento analisado de vibração, com a introdução de diferentes cargas no sistema. Com a introdução dessas cargas, ocorreram reduções dos picos originados dos distúrbios da estrutura quando uma frequência mudava abruptamente. Durante a varredura de frequência o erro variou entre 0,35% a 1,51%. Dessa forma, constatou-se que o controlador cumpriu o seu papel tendo apresentado uma robustez aceitável. Essa pesquisa contribui para futuros estudos e aplicações, no ramo das engenharias, por meio do controle inteligente, possibilitando executar experimentos de vibrações em estruturas utilizando técnicas de varredura em frequência com a amplitude de vibração sob controle.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com a finalidade de contribuir para o avanço das futuras pesquisas relacionadas ao controle inteligente na análise vibracional em estrutura, seguem-se algumas sugestões para estudo:

- Automatizar a aplicação de uma força programada para testar a robustez do sistema de controle projetado.
- Usar a técnica de controle Neuro-Fuzzy adaptativa visando melhorar a robustez do sistema.
- Projetar um controlador para operar nas baixas frequências, em que residem as frequências naturais de várias estruturas.

## REFERÊNCIAS

- ALIJANI, Zahra *et al.* *Fuzzy Transform to Approximate Solution of Boundary Value Problems Via Optimal Coefficients*. In: 2017 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS). IEEE, 2017. p. 466-471.
- ALLEMANG, R. J., 1994, *Vibrations: Experimental Modal Analysis*, UC-SDRL-CN-20-263-663/664.
- BEZERRA, S. T. M., 2009, *Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia*. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- BORDON, M. E., 2004, *Controlador Nebuloso de Arquitetura Simplificada*. Estudo de caso: *Acionamento de Motor de Indução Trifásico*. Tese de D.Sc., UNICAMP, Campina, SP, Brasil.
- BRUEL&KJAER<sup>®</sup>, 2019, *Acelerometer Type 4370 - Bruel&Kjaer<sup>®</sup> Sound & Vibration Measurement A/S*, DK 2850, Naerum, Denmark.
- BRUEL&KJAER<sup>®</sup>, 2019, *Mini-shaker Type 4810 - Bruel&Kjaer<sup>®</sup> Sound & Vibration Measurement A/S*, DK 2850, Naerum, Denmark.
- BUZDUGAN, G.; MIHAILESCU, E.; RADES, M. *Vibration Measurement*. Martinus Nijhoff Publishers, Bucharest, Romania, p. 198-207, 1986.
- CALA, Martin. *Sistema de Controle para um Pequeno Excitador Eletrodinâmico*. In: Anais da 16ª Conferência Internacional de Controle dos Cárpatos (ICCC) de 2015. IEEE, 2015. p. 64-68.
- CARDENAS-MACIEL, Selene L.; CORIA.; CONTRERAS-HERNANDEZ, Sergio. *Estabilização Baseada em Sistema Fuzzy para Estruturas Afetadas por Distúrbios Externos*. Otimização numérica e evolutiva - NEO 2017, v. 785, p. 261, 2019.
- DA SILVA, Camila Albertin Xavier *et al.* DINCON 2017.
- DONADEL, Juliane; MARTINS GOMES, Herbert. *Controle Heurístico Difuso de um Agitador Eletrodinâmico em Testes Acelerados HALT/HASS*. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, v. 27, n. 1, p. 101-112, 2019.

DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H., 2018, *Sistemas de Controle Modernos*. 13<sup>ed</sup> São Paulo, SP, LTC, 2018.

EREMIN, Evgeniy L.; SHELENOK, Evgeniy A. *Automatic Control System of Testing Vibration Shaker*. In: 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE, 2013. p. 1-10.

FLORA, Leandro Delia; GRÜNDLING, Hilton Abílio. *Acceleration Control of an Inverter-fed Electrodinamic Sshaker*. In: 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE, 2006. p. 1-7.

GONÇALVES, A.P., 2007. *Aplicação de Lógica Fuzzy em Guerra Eletrônica*. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2007.

HE, Ping et al. *Controle Ressonante Proporcional Difuso do Sistema de Teste de Vibração com Incertezas do Modelo*. In: 2019 Conferência Chinesa de Controle e Decisão (CCDC). IEEE, 2019. p. 2578-2583.

INMAN, D. J. 2013, *Engineering Vibration*. 4<sup>ed</sup>. Upper Saddle River, NJ. Prentice Hall, EUA, 2013.

LARSEN, Ronald W., 2011. *LabVIEW for Engineers*. 1<sup>st</sup> Edition, New Jersey, EUA, Pearson Higher, 2011.

LI, Xiangjun et al. *Fuzzy PID Control of Acceleration for Electric Shaker*. In: 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. IEEE, 2010. p. 333-336.

MAMDANE, E. H., ASSILIAN, S., 1974, *An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Contrller*. International Journal of Man-Machine Studies, v. 7, pp. 1-13.

McCONNELL, K. G., 1995, *Vibration Testing: Theory and Practice*, John Wiley & Sons. 1<sup>st</sup> Edition, NY.

MENDONÇA, G. L., 2008, *Aplicação da Técnica de Controle Fuzzy na Absorção de Vibração em Estruturas Aperticadas*. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

NI, DAQ USB-6212, NATIONAL INSTRUMENTS, 2019. Disponível em:<<https://www.ni.com/pt-br/support/model.usb-6212.html>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

NI, NATIONAL INSTRUMENTS, 2019. Disponível em:< <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

NISE, NORMAN S.; DA SILVA, FERNANDO RIBEIRO. 2012, *Engenharia de Sistemas de Controle*. 6<sup>a</sup>ed. Rio de Janeiro, RJ. LTC, 2012.

NOGUCHI, M. T., 2004, *Um Sistema Baseado em Regras Fuzzy para Classificação Supervisionada de Imagens Multiespectrais de Alta Resolução*. Dissertação de M. Sc., UFPR, Curitiba, PR, Brasil.

OGATA, K., 2010, *Engenharia de Controle Moderno*, 5ª ed., São Paulo: Ed. Prentice Hall.

RAO, D.K., 2008, *Electrodynamic Interaction Between a Resonating Structure and Exciter*, Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference, IMAC - Vol.2, p.1142-1150.

REPINALDO, Joana Pereira et al. *Controle Modal Aplicado a uma Estrutura de 2 graus de Liberdade Utilizando Atuadores Eletromagnéticos*. 2018. Dissertação de Mestrado.

Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2018.

RIGUEL, D.G.S., CHENCI, G.P., LUCD, C.A., *Uma Introdução a Lógica Fuzzy*. Resista eletrônica de sistemas de informação e gestão tecnológica. UNI-FACEF, 2011.

SANTOS, H. F. 2008. *Controle de Vibrações Estruturais Usando Cerâmicas Piezoelétricas em Extensão e Cisalhamento Conectadas a Circuitos Híbridos Ativo-Passivos*. USP, São Carlos.

SEKHAR, Y.; VINOTHKUMAR, C. *Desenvolvimento de um Controlador Baseado em Vista de Laboratório para Controle Ativo de Vibração de Estruturas de Painéis Usando Bolachas Piezoelétricas*. In: Conferência Internacional de 2016 sobre Tecnologias de Circuito, Energia e Computação (ICCPCT). IEEE, 2016. p. 1-5.

SIMÕES, M.G., SHAW, I. S., 2007, *Controle e Modelagem Fuzzy*. 2ª ed. São Paulo, Blucher: FAPESP, 2007.

TAKAGI, T., SUGENO, M., 1985, *Fuzzy Identification os Systems and Its Application to Modelling and Control*. IEEE Trans. Syst. Man Cyber., v. SMC-15, n. 1, pp. 116-132.

VIELLA, M.F.S., PATRÍCIA, B.J, ROSANA, S.M, *Diagnóstico Médico de Doenças Infantis*. FAMAT em revista. UFU. Uberlândia, 2007.

XAVIER FILHO, A. F., 2008, *Controlador Fuzzy Aplicado a um Sistema de Controle de Posição*. Dissertação de M.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

YAO, Jianjun et al. *Three-parameter Control Scheme based on Adaptive Pole Assignment for an Underwater Shaking Table System*. In: 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE, 2019. p. 3081-3085.

## APÊNDICE A

### PROGRAMA DA PLANTA EXPERIMENTAL EM LABVIEW™

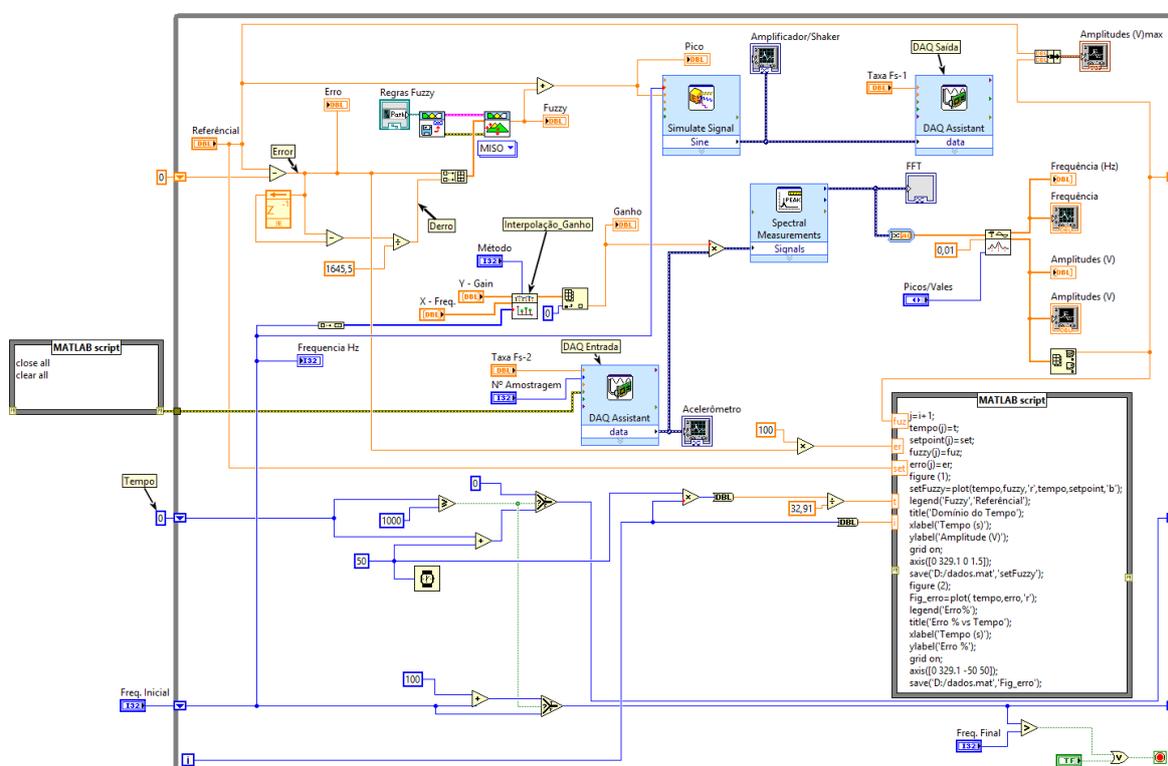


Figura A.1 - Diagrama de Blocos em LabVIEW™.

```
close all
clear all
j=i+1;
tempo(j)=t;
setpoint(j)=set;
fuzzy(j)=fuz;
erro(j)=er;
figure (1);
setFuzzy=plot(tempo,fuzzy,'r',tempo,setpoint,'b');
legend('Fuzzy','Referencial');
title('Domínio do Tempo');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Amplitude (V)');
grid on;
axis([0 329.1 0 1.5]);
save('D:/dados.mat','setFuzzy');
figure (2);
Fig_erro=plot( tempo,erro,'r');
legend('Erro%');
title('Erro % vs Tempo');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Erro %');
grid on;
axis([0 329.1 -50 50]);
save('D:/dados.mat','Fig_erro');
```

Figura A.2 - Rotinas do MatLab<sup>®</sup> *Script Node*.

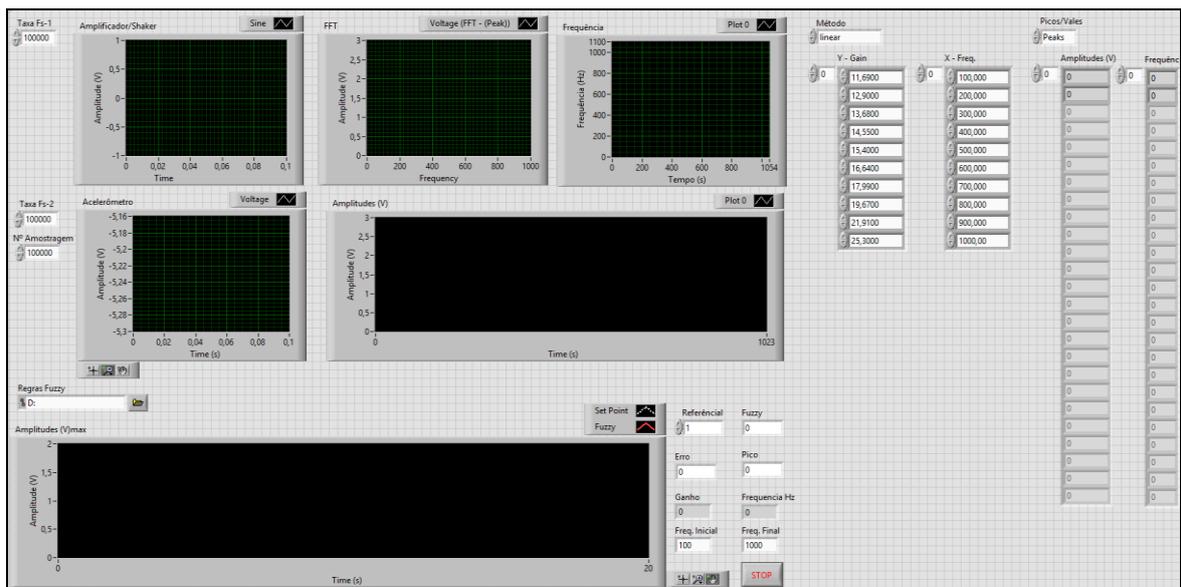


Figura A.3 – Painel Frontal em LabVIEW™.

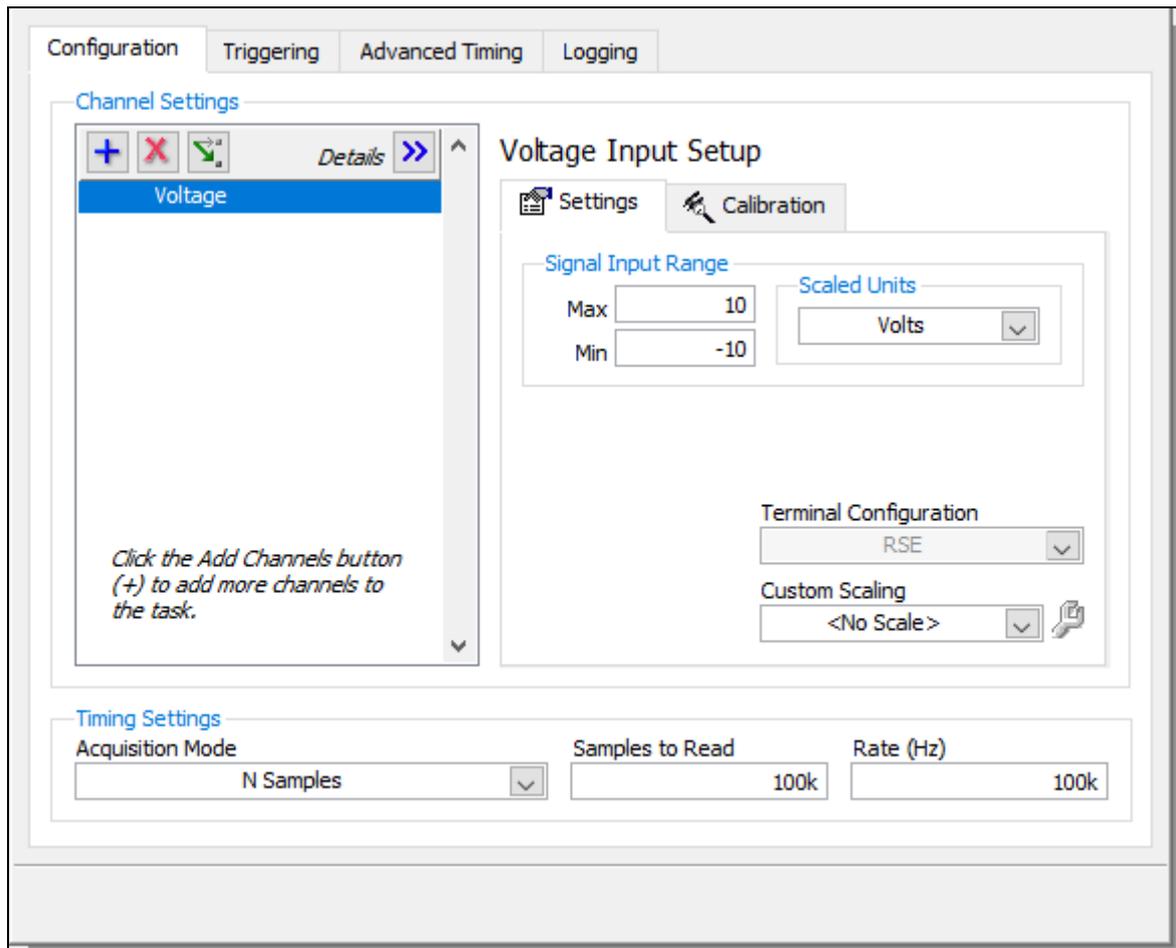


Figura A.4 – Configuração do Bloco *DAQ* de Entrada.

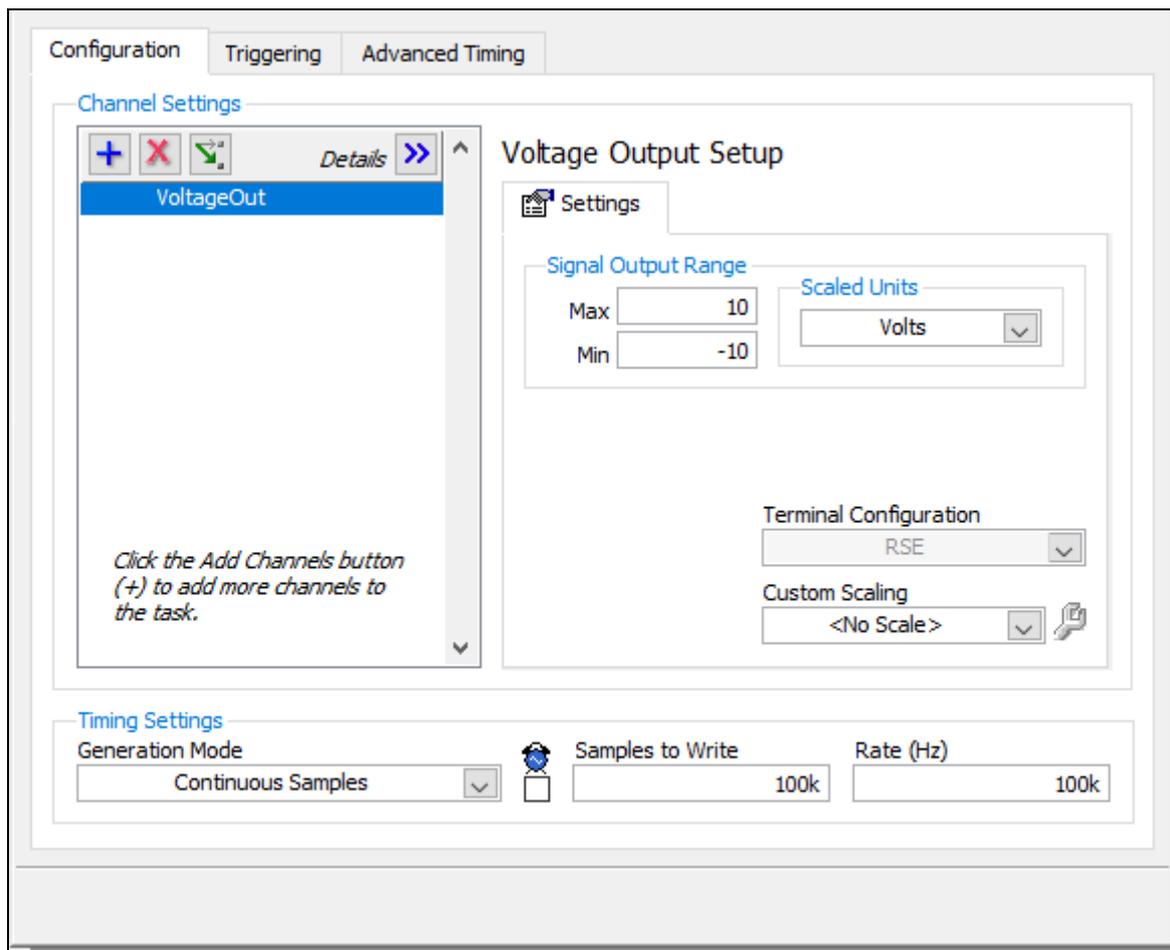


Figura A.5 – Configuração do Bloco DAQ de Saída.

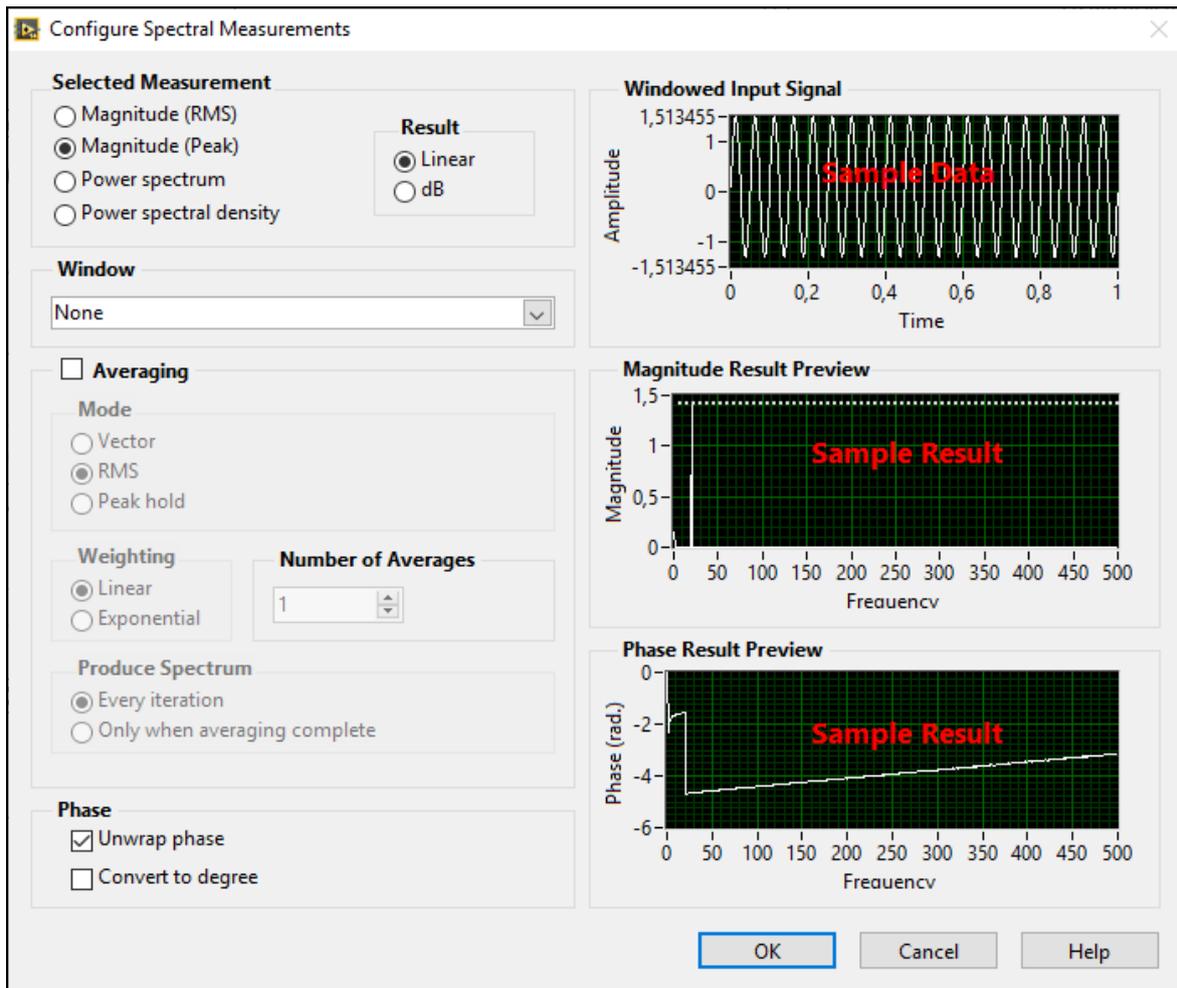


Figura A.6 – Configuração do *Spectral Measurements*.

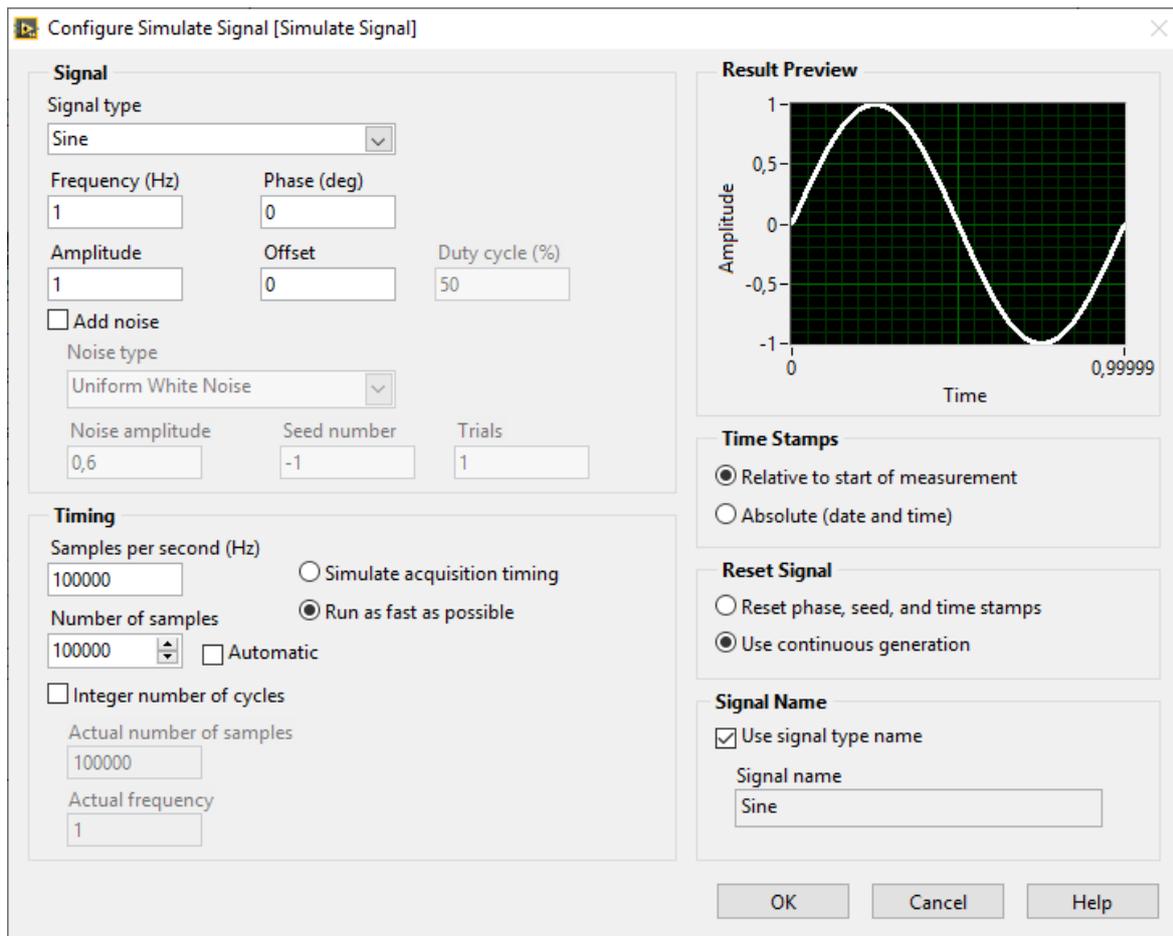


Figura A.7 – Configuração do Bloco *Simulate Signal*.

## APÊNDICE B

### TABELA DA BASE DE REGRAS DO CONTROLADOR FUZZY

Tabela B.1 – Base de Regras do Controlador Fuzzy do Projeto.

Nº Regra	Regra
01	Se Erro é "NB" E Derro é "NB" ENTÃO Saída é "NVB"
02	Se Erro é "NB" E Derro é "NM" ENTÃO Saída é "NVB"
03	Se Erro é "NB" E Derro é "NS" ENTÃO Saída é "NVB"
04	Se Erro é "NB" E Derro é "ZE" ENTÃO Saída é "NB"
05	Se Erro é "NB" E Derro é "PS" ENTÃO Saída é "NM"
06	Se Erro é "NB" E Derro é "PM" ENTÃO Saída é "NS"
07	Se Erro é "NB" E Derro é "PB" ENTÃO Saída é "ZE"
08	Se Erro é "NM" E Derro é "NB" ENTÃO Saída é "NVB"
09	Se Erro é "NM" E Derro é "NM" ENTÃO Saída é "NVB"
10	Se Erro é "NM" E Derro é "NS" ENTÃO Saída é "NB"
11	Se Erro é "NM" E Derro é "ZE" ENTÃO Saída é "NM"
12	Se Erro é "NM" E Derro é "PS" ENTÃO Saída é "NS"
13	Se Erro é "NM" E Derro é "PM" ENTÃO Saída é "ZE"
14	Se Erro é "NM" E Derro é "PB" ENTÃO Saída é "PS"
15	Se Erro é "NS" E Derro é "NB" ENTÃO Saída é "NVB"
16	Se Erro é "NS" E Derro é "NM" ENTÃO Saída é "NB"
17	Se Erro é "NS" E Derro é "NS" ENTÃO Saída é "NM"
18	Se Erro é "NS" E Derro é "ZE" ENTÃO Saída é "NS"
19	Se Erro é "NS" E Derro é "PS" ENTÃO Saída é "ZE"
20	Se Erro é "NS" E Derro é "PM" ENTÃO Saída é "PS"
21	Se Erro é "NS" E Derro é "PB" ENTÃO Saída é "PM"
22	Se Erro é "ZE" E Derro é "NB" ENTÃO Saída é "NB"
23	Se Erro é "ZE" E Derro é "NM" ENTÃO Saída é "NM"
24	Se Erro é "ZE" E Derro é "NS" ENTÃO Saída é "NS"
25	Se Erro é "ZE" E Derro é "ZE" ENTÃO Saída é "ZE"
26	Se Erro é "ZE" E Derro é "PS" ENTÃO Saída é "PS"
27	Se Erro é "ZE" E Derro é "PM" ENTÃO Saída é "PM"
28	Se Erro é "ZE" E Derro é "PB" ENTÃO Saída é "PB"

29	Se Erro é "PS" E Derro é "NB" ENTÃO Saída é "NM"
30	Se Erro é "PS" E Derro é "NM" ENTÃO Saída é "NS"
31	Se Erro é "PS" E Derro é "NS" ENTÃO Saída é "ZE"
32	Se Erro é "PS" E Derro é "ZE" ENTÃO Saída é "PS"
33	Se Erro é "PS" E Derro é "PS" ENTÃO Saída é "PM"
34	Se Erro é "PS" E Derro é "PM" ENTÃO Saída é "PB"
35	Se Erro é "PS" E Derro é "PB" ENTÃO Saída é "PVB"
36	Se Erro é "PM" E Derro é "NB" ENTÃO Saída é "NS"
37	Se Erro é "PM" E Derro é "NM" ENTÃO Saída é "ZE"
38	Se Erro é "PM" E Derro é "NS" ENTÃO Saída é "PS"
39	Se Erro é "PM" E Derro é "ZE" ENTÃO Saída é "PM"
40	Se Erro é "PM" E Derro é "PS" ENTÃO Saída é "PB"
41	Se Erro é "PM" E Derro é "PM" ENTÃO Saída é "PVB"
42	Se Erro é "PM" E Derro é "PB" ENTÃO Saída é "PVB"
43	Se Erro é "PB" E Derro é "NB" ENTÃO Saída é "ZE"
44	Se Erro é "PB" E Derro é "NM" ENTÃO Saída é "PS"
45	Se Erro é "PB" E Derro é "NS" ENTÃO Saída é "PM"
46	Se Erro é "PB" E Derro é "ZE" ENTÃO Saída é "PB"
47	Se Erro é "PB" E Derro é "PS" ENTÃO Saída é "PVB"
48	Se Erro é "PB" E Derro é "PM" ENTÃO Saída é "PVB"
49	Se Erro é "PB" E Derro é "PB" ENTÃO Saída é "PVB"

**APÊNDICE C****APRESENTAÇÃO DAS TABELAS DE INTERPOLAÇÃO DOS  
GANHOS VERSUS FREQUÊNCIAS**

Tabela C.1 – Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 0g.

<b>Ganho - V</b>	<b>Frequência - Hz</b>
<b>11,08</b>	100
<b>12,39</b>	200
<b>13,02</b>	300
<b>14,11</b>	400
<b>14,68</b>	500
<b>16,24</b>	600
<b>17,38</b>	700
<b>19,55</b>	800
<b>22,37</b>	900
<b>27,65</b>	1000

Tabela C.2 – Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 100g.

<b>Ganho - V</b>	<b>Frequência - Hz</b>
<b>11,69</b>	100
<b>12,40</b>	200
<b>12,93</b>	300
<b>14,00</b>	400
<b>14,74</b>	500
<b>16,11</b>	600
<b>16,88</b>	700
<b>18,77</b>	800
<b>21,44</b>	900
<b>27,17</b>	1000

Tabela C.3 – Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 200g.

<b>Ganho - V</b>	<b>Frequência - Hz</b>
<b>11,65</b>	100
<b>12,48</b>	200
<b>13,18</b>	300
<b>14,13</b>	400
<b>15,01</b>	500
<b>16,29</b>	600
<b>17,07</b>	700
<b>17,79</b>	800
<b>22,41</b>	900
<b>26,86</b>	1000

Tabela C.4 – Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 300g.

<b>Ganho - V</b>	<b>Frequência - Hz</b>
<b>11,66</b>	100
<b>12,71</b>	200
<b>13,36</b>	300
<b>14,44</b>	400
<b>15,33</b>	500
<b>16,74</b>	600
<b>17,41</b>	700
<b>19,67</b>	800
<b>24,17</b>	900
<b>27,58</b>	1000

Tabela C.5 – Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 400g.

<b>Ganho - V</b>	<b>Frequência - Hz</b>
<b>11,69</b>	100
<b>12,90</b>	200
<b>13,68</b>	300
<b>14,55</b>	400
<b>15,40</b>	500
<b>16,64</b>	600
<b>17,99</b>	700
<b>19,67</b>	800
<b>21,91</b>	900
<b>25,30</b>	1000

Tabela C.6 – Interpolação dos Ganhos versus Frequências para 500g.

<b>Ganho - V</b>	<b>Frequência - Hz</b>
<b>11,60</b>	100
<b>13,00</b>	200
<b>13,85</b>	300
<b>14,80</b>	400
<b>15,60</b>	500
<b>16,99</b>	600
<b>18,47</b>	700
<b>20,25</b>	800
<b>23,10</b>	900
<b>27,67</b>	1000

## APÊNDICE D

### APRESENTAÇÃO DAS TABELAS DO ERRO PERCENTUAL MÉDIO

Tabela D.1 – Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 0 g.

100 Hz	200 Hz	300 Hz	400 Hz	500 Hz	600 Hz	700 Hz	800 Hz	900 Hz	1 kHz
0,6893	1,401	0,9391	2,188	2,968	0,1992	2,257	0,6204	5,142	1,837
1,355	1,531	0,8565	2,069	2,932	0,1464	2,289	0,5091	4,966	1,937
0,1545	1,255	0,9976	2,277	3,019	0,3582	2,325	0,5858	4,867	1,814
0,1394	1,254	0,9618	2,226	2,977	0,3714	2,319	0,5984	4,872	1,616
0,1507	1,301	0,9761	2,155	2,943	0,3171	2,35	0,4655	5,092	1,603
0,2055	1,268	0,9582	2,236	2,886	0,3032	2,337	0,4706	5,042	1,737
0,2382	1,328	0,9168	2,228	2,856	0,2652	2,345	0,4062	4,616	1,881
0,1766	1,286	0,9623	2,246	2,861	0,2443	2,35	0,4484	3,895	1,86
0,05683	1,249	0,9761	2,227	2,887	0,2802	2,34	0,4202	4,375	1,723
0,1568	1,265	0,9859	2,185	2,971	0,317	2,266	0,3889	4,315	1,615
0,1435	1,254	1,012	2,26	2,919	0,355	2,356	0,3961	3,091	1,714
0,0673	1,263	0,9683	2,203	2,963	0,3349	2,383	0,3533	3,254	1,889
0,09108	1,26	1,092	2,259	3,014	0,3076	2,39	0,394	2,628	1,769
0,1347	1,261	1,093	2,249	2,938	0,3045	2,358	0,399	4,516	1,721
0,1137	1,307	1,088	2,243	2,943	0,2775	2,424	0,4535	3,693	1,712
0,09222	1,32	1,055	2,237	2,915	0,2832	2,437	0,2955	4,471	1,737
0,1027	1,264	1,058	2,206	2,902	0,2781	2,378	0,396	4,418	1,81
0,06966	1,266	1,038	2,268	2,847	0,2488	2,415	0,4324	3,255	1,821
0,09858	1,216	1,051	2,247	2,884	0,2577	2,35	0,4005	3,333	1,789
0,1214	1,224	1,064	2,247	2,887	0,2801	2,289	0,2892	2,655	1,611
0,1197	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Média do Erro (%)</b>									
<b>1,510775773</b>									

Tabela D.2 – Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 100 g.

<b>100 Hz</b>	<b>200 Hz</b>	<b>300 Hz</b>	<b>400 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>600 Hz</b>	<b>700 Hz</b>	<b>800 Hz</b>	<b>900 Hz</b>	<b>1 kHz</b>
0,09498	0,2552	0,0975	0,2032	0,3706	0,03184	0,4017	0,867	0,1313	0,5388
0,1023	0,1809	0,02394	0,1791	0,3249	0,3604	0,3584	0,6966	0,3251	0,3686
0,1268	0,2755	0,09816	0,2815	0,4396	0,01836	0,4684	0,8124	0,2302	0,5166
0,1242	0,02797	0,1051	0,2828	0,4305	0,4308	0,5037	0,8265	0,3702	0,497
0,1038	0,2505	0,09979	0,2948	0,406	0,2752	0,4483	0,8505	0,509	0,4034
0,08962	0,264	0,1248	0,2554	0,4022	0,4976	0,3803	0,8343	0,5163	0,4204
0,04863	0,2801	0,1207	0,2248	0,4011	0,5159	0,4166	0,8365	0,4808	0,3784
0,0309	0,2277	0,1739	0,2345	0,4384	0,4527	0,4063	0,8746	0,4844	0,4515
0,03383	0,2543	0,1814	0,2676	0,4394	0,6874	0,4392	0,8887	0,3537	0,3269
0,01981	0,257	0,06409	0,2731	0,4312	0,6353	0,4582	0,8728	0,4769	0,3503
0,02623	0,2622	0,1399	0,2225	0,4312	0,4988	0,4274	0,865	0,5509	0,3301
0,01929	0,2558	0,1353	0,2235	0,391	0,7988	0,4889	0,8243	0,4119	0,2363
0,0127	0,2599	0,1777	0,2384	0,4133	0,9775	0,452	0,865	0,4917	0,275
0,01901	0,1972	0,167	0,2247	0,4211	0,8818	0,4784	0,8495	0,4737	0,2973
0,00764	0,2318	0,1512	0,205	0,4224	0,6564	0,4584	0,8721	0,468	0,151
0,03118	0,2131	0,1599	0,2109	0,4403	0,8818	0,4599	0,8917	0,5333	0,2487
0,0491	0,2156	0,1623	0,2301	0,4147	0,6564	0,4584	0,8752	0,4791	0,3449
0,0099	0,2208	0,1676	0,2328	0,4405	0,8675	0,4582	0,8815	0,5403	0,2782
0,02492	0,243	0,1662	0,2486	0,4343	0,9148	0,4275	0,8989	0,6137	0,2673
0	0,2559	0,1708	0,2244	0,3853	1,038	0,4253	0,8468	0,6023	0
0	0	0	0	0	1,137	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,9649	0	0	0	0
<b>Média do Erro (%)</b>									
<b>0,3498739</b>									

Tabela D.3 – Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 200 g.

100 Hz	200 Hz	300 Hz	400 Hz	500 Hz	600 Hz	700 Hz	800 Hz	900 Hz	1 kHz
0,7336	1,026	0,4832	0,6448	0,2283	0,1883	0,3724	0,889	0,7782	2,306
0,2499	1,086	0,565	0,7185	0,1332	0,1915	0,1821	0,7565	0,8927	1,556
0,8487	0,9061	0,4955	0,5466	0,2535	0,05286	0,2822	0,387	0,5584	1,922
0,8145	0,9015	0,5569	0,5808	0,2667	0,04144	0,282	0,2734	0,5514	1,862
0,8788	0,9596	0,5395	0,5241	0,267	0,03314	0,2481	0,4804	0,5759	1,801
0,9114	0,9824	0,5969	0,5586	0,234	0,03789	0,2025	0,6024	0,4735	1,78
0,8829	0,9536	0,6022	0,5367	0,2171	5E-06	0,1542	0,5108	0,5294	1,84
0,8576	0,9736	0,5031	0,5851	0,2358	0,09734	0,1312	0,1334	0,5207	1,853
0,8073	1,029	0,5504	0,654	0,2193	0,09734	0,06931	0,4731	0,4566	1,729
0,8694	0,9831	0,5208	0,6627	0,2248	0,05665	0,1554	0,6079	0,5571	1,787
0,8854	1,045	0,4821	0,6143	0,23	0,07331	0,1482	0,3864	0,4766	1,737
0,8669	0,9801	0,5246	0,6005	0,2185	0,1274	0,2127	0,5356	0,4964	1,755
0,8989	0,9274	0,5595	0,5883	0,2437	0,1259	0,2701	0,4264	0,4519	1,752
0,8351	0,9674	0,5083	0,6367	0,2436	0,1045	0,3185	0,5113	0,4556	1,711
0,8335	0,9783	0,5968	0,6636	0,2507	0,1417	0,2649	0,5735	0,53	1,614
0,835	0,9385	0,6478	0,6971	0,2474	0,1457	0,2057	0,6565	0,4771	1,749
0,8585	0,9794	0,5943	0,7392	0,2621	0,1111	0,1652	0,4908	0,592	1,608
0,8443	0,9919	0,5652	0,7238	0,2521	0,1236	0,1737	0,3799	0,575	1,69
0,8451	0,9712	0,5861	0,7343	0,251	0,1053	0,1519	0,8799	0,5221	1,894
0,8528	0,9462	0,5975	0,7787	0,2978	0,0978	0,2548	0,2513	0,6277	0
0,8755	0	0	0	0	0,1462	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Média do Erro (%)</b>									
<b>0,57748175</b>									

Tabela D4 – Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 300 g.

<b>100 Hz</b>	<b>200 Hz</b>	<b>300 Hz</b>	<b>400 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>600 Hz</b>	<b>700 Hz</b>	<b>800 Hz</b>	<b>900 Hz</b>	<b>1 kHz</b>
0,1134	0,3847	0,06516	0,7334	0,19	0,1781	0,5108	0,582	0,01892	1,778
0,5922	0,311	0,1028	0,6893	0,2492	0,1413	0,8825	0,4158	0,05577	1,49
0,5462	0,4944	0,01282	0,7699	0,09291	0,2766	0,727	0,5538	0,5642	1,798
0,5103	0,4909	0,00846	0,8003	0,03759	0,2656	0,7993	0,4864	0,2722	1,785
0,4441	0,4688	0,02802	0,7407	0,02468	0,2167	0,7532	0,4375	0,4262	1,805
0,4433	0,4796	0,04981	0,7419	0,03507	0,1832	0,7241	0,4711	0,4299	1,813
0,45	0,5109	0,04477	0,7619	0,03759	0,1434	0,7098	0,4315	0,6524	1,821
0,4579	0,4815	0,02895	0,7782	0,03526	0,2369	0,7316	0,475	0,6212	1,765
0,4667	0,5099	0,01387	0,7316	0,0118	0,2211	0,7793	0,5387	0,7141	1,734
0,4983	0,4659	0,02314	0,7479	0,01215	0,1932	0,6543	0,5411	0,9824	1,773
0,4945	0,4828	0,01953	0,7549	0,02079	0,2345	0,699	0,591	0,5491	1,755
0,4801	0,4642	0,01615	0,7388	0,01071	0,2422	0,6815	0,5662	0,7681	1,741
0,4536	0,4084	0,04891	0,786	0,05727	0,151	0,7198	0,5472	0,5262	1,814
0,4629	0,4583	0,02639	0,7901	0,06686	0,1583	0,6965	0,5358	0,5985	1,818
0,4851	0,4653	0,01422	0,773	0,01745	0,1841	0,6885	0,5259	0,5751	1,747
0,5172	0,4734	0,03005	0,815	0,02746	0,2078	0,6138	0,5564	0,6065	1,771
0,4901	0,467	0,02081	0,7677	0,0114	0,2099	0,6489	0,5429	0,6558	1,67
0,5061	0,4646	0,04903	0,8029	0,00947	0,2019	0,4446	0,5687	0,5036	1,768
0,5022	0,4708	0,03786	0,8089	0,00792	0,1961	0,7032	0,4852	0,7275	1,786
0,5015	0,5271	0,01697	0,8033	0,0479	0,1346	0,6553	0,485	0,4704	0
0,5101	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Média do Erro (%)</b>									
<b>0,493131805</b>									

Tabela D.5 – Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 400 g.

<b>100 Hz</b>	<b>200 Hz</b>	<b>300 Hz</b>	<b>400 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>600 Hz</b>	<b>700 Hz</b>	<b>800 Hz</b>	<b>900 Hz</b>	<b>1 kHz</b>
0,7793	0,3023	0,5637	0,1654	0,6685	0,447	0,6658	1,694	0,3557	1,019
1,257	0,1913	0,4809	0,2757	0,7068	0,3169	0,7435	1,754	0,4885	1,359
0,079	0,2015	0,5426	0,1765	0,6393	0,479	0,6144	1,608	0,1946	0,9322
0,1447	0,1982	0,5363	0,1673	0,6428	0,4731	0,5679	1,577	0,2287	1,024
0,1438	0,2039	0,5379	0,1813	0,6585	0,4907	0,6246	1,628	0,2023	1,07
0,1584	0,2051	0,536	0,1992	0,6605	0,4219	0,6134	1,643	0,1862	1,038
0,1549	0,2175	0,5194	0,2144	0,6641	0,4259	0,6286	1,637	0,1629	0,9808
0,1558	0,2269	0,5066	0,2264	0,6841	0,4324	0,609	1,643	0,2007	0,9782
0,1608	0,1925	0,4973	0,2185	0,6786	0,4069	0,5933	1,683	0,1794	1,048
0,1506	0,223	0,493	0,2146	0,6567	0,3991	0,6061	1,685	0,1783	1,045
0,1357	0,2301	0,5095	0,1667	0,6301	0,3771	0,6039	1,674	0,2336	1,011
0,1624	0,2228	0,5243	0,194	0,6433	0,4156	0,6126	1,646	0,2148	0,9876
0,173	0,2415	0,5611	0,2043	0,6511	0,4346	0,5685	1,689	0,1993	1,002
0,1549	0,2612	0,528	0,2118	0,6612	0,4385	0,5544	1,675	0,2154	0,9917
0,1656	0,2505	0,5304	0,201	0,6942	0,4482	0,5644	1,681	0,219	0,98
0,1267	0,2108	0,5664	0,1755	0,6427	0,4513	0,574	1,703	0,2601	1,024
0,1377	0,218	0,5519	0,1854	0,6526	0,4077	0,5651	1,732	0,2368	0,9388
0,1325	0,2198	0,538	0,1667	0,6367	0,394	0,5919	1,664	0,1851	0,9475
0,09864	0,2307	0,5393	0,1767	0,6193	0,4281	0,584	1,698	0,2094	0,9701
0,1017	0,1957	0,5217	0,2115	0,5837	0,4609	0,6018	1,701	0,2199	0
0,1036	0,2013	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Média do Erro (%)</b>									
<b>0,522191091</b>									

Tabela D.6 – Picos Máximos Detectados para o Erro (%) Médio para 500 g.

<b>100 Hz</b>	<b>200 Hz</b>	<b>300 Hz</b>	<b>400 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>600 Hz</b>	<b>700 Hz</b>	<b>800 Hz</b>	<b>900 Hz</b>	<b>1 kHz</b>
0,6025	0,7136	1,13	0,4338	0,7382	0,7714	0,3071	0,2539	0,7121	0,6214
0,6187	0,785	1,141	0,3984	0,7079	0,6032	0,4152	0,3875	0,8121	0,737
0,6218	0,7036	1,196	0,5409	0,7958	0,808	0,3274	0,241	0,5651	0,447
0,5011	0,6571	1,182	0,5773	0,7997	0,8026	0,2286	0,2704	0,5914	0,4415
0,5221	0,7751	1,211	0,5417	0,7963	0,8356	0,2735	0,2261	0,6179	0,5134
0,5427	0,8178	1,166	0,5478	0,7499	0,8188	0,2556	0,2192	0,5259	0,3917
0,58	0,7551	1,18	0,5163	0,7762	0,8162	0,2742	0,2126	0,6086	0,4366
0,5793	0,7513	1,208	0,5325	0,7545	0,8165	0,2735	0,2539	0,5756	0,463
0,5153	0,7482	1,228	0,527	0,8208	0,813	0,2558	0,1929	0,5995	0,428
0,5332	0,7159	1,169	0,4559	0,8212	0,779	0,2787	0,1853	0,5803	0,3898
0,5624	0,6802	1,198	0,5335	0,8184	0,7648	0,2045	0,2532	0,5617	0,3714
0,544	0,6761	1,238	0,5051	0,8458	0,7768	0,1992	0,3216	0,5965	0,3807
0,5077	0,7309	1,186	0,5001	0,8749	0,7699	0,2021	0,3257	0,5304	0,3851
0,5666	0,7473	1,167	0,5196	0,8836	0,7731	0,2658	0,2963	0,6267	0,4424
0,557	0,7448	1,114	0,5928	0,8702	0,8002	0,2611	0,3416	0,6021	0,4102
0,5106	0,736	1,129	0,548	0,8716	0,8725	0,2768	0,3324	0,5958	0,4396
0,5332	0,7313	1,17	0,4907	0,8844	0,8154	0,2801	0,2653	0,5334	0,445
0,5695	0,7009	1,085	0,5093	0,8459	0,7672	0,2079	0,3857	0,5497	0,4064
0,5171	0,6983	1,159	0,4654	0,9192	0,8501	0,2872	0,3289	0,5239	0,4059
0,5297	0,734	1,141	0,5424	0,9189	0,7837	0,3029	0,3175	0,5728	0
0,4924	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Média do Erro (%)</b>									
<b>0,561559545</b>									