



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Eduardo Abuhamad Petrocino

Monitoramento de Integridade Estrutural e de Sistemas Utilizando Dispositivos de Baixo Custo

Bauru
2015

Eduardo Abuhamad Petrocino

Monitoramento de Integridade Estrutural e de Sistemas Utilizando Dispositivos de Baixo Custo

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Paulo José Paupitz Gonçalves

Co-orientador: Dr. Marcos Silveira

**Bauru
2015**

Petrocino, Eduardo Abuhamad.

Monitoramento de Integridade Estrutural e de
Sistemas Utilizando Dispositivos de Baixo Custo /
Eduardo Abuhamad Petrocino, 2015
81 f.

Orientador: Dr. Paulo José Paupitz Gonçalves; Co-
orientador: Dr. Marcos Silveira

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015

1. Integridade Estrutural. 2. Dinâmica não-linear.
3. Baixo custo. I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Monitoramento de
Integridade Estrutural e de Sistemas Utilizando
Dispositivos de Baixo Custo.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE EDUARDO ABUHAMAD PETROCINO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 16 dias do mês de dezembro do ano de 2015, às 10:00 horas, no(a) Sala de reuniões da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO JOSE PAUPITZ GONCALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. BENTO RODRIGUES DE PONTES JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. MICHAEL JOHN BRENNAN do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de EDUARDO ABUHAMAD PETROCINO, intitulado "MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL E DE SISTEMAS UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE BAIXO CUSTO". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. PAULO JOSE PAUPITZ GONCALVES


Prof. Dr. BENTO RODRIGUES DE PONTES JUNIOR


Prof. Dr. MICHAEL JOHN BRENNAN

À Professoressa Norma...

'O conhecimento que temos das coisas é pequeno, na verdade, quando comparado com a imensidão daquilo em que ainda somos ignorantes'

Pierre Simon Laplace

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Dr. Paulo José Pauptiz Gonçalves, cuja paciência e dedicação são imensuráveis, pela confiança depositada em mim e pelos ensinamentos em todo o processo da realização deste trabalho

Agradeço ao meu co-orientador Dr. Marcos Silveira que me apresentou a arte da simulação numérica em dinâmica não-linear na disciplina Métodos Numéricos e Simulação em Dinâmica Não-linear.

Agradeço aos professores Dr. Bento Rodrigues de Pontes Jr., Dr. Osvaldo Luís Manzoli e Dr. Edson Antônio Capello Souza pelos valorosos ensinamentos que foram primordiais para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu amigo Me. Fransber Santade na qual me incentivou desde o começo e ajudou imensamente durante todo o período das pesquisas sem esperar alguma retribuição.

Agradeço ao Eng. Wagner Gomes, que ao me contratar em uma época problemática, possibilitou o término da minha graduação.

Agradeço ao auxiliar docente Marcos Antônio Roque e ao docente Eng. Fioravante T. Neto da ETEC Jacinto Ferreira de Sá pela ajuda na montagem da bancada e à equipe do curso de eletrônica/eletrotécnica pelo empréstimo dos instrumentos de medida.

Agradeço aos Senhores Ronald Belford Scott da banda AC/DC e John Michael Osbourne da banda Black Sabbath pela inspiração e por me ajudarem a me manter acordado.

Agradeço finalmente à minha esposa Rute, meus filhos Norma e Fabrício que sempre me apoiaram com muito carinho.

Resumo

O monitoramento da integridade de estruturas e máquinas é um tema que vem tomando importância em diversas aplicações de engenharia. A possibilidade de programar ciclos de manutenção mais otimizados aumenta a disponibilidade do uso de diversos sistemas, desde linhas de produção a sistemas de transporte como aeronaves e veículos terrestres. Uma das formas de avaliar a integridade de um sistema mecânico é feita por meio da captura de sinais de vibração e do uso de sistemas eletrônicos para o pós processamento destes sinais. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para monitoramento da integridade de uma estrutura. Sensores piezoelétricos são utilizados para captura de sinais de vibração e um circuito eletrônico foi desenvolvido para o condicionamento destes sinais que são então adquiridos por um microcontrolador lógico programável Arduino através de um conversor analógico/digital. Para o estudo das variações estruturais, utiliza-se um sistema constituído por um motor elétrico com desbalanceamento em seu eixo rotativo sobre uma viga bi-apoiada. Variações estruturais são feitas por acréscimo de massas pontuais ao longo do comprimento da viga, e também por inserção de força magnetomotriz interagindo com um ímã em um ponto fixo na viga. Os resultados obtidos mostram ser possível monitorar variações estruturais por meio de um sistema de baixo custo com uma análise estatística apropriada no tratamento do sinal.

Palavras-chave: Integridade Estrutural, Dinâmica não-linear, Baixo Custo

Abstract

Monitoring the integrity of structures and machines is an issue that has been taking importance in several engineering applications. The ability to program more optimized maintenance cycles increases the autonomy of the use of various systems, from production lines to transport systems such as aircraft and ground vehicles. One way of evaluating the integrity of a mechanical system is made by capturing vibration signals and the use of electronic systems for the post processing of these signals. In this context, the aim of this study is to develop a low-cost system for monitoring the integrity of a structure. Piezoelectric sensors are used to capture vibration signals and an electronic circuit has been developed for the conditioning of these signals are then acquired by a logical Arduino programmable microcontroller via an analog / digital converter. To study the structural changes we use a system constituted by an electric motor with unbalance in its rotary axis on a bi-supported beam. Structural variations are made by addition of point masses along the length of the beam, and also by insertion magnetomotive force interacting with a magnet at a fixed point on the beam. The results show that it is possible to monitor structural variations by means of a low-cost system with a suitable statistical analysis treatment samples

Keywords: Structural Health, Nonlinear dynamics, Low Cost

Lista de Figuras

1.1	Representação do sistema utilizado	3
2.1	Estruturas flexíveis com motores eletricos acoplados a)Balthazar et al. 2003 e b)Felix et al. 2005	5
3.1	Representação de um sistema massa-mola-amortecedor acoplado a um motor de corrente contínua (CC) com massa desbalanceada	8
3.2	Gráfico do torque em função da velocidade angular	10
3.3	Os dois primeiros modos de vibrar de uma viga bi-apoiada	11
3.4	Velocidade angular do rotor em função do tempo	12
3.5	Amplitude do deslocamento na direção y	13
3.6	Amplitude do deslocamento na direção x	13
3.7	Amplitude do deslocamento na direção y com massa do sistema (M) 20% menor	14
3.8	Amplitude do deslocamento na direção x com massa do sistema (M) 20% menor	14
3.9	Amplitude do deslocamento na direção y com massa do sistema (M) 20% menor	15
3.10	Amplitude do deslocamento na direção x com massa do sistema (M)20% menor	15
4.1	Bancada de ensaios com todos os componentes	17
4.2	Estrutura cristalina de cerâmica piezelétrica	18
4.3	Circuito elétrico equivalente ao sensor piezelétrico	19
4.4	Curva característica da impedância em função da frequência de um cristal pzt	19
4.5	Sensor Piezelétrico	20
4.6	Chave Óptica	20
4.7	Esquema elétrico do circuito amplificador/grampeador	21
4.8	Circuito montado com os pontos de acesso, controles e alimentação	22
4.9	Adaptação do sinal para ser transmitido ao Arduino	22
4.10	Microcontrolador Atmega328P	23
4.11	Descrição do Microcontrolador Arduino UNO REV 3	24
5.1	Visão Geral do Sistema	25
5.2	Princípio de funcionamento da chave óptica	26
5.3	Princípio de funcionamento da chave óptica	26
5.4	Tela do osciloscópio indicando a forma de onda gerada pelo elemento piezoelétrico	27

5.5	Tela do osciloscópio indicando a forma de onda processada pelo circuito amplificador/grampeador	28
5.6	Etapas de digitalização de um sinal analógico	29
5.7	Sinal reconstituído após o processo de aquisição	31
5.8	Tensão RMS do sensor piezoelétrico em função da tensão média aplicada ao motor	32
5.9	Coefficiente do momento de assimetria da tensão do sensor piezoelétrico em função da tensão média aplicada ao motor	33
5.10	Coefficiente do momento de curtose da tensão do sensor piezoelétrico em função da tensão média aplicada ao motor	33
5.11	Acelerômetro utilizado para comparação	34
5.12	Medidas RMS do acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor	34
5.13	Assimetria da medida do acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor	36
5.14	Grau de achatamento da distribuição das amostras do acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor	36
5.15	Acréscimo de massa à viga	37
5.16	Tensão eficaz (RMS) fornecida pelo pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com acréscimo de massa em dois pontos distintos	37
5.17	Grau de assimetria fornecida pelas amostras do pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com acréscimo de massa em dois pontos distintos	38
5.18	Curtose da distribuição das amostras fornecida pelo pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com acréscimo de massa em dois pontos distintos	38
5.19	Eletroíma 12V e ímã de neodímio fixado na viga	39
5.20	Tensão eficaz fornecida pelo pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com alterações de rigidez	39
5.21	Assimetria das amostras da tensão pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com alterações de rigidez	40
5.22	Curtose da tensão do pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com alterações de rigidez	40
6.1	Curva da frequência do rotor e consumo de potência medida em função da tensão aplicada ao motor cc	41
6.2	RMS das tensões geradas pelo pzt em função da tensão média aplicada ao motor cc	42
6.3	Assimetria das tensões geradas pelo pzt em função da tensão média aplicada ao motor cc	43
6.4	Curtose das tensões geradas pelo pzt em função da tensão média aplicada ao motor cc	44
6.5	RMS das tensões geradas pelo acelerometro em função da tensão média aplicada ao motor cc	45
6.6	Assimetria das tensões geradas pelo acelerometro em função da tensão média aplicada ao motor cc	46
6.7	Curtose das tensões geradas pelo acelerometro em função da tensão média aplicada ao motor cc	46

6.8	RMS das amostras do piezo e acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor cc	48
6.9	Coefficiente de assimetria das amostras do piezo e acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor cc	49
6.10	Coefficiente de curtose das amostras do piezo e acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor cc	50
A.1	Variações dos comando de duty-cycle pela tensão medida	55
A.2	Formas de onda de modulação por largura de pulso para várias larguras de pulso	56

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros iniciais utilizados nas simulações	11
-----	---	----

Lista de símbolos

Letras latinas

Símbolo	Descrição
c	Coefficiente de amortecimento viscoso
f	Frequência
fa	Frequência de amostragem
J_0	Momento de inércia
k	Rigidez do modelo equivalente
M	Massa do sistema viga+motor
m_r	Massa do desbalanceamento
R	Resistência Elétrica
t	Variável independente do domínio do tempo
x	Posição horizontal adotada
y	Posição vertical adotada
\mathfrak{M}	Torque aplicado ao motor

Letras Gregas

Símbolo	Descrição
ω	Frequência de excitação
ω_n	Frequência natural do sistema
Ω_0	Velocidade angular do motor a vazio
Φ	Posição angular
σ	Desvio padrão
τ	Largura do pulso com tensão

Lista de abreviações

<i>AMP – OP</i>	Amplificador Operacional
<i>DAQ</i>	Data Acquisition - Aquisição de dados
<i>LABVIEW</i>	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
<i>PC</i>	Personal Computer - Computador Pessoal
<i>PCM</i>	Pulse Code Modulation - Modulação por Código de Pulso
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation - Modulação por Largura de Pulso
<i>PZT</i>	$Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$ - Titanato Zirconato de Chumbo
<i>RMS</i>	Root Mean Square - Raiz Média Quadrática
<i>SMIE</i>	Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural
<i>TTL</i>	Transistor-Transistor Logic - Lógica Transistor-Transistor
<i>UART</i>	Universal Asynchronous Rx/Tx - Recepção/Transmissão Assíncrona Universal
<i>USB</i>	Universal Serial Bus - Barramento Serial Universal

Publicações

Trabalhos completos publicados em anais de congresso:

PETROCINO, E. A. ; SANTADE, F. ; FERREIRA, R. F. ; SILVEIRA, M. ; GONCALVES, P. J. P. . Desenvolvimento de Um sistema Eletrônico para Monitoramento da Integridade Estrutural de Uma Viga Bi-apoiada., 2014, Uberlândia. CONEM2014 - VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.

Trabalho aceito para publicação:

PETROCINO, E. A. ; GONCALVES, P. J. P. ; FERREIRA, R. F. . Experimental analysis of behavior in a bi-supported beam with excitement of a non-ideal source and variations of stiffness and mass. COBEM 2015, 2015, Rio de Janeiro. 23rd ABCM International Congresso of Mechanical Engineering.

Artigos completos publicados em periódicos

GONÇALVES, P. J. P. ; SILVEIRA, M. ; PETROCINO, E. A. ; BALTHAZAR, J. M. . Double resonance capture of a two-degree-of-freedom oscillator coupled to a non-ideal motor. *Meccanica (Milano. Print)*, v. 2015, p. 1-12, 2015.

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Lista de Símbolos	xi
Lista de Abreviações	xii
Publicações	xiii
1 Introdução	1
1.1 Introdução ao problema	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Visão Geral do Sistema Estudado	2
1.4 Estrutura do Trabalho	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Estruturas flexíveis excitadas por fontes de potência limitada (<i>não ideal</i>)	4
2.2 Sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SMIE) e métodos de identificação de dano	5
3 Modelamento matemático	8
3.1 Equações de Energia	9
3.2 Simulações Numéricas	11
4 Desenvolvimento do SMIE	17
4.1 Composição do sistema	17
4.2 Sensor Piezelétrico	17
4.3 Chave Óptica	20
4.4 Circuito amplificador e grampeador	21
4.5 Microcontrolador Arduino UNO REV3	22
5 Procedimento Experimental	25
5.1 Monitoramento da rotação	25
5.2 Calibração do circuito amplificador/grampeador	27
5.3 Aquisição dos sinais	28
5.4 Programação do arduino	30
5.5 Obtenção das curvas padrões	30
5.6 Simulações de dano	35

6	Análise dos Resultados	41
6.1	Análises individuais	42
6.1.1	Análise dos resultados utilizando SMIE desenvolvido	42
6.1.2	Análise dos resultados utilizando o acelerômetro e LABVIEW	44
6.2	Análises Comparativas	45
7	Conclusões e propostas futuras	51
7.1	Conclusões	51
7.2	Propostas para trabalho futuros	52
	Referências Bibliográficas	53
A	Geração da força eletromotriz por PWM	55
B	Chassis NI PXIe-1078	57
C	Controlador NI PXIe-8115	59
D	Módulo de Aquisição NI PXIe-4492	60
E	Acelerômetro PCB 352C33	62
F	Arduino UNO REV3 esquemático	64

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução ao problema

O interesse em estudar a integridade estrutural e detectar danos no estágio mais precoce possível vem sendo almejado pelas engenharias com intuito de prevenir desastres, prejuízos financeiros, tempo de manutenção e principalmente reduzir riscos de morte. Em termo prático e genérico, dano em estruturas pode ser definido como alterações indesejáveis introduzidas em um sistema ideal. Tais alterações globais, podem ser tanto geométricas, ocorrendo deformações, como também nos parâmetros que definem as propriedades do material, como alterações de rigidez ou massa.

Realizar medidas com periodicidade constante pode trazer diversas informações importantes do estado da integridade da estrutura e possíveis variações estruturais, podendo caracterizar danos em seu estado inicial. Estruturas muito empregada nas engenharias mecânica, civil e aeronautica são as estruturas flexíveis com motores acoplados em sua extensão, como exemplo asas de aviões com turbinas ou hélices e guindastes de embarcações ou industriais tipo pórtico. Um motor elétrico sobre uma estrutura flexível tende, após um determinado tempo, com acúmulo de partículas, ou com assimetria magnética ou mesmo desgaste de seus componentes, a ficar desbalanceado em seu eixo, tornando-se uma fonte de excitação mecânica vibratória. A rotação do motor, para algumas estruturas, pode, em sua aceleração, coincidir com a frequência natural de um ou mais modos de vibrar desta estrutura, acarretando efeitos muitas vezes indesejáveis. Um dos efeitos é a captura da frequência de rotação de um motor elétrico, fazendo com que a energia acoplada seja transferida para o deslocamento da vibração e não para aumento da rotação, neste caso, os motores elétricos possuem uma limitação de potência, pois o torque é transferido para o ponto de acoplamento na estrutura até o instante da saída da largura de faixa da ressonância, observando-se que o intervalo de tempo com que a rotação passa pela frequência natural do sistema é fundamental para sua análise, tal efeito é denominado "Efeito Sommerfeld" (Sommerfeld, 1904).

Alguns dos métodos utilizados para a detecção de falhas estruturais podem ser feitos

pela alteração do modo de vibrar, ou pela alteração dos parâmetros da captura de ressonância, com posterior análise de sinais capturados e seguido pelo seu pós-processamento. Pode-se, com isso, utilizar os parâmetros de amplitudes capturados em uma faixa de rotação para determinar se houve mudanças significativas na estrutura como por exemplo, um dano provocado por alteração de massa ou uma alteração na composição cristalina como elasticidade, tendo sua rigidez afetada pelo tempo ou uso frequente. Uma resposta de deslocamento por rotação de uma estrutura sadia em funcionamento pode servir de referência para monitoração em tempo real, e neste contexto, é realizado os testes para desenvolver um sistema que monitore essas alterações em função da vibração ocorrida em uma determinada largura de faixa e ainda, como um dos fatores mais preponderantes, é deixar seu custo de produção baixo, para servir como proposta de estudos em diversos segmentos da indústria e pesquisa.

Os sistemas de monitoração de integridade estrutural, em geral, possuem custos que permitem o uso em laboratórios de grandes entidades ou corporações, porém torna seu custo proibitivo para diversas instituições de menor porte e pesquisadores. A motivação maior é conseguir um sistema que tenha um custo realmente baixo, para assim, poder ser praticamente desprezado no orçamento da estrutura, viabilizando economicamente sua implementação.

1.2 Objetivos

Os objetivos do trabalho são:

- 1 - Obter um sistema de monitoramento de integridade estrutural (SMIE), o qual seja confiável.
- 2 - Estudar a interação eletromecânica de um motor como fonte não-ideal de potência acoplado à uma viga flexível e explorar suas características para identificação de dano.
- 3 - Avaliar esse sistema com os sistemas de aquisições existentes.
- 4 - Verificar os métodos estatísticos mais apropriados para a identificação de dano.

1.3 Visão Geral do Sistema Estudado

Para a realização dos ensaios de monitoramento de integridade estrutural foi construída uma bancada com uma viga fixada em uma base de madeira cuja visão geral é demonstrada na figura 1.1

A estrutura é do tipo pórtico, composta por uma viga de aço inoxidável AISI 304 ASTM A240 de 400mm de comprimento por 24mm de largura e 1,21mm de espessura, rebitada em uma chapa também de inox com dimensões semelhantes, duplamente dobrada para sua fixação em uma base de madeira.

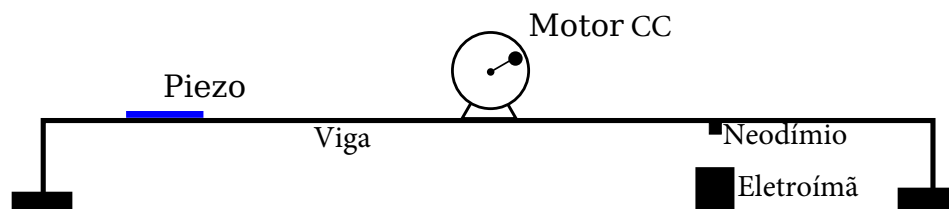


Figura 1.1: Representação do sistema utilizado

No centro longitudinal da viga, tem-se um motor de corrente contínua de 5,6V contendo em seu rotor, uma massa não centralizada de forma a promover um desbalanceamento no seu eixo de rotação. A fixação do motor cc foi feita por uma braçadeira de alumínio parafusada à viga.

Em um dos lados à um quarto do comprimento partindo da aresta, tem-se um eletroímã de 12V fixado à bancada e à mesma distância, um neodímio fixado à viga, os dois terão a interação de uma força magnetomotriz controlada pela tensão aplicada ao eletroímã tornando proporcionalmente a viga mais rígida.

Massa adicional sera fixada em pontos conhecidos, sua fixação será feita pela atração magnética de dois neodímios e o sensor pzt está colado na viga longitudinalmente do outro lado, conforme mostrado na figura 1.1.

1.4 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho encontra-se dividida nos seguintes capítulos:

◇ Capítulo 2

Neste capítulo tem-se a revisão bibliográfica que foi utilizada como base para o desenvolvimento desta dissertação.

◇ Capítulo 3

Modelamento matemático do sistema

◇ Capítulo 4

Este capítulo descreve a montagem da bancada de testes e do sistema de monitoramento de integridade estrutural, com os componentes individualmente classificados quanto à seus aspectos construtivos e seu funcionamento.

◇ Capítulo 5

Este capítulo contém todo os procedimentos experimentais utilizados para a obtenção dos resultados.

◇ Capítulo 6

Neste capítulo foram feitas as análises dos resultados obtidos.

◇ Capítulo 7

Neste capítulo estão as conclusões e propostas futuras

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica está dividida em duas subseções para haver uma melhor organização cronológica em relação ao foco principal do tema.

2.1 Estruturas flexíveis excitadas por fontes de potência limitada (*não ideal*)

Para a escolha do formato da bancada de testes, levou-se em consideração várias configurações e a mais atraente foi a viga bi-apoiada, do tipo pórtico, tendo em vista principalmente suas aplicações práticas utilizadas na indústria e em termos científicos, o comportamento não-linear desse sistema proporcionando variedades nos resultados, ora periódicos, ora quase-periódicos e ora caóticos e também pelo fato que engastes perfeitos não são fáceis de se conseguir na construção de um sistema com certa portabilidade. Belato et al. (2001) estudaram através de simulações numéricas o comportamento de um pêndulo excitado com um motor cc resultando nas proximidades da ressonância do sistema oscilações multi-periódicas, quase-periódicas e caóticas. Semelhante estudo feito por Tsuchida et al. (2003) realizando simulações com torques lineares e não lineares considerando um motor cc atuando em um sistema com dois graus de liberdade, percebendo que a linearidade do torque não implica em deslocamentos regulares. Dois anos após, Tsuchida et al. (2005) realizou semelhantes simulações com foco no comportamento de captura, o efeito sommerfeld, vendo sua contribuição para as irregularidades na dinâmica do sistema. Por meio de simulações, Samantaray (2008) realizou estudos envolvendo rotor com amortecimento induzido, excitado por fonte não-ideal, verificando a velocidade angular pela tensão aplicada pela passagem do salto causado pelo efeito sommerfeld.

Em Felix et al. (2009), mostraram a influencia de parâmetros como rigidez e o amortecimento de uma viga engastada na quantificação do efeito sommerfeld, inclusive que com a variação destes parâmetros é possível reduzir drasticamente ou até mesmo extin-

guir tal efeito. No mesmo ano, Zukovic e Cveticanin (2009) também foram realizadas simulações com motor cc desbalanceado, com análise focada sobre a influência da folga em sistemas mecânicos, ao longo das simulações, verificou que mesmo com folga o efeito sommerfeld persiste, a folga influencia na amplitude da resposta em frequência e em determinados valores de parâmetros caso exista a folga, o movimento caótico aparece, sendo que o controle ideal deste é no oscilador e não no motor. No ano seguinte Cvetićanin (2010) publicou esta revisão sobre dinâmica de sistemas mecânicos não-ideais abordando discussões de vários modelos de sistemas não ideais, com atenção em especial para este trabalho dada aos modelos de motor cc como fonte não-ideal em pórticos de Balthazar et al. (2003) e Felix et al. (2005) conforme Figura 2.1.

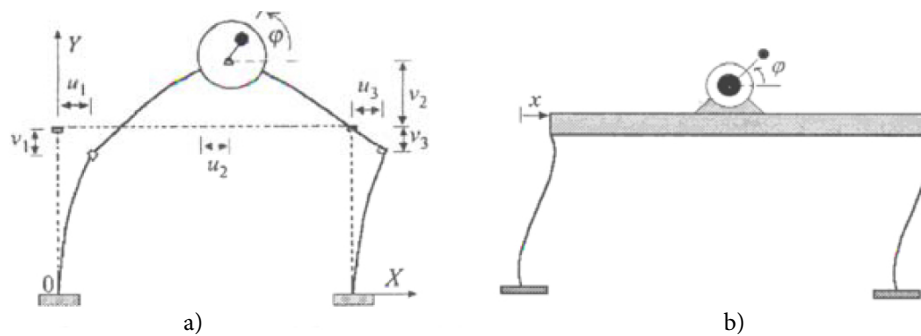


Figura 2.1: Estruturas flexíveis com motores elétricos acoplados a)Balthazar et al. 2003 e b)Felix et al. 2005

Castão et al. (2011) estudou a redução do efeito do fenômeno de captura do efeito sommerfeld utilizando amortecimento magneto-reológico, demonstrando o efeito deste parâmetro sobre a passagem pela ressonância. Gonçalves et al. (2014) realizaram um estudo do comportamento dinâmico de uma viga engastada com um motor cc desbalanceado como fonte não ideal de excitação com modelamentos analíticos e numéricos, simulações numéricas computacionais e ensaios laboratoriais.

2.2 Sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SMIE) e métodos de identificação de dano

Elementos piezelétricos começaram a ser estudados por Curie e Curie (1880) em geração de cargas elétricas por meio de pressão aplicada a cristais. No ano seguinte, Lippmann (1881) estudou o efeito reverso, da aplicação de diferença de potencial elétrico em cristais já denominados de piezelétricos, obtendo deformações mecânicas.

Em sua tese de PhD, Rytter (1993) descreve a utilização de inspeção baseada na vibração e análise modal para determinar um dano estrutural e estimar a vida útil

do sistema. Também caracteriza o sistema de identificação de dano em quatro níveis: O nível um consiste na determinação dos danos causados está presente na estrutura; o nível 2, acresce-se a determinação da localização geométrica dos danos; no nível 3, considera-se a quantificação da gravidade da lesão e no nível 4 pretende-se prever a vida útil restante da estrutura. Narkis (1994) realizou simulações em uma viga suportada simples com danos acrescidos ao longo da viga de variações nas vibrações (flexão e axial) e comparando com simulações numéricas calculadas pelo software ANSYS pelo método de elemento finito para sua validação, chegando a conclusão que os dados obtidos entre as duas frequências naturais do sistema já seriam suficientes para a localização do dano.

Doebeling et al. (1998), descreveram em sua revisão, vários métodos de identificação de dano utilizando vibrações mecânicas, dentre eles: detecção de dano baseado em mudanças nas propriedades modais (definidas por frequência de ressonância, amortecimento e modo de forma), métodos baseados na medida dinâmica da flexibilidade, métodos baseados nas modificações das matrizes do modelo estrutural como por exemplo massa, rigidez e amortecimento, tendo o modelo espacial na descrição da estrutura, modelo modal indicando os modos de vibrar e as frequências naturais. Também apresenta o método de matriz ótima por Zimmerman e Kaouk (1994) que também formulou o algoritmo de teoria da perturbação do posto (rank) mínimo na qual demonstram como a perturbação de duas propriedades matriciais podem ser estimadas simultaneamente. Citou outras classes de métodos de modificação de matrizes como exemplo o método baseado na modificação da sensibilidade e método da modificação da matriz híbrida. Em 2004, Sohn et al. (2004) fizeram uma revisão literária de monitoramento de integridade estrutural no intervalo de 1996 a 2001 com definições de dano, integridade e métodos utilizados para a realização do monitoramento da condição da estrutura, na qual envolve sensoramento, aquisição, limpeza e condicionamento de sinais, desenvolvimento de modelos estatísticos para detecção de variações nos parâmetros modais.

Yan et al. (2007) colocaram em seu trabalho técnicas tradicionais de desenvolvimento de métodos de detecção de danos estruturais baseados em vibrações mecânicas, com mudanças na frequência natural, mudanças no modo de vibrar, mudanças na flexibilidade estrutural ou rigidez, mudanças na função de transferência ou resposta em frequência do sistema e baseados nas informações estatísticas. Também citaram o desenvolvimento de técnicas modernas como análise wavelet, redes neurais e método GA. O sensoriamento é de grande importância para o sucesso do monitoramento, e a aplicação de elementos piezelétricos para este fim foram explicadas por Park et al. (2006) e Wang et al. (2009), este último especificamente para estruturas de concreto. Guechaichia e Trendafilova (2011) realizaram experimentos de detecção de dano aplicando forças estáticas ao longo de uma viga, conseguindo detectar e localizar o dano somente com a primeira frequência natural do sistema. O equipamento para aquisição é utilizado o Arduino UNO baseado no microcontrolador ATmega328 cuja especificações estão em Atmel (2013) e sua

programação baseada em C++, denominada Wiring possui um conjunto de bibliotecas que podem ser consultadas na página eletrônica de referências (Arduino. . . ,).

Para análises e processamento dos sinais, códigos no Matlab para o tratamento utilizando série discreta de fourier e espaço de estados podem ser compreendidos e exemplificados em Lathi (2007), algumas técnicas estatísticas são necessárias para manipulação das amostras, em 2005, Hadjileontiadis et al. (2005) verificaram que muitos ruídos podem interferir na medida do dano e também que os danos teriam que ser de grande amplitude para resultar em pequenas variações das frequências naturais, uma das maneiras de "filtrar" e ganhar sensibilidade nas variações é utilizando a medida do grau de achatamento da distribuição, conhecida como momento de curtose Spiegel (1984).

Capítulo 3

Modelamento matemático

Um modelo matemático simplificado para a estrutura é proposto utilizando uma massa M com elementos mola-amortecedor nas direções x (horizontal) e y (vertical), acoplado à essa massa, uma representação do motor cc cujo eixo desbalanceado pode ser descrito como uma massa m_r na extremidade de um segmento com distância r do centro do motor mostrado na Figura 3.1.

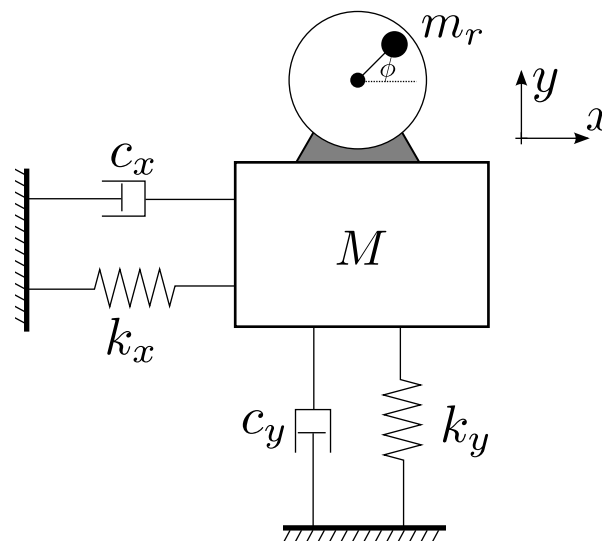


Figura 3.1: Representação de um sistema massa-mola-amortecedor acoplado a um motor de corrente contínua (CC) com massa desbalanceada

Ao ser alimentado por corrente contínua, o motor cc moverá a massa m_r no sentido rotacional em torno do seu centro, provocando o deslocamento angular ϕ , sendo que, essa movimentação, dependendo de sua velocidade e aceleração, implicará em uma atuação no sistema completo, podendo ser melhor compreendida sob a forma das equações de movimento extraída na forma analítica pelas equações de energia e seu Lagrangiano.

3.1 Equações de Energia

Para utilização do princípio de Hamilton, é necessário escrever as expressões de energia potência e cinética em termos das graus de liberdade desconhecidos. A expressão para energia cinética T é obtida:

$$T = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}M\dot{y}^2 + \frac{1}{2}J_0\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) \quad (3.1)$$

O termo J_0 define o momento de inércia do motor, $x_m = x + r \cos\phi$ e $y_m = y + r \sin\phi$ definem a posição da massa desbalanceada do motor mr sendo r a distância da massa ao centro de rotação do motor. A equação 3.1 é então re-escrita na forma:

$$T = \frac{1}{2}(M + m)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}(M + m)\dot{y}^2 + \frac{1}{2}(J_0 + mr^2)\dot{\phi}^2 + mr\dot{\phi}(\dot{y}\cos\phi + \dot{x}\sin\phi) \quad (3.2)$$

Desconsiderando a energia potencial gravitacional, a energia potencial total U do sistema é dada pela equação 3.3

$$U = \frac{1}{2}k_x x^2 + \frac{1}{2}k_y y^2 \quad (3.3)$$

As equações do movimento do sistema são obtidas escrevendo o Lagrangiano, $L = T - U$, e as condições estacionárias de primeira ordem na forma da equação de Hamilton

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = F_i \quad (3.4)$$

Onde F_i é o total das forças não conservativas, que são o amortecimento viscoso $Fd = -C\dot{x}$ e o torque \mathfrak{M} aplicado ao motor é possível obter a equação 3.5 de movimento da massa M na direção x , equação 3.6 de movimento da massa na direção y e a equação 3.7 da aceleração angular do eixo do motor

$$(M + m)\ddot{x} + k_x x + C_x \dot{x} = mr(\dot{\phi}^2 \cos\phi + \ddot{\phi} \sin\phi) \quad (3.5)$$

$$(M + m)\ddot{y} + k_y y + C_y \dot{y} = mr(\dot{\phi}^2 \sin\phi + \ddot{\phi} \cos\phi) \quad (3.6)$$

$$(J_0 + mr^2)\ddot{\phi} = mr(\ddot{x} \sin\phi - \ddot{y} \cos\phi) + \mathfrak{M}(\dot{\phi}) \quad (3.7)$$

Para definir um motor com potência limitada, dois parâmetros são utilizados para representar o torque como função da velocidade angular do motor conforme mostra a equação 3.8

$$\mathfrak{M}(\dot{\phi}) = M_0 \left(1 - \frac{\dot{\phi}}{\Omega_0} \right) \quad (3.8)$$

É possível obter as equações das acelerações de forma isolada resolvendo o sistema de

equações diferenciais lineares representados nas equação 3.9

$$\begin{bmatrix} (M + m) & 0 & -mr \sin \phi \\ 0 & (M + m) & mr \cos \phi \\ -mr \sin \phi & mr \cos \phi & (J_0 + mr^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_x x - c_x \dot{x} + mr \dot{\phi}^2 \cos \phi \\ -k_y y - c_y \dot{y} + mr \dot{\phi}^2 \sin \phi \\ \mathfrak{M}(\dot{\phi}) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Os termos M_0 e Ω_0 são parâmetros do motor que definem uma fonte de energia limitada, é possível perceber que para velocidade angular $\dot{\phi}$ igual ou superior a Ω_0 o torque é zero e quando a velocidade angular $\dot{\phi}$ for zero o torque é máximo, conforme observado na figura 3.2.

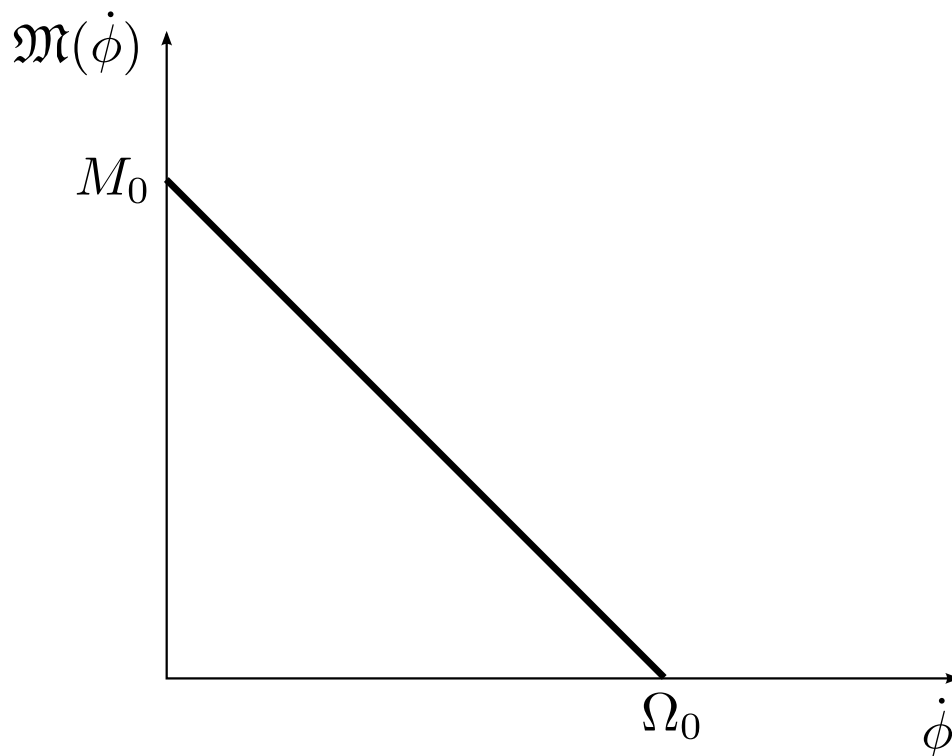


Figura 3.2: Gráfico do torque em função da velocidade angular

Tabela 3.1: Parâmetros iniciais utilizados nas simulações

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa do Sistema (M)	0,0213	kg
Massa do desbalanceamento (mr)	$4,20 \times 10^{-4}$	kg
Coefficiente de rigidez em x (kx)	142.27	N/m
Coefficiente de rigidez em y (ky)	280	N/m
Coefficiente de amortecimento em x (cx)	0,2	Ns/m
Coefficiente de amortecimento em y (cy)	0,27	Ns/m
Raio da massa do desbalanceamento (r)	0,005	m
Constante de torque do motor (M0)	0,00005	

Segundo Jr, Craig (1995), os modos de vibrar de uma viga bi-apoiada pode ser observado na figura 3.3 na qual a) indica o primeiro modo com movimentos predominantemente verticais e b) o segundo modo com predominância em movimentos horizontais.

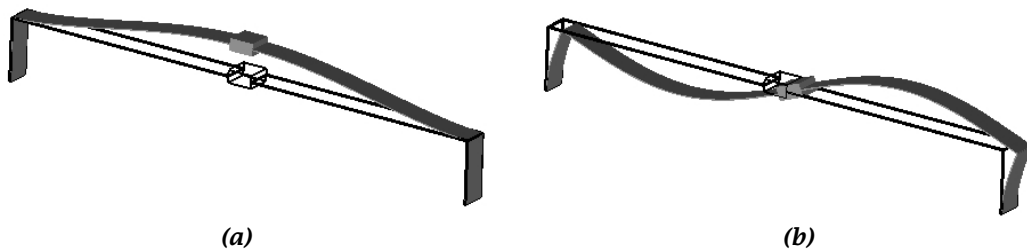


Figura 3.3: Os dois primeiros modos de vibrar de uma viga bi-apoiada

3.2 Simulações Numéricas

Um código fonte criado com entradas de parâmetros que envolvem o sistema, utiliza o método de integração numérica de quarta-quinta ordem de Runge-Kutta, na qual é um método adaptativo, que modifica o tamanho do passo automaticamente ao longo dos cálculos diminuindo o erro de truncamento local, para obter as variações de deslocamentos em função do tempo, cujo comando é ODE45. Para isso, adotou-se valores de parâmetros conforme tabela 3.1 e um tempo de monitoração de 20 segundos.

Um resultado de grande interesse é a velocidade do rotor em função do tempo com incremento constante de tensão aplicado ao motor elétrico cc. A figura 3.4 resultado dos parâmetros iniciais da tabela 3.1 permite observar dois pontos de captura pela ressonância. Em tais pontos, a rotação ficou estagnada na frequência natural do sistema em aproximadamente de três a quatro segundos.

Os gráficos resultantes dos deslocamentos na direção y durante a primeira captura e na direção x durante a segunda captura, observados na figura 3.5 e na figura 3.6

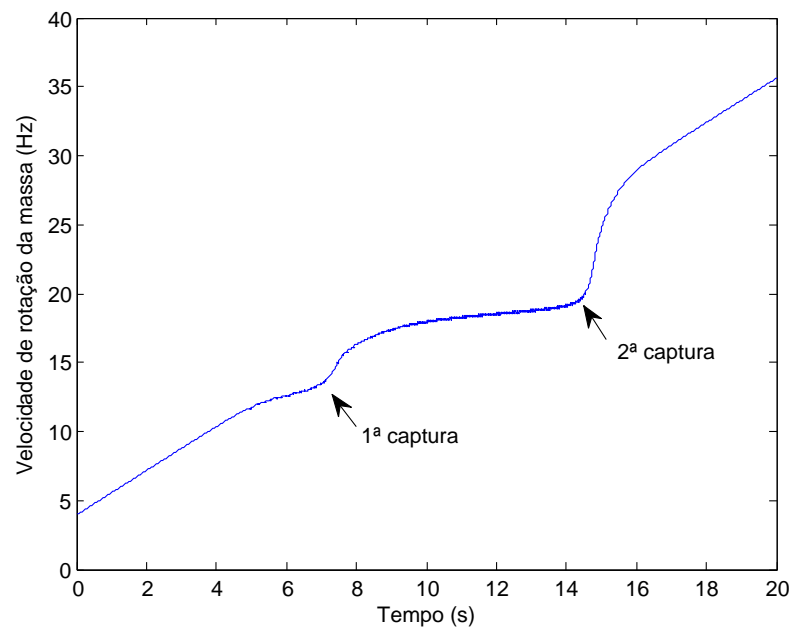


Figura 3.4: Velocidade angular do rotor em função do tempo

respectivamente, possuem os mesmos tempos característicos desta captura, observados no gráfico da rotação em função do tempo.

Com o intuito de observar as mudanças no comportamento da bancada, algumas alterações de parâmetros podem ajudar a prever tais mudanças, como exemplo um acréscimo de 20% de massa no sistema (M), observando na figura 3.7 que o deslocamento na vertical ocorreu antes e com maior brevidade e na figura 3.8 que o deslocamento na horizontal também ocorreu antes e com maior brevidade.

Já com a redução de 20% na massa (M) do sistema, pode-se observar que na figura 3.9 ocorreu um pouco depois e com duração maior e na figura 3.10 também ocorreu um pouco depois e o sistema fica estagnado na segunda captura até o fim da monitoração.

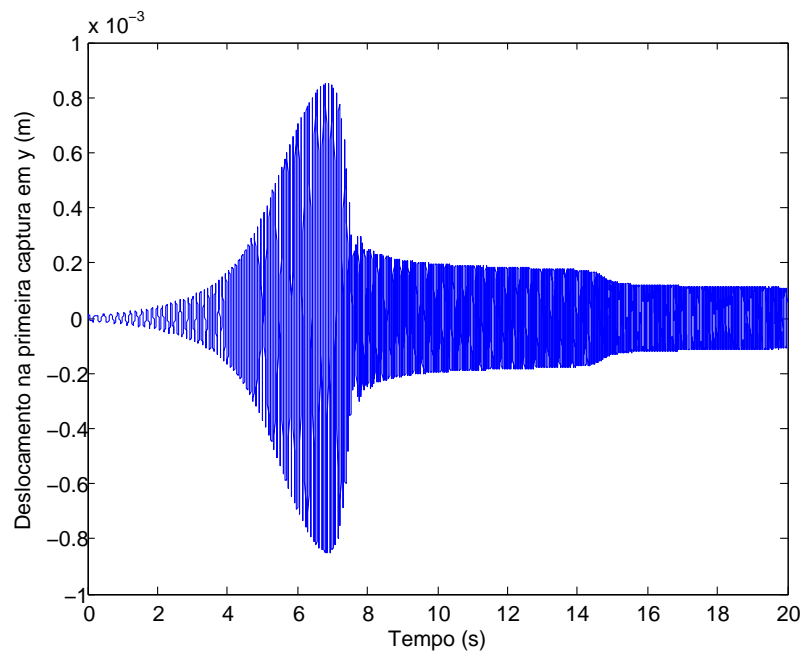


Figura 3.5: Amplitude do deslocamento na direção y

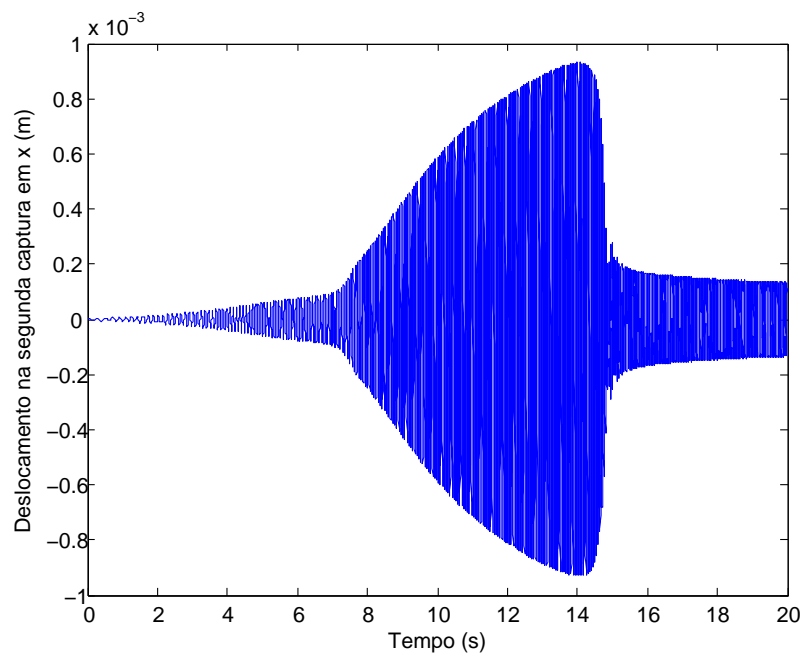


Figura 3.6: Amplitude do deslocamento na direção x

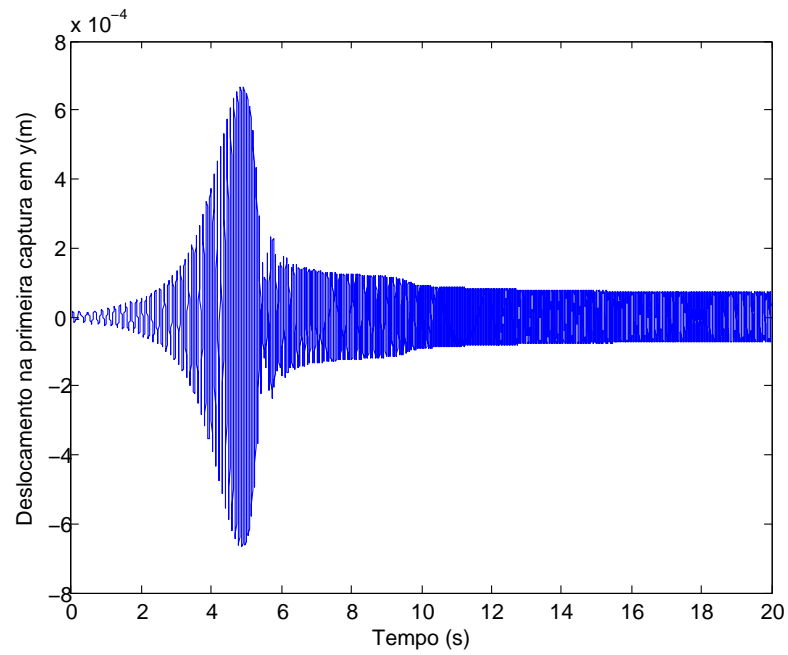


Figura 3.7: Amplitude do deslocamento na direção y com massa do sistema (M) 20% menor

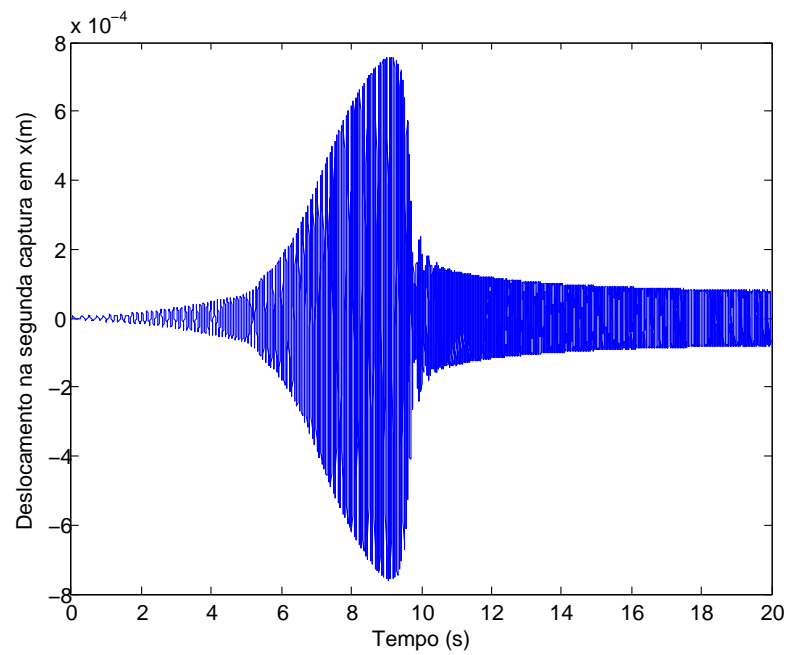


Figura 3.8: Amplitude do deslocamento na direção x com massa do sistema (M) 20% menor

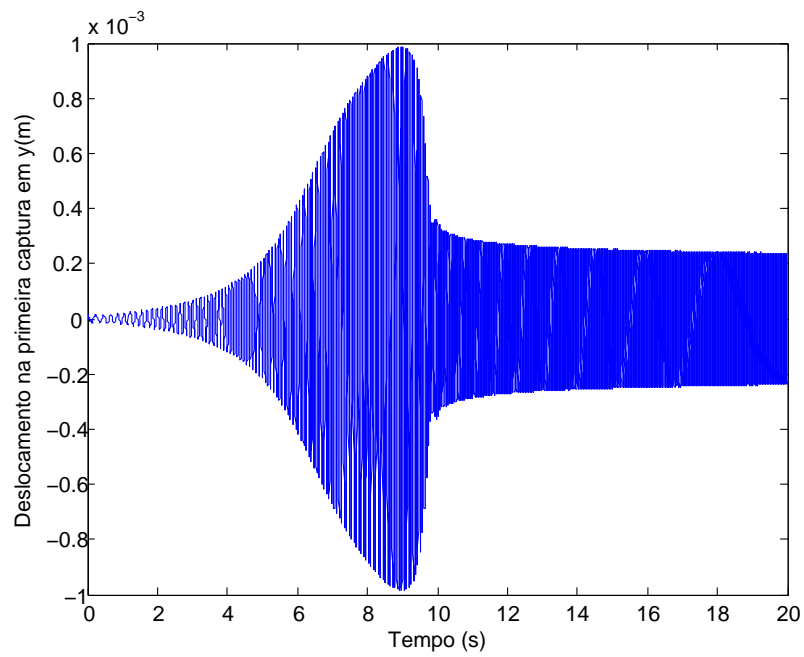


Figura 3.9: Amplitude do deslocamento na direção y com massa do sistema (M) 20% menor

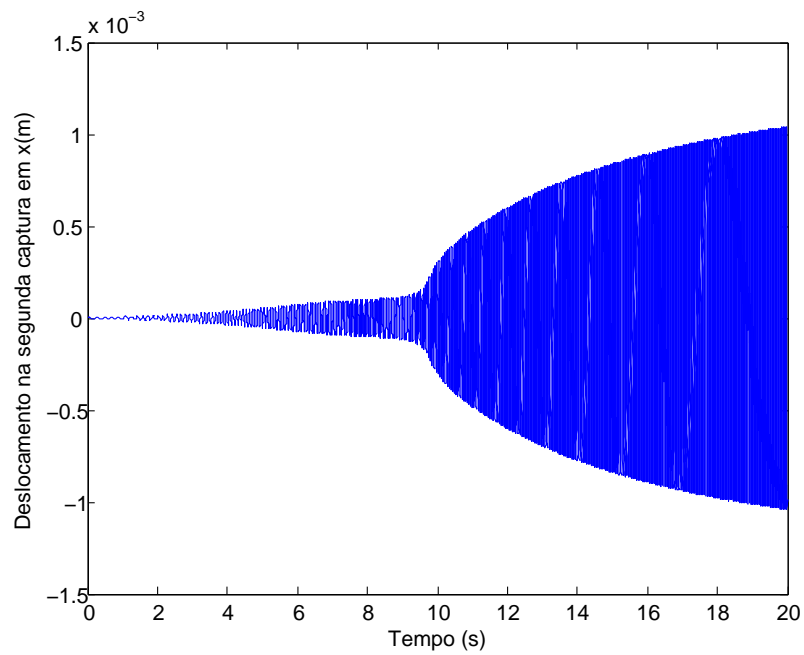


Figura 3.10: Amplitude do deslocamento na direção x com massa do sistema (M) 20% menor

Assim percebe-se que quanto menor for a massa do sistema, maior é a duração da captura pela ressonância podendo estagnar a rotação do motor até o seu limite. Alguns dos resultados obtidos nestas simulações podem ser observados nas resultantes dos ensaios experimentais nos próximos capítulos.

Capítulo 4

Desenvolvimento do SMIE

4.1 Composição do sistema

Definida a bancada, foram fixados na posição dada pelo valor médio entre o centro da viga e uma das arestas um eletroímã na base de madeira e um neodímio na viga e na posição simétrica a essa em relação á outra aresta, um sensor piezelétrico na viga, também foi fixado próximo ao eixo do motor uma chave óptica, conforme pode ser visto na Figura 4.1.

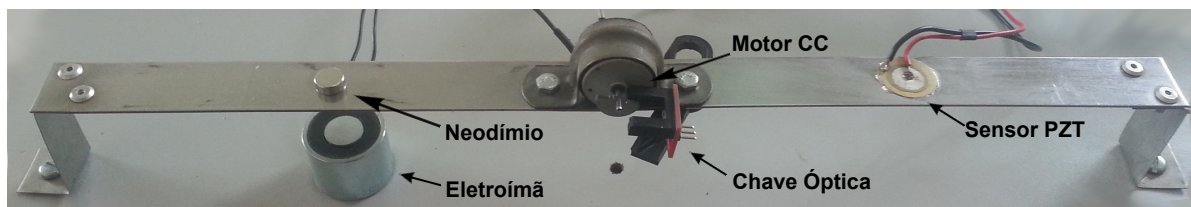


Figura 4.1: Bancada de ensaios com todos os componentes

Cada item que compõe o sistema terá uma descrição de sua funcionalidade.

4.2 Sensor Piezelétrico

Trata-se de um transdutor passivo que converte energia mecânica de excitação em energia elétrica e vice-versa. Isto ocorre graças ao fenômeno de geração de cargas elétricas na superfície do material ao sofrer uma tensão que o deforme, a tal fenômeno designa-se o nome de piezeletricidade. O tipo de corte ou de construção determina a aplicação do elemento piezelétrico, pois a propriedade da piezeletricidade está relacionada com a estrutura cristalina na qual é do tipo Perovskita.

A partir de uma estrutura como observado na Figura 4.2(2), a cerâmica não polarizada está centralizada, chamada de estrutura cúbica, essa situação ocorre quando a temperatura está acima do ponto de Curie, diferentemente da estrutura à esquerda, a

4.2(1), onde a estrutura é conhecida por estar em simetria tetragonal na qual o centro de simetria das cargas elétricas positivas não coincide com o centro de simetria das cargas negativa, gerando um dipolo elétrico. O ponto de Curie define uma temperatura crítica que divide as duas situações mostradas..

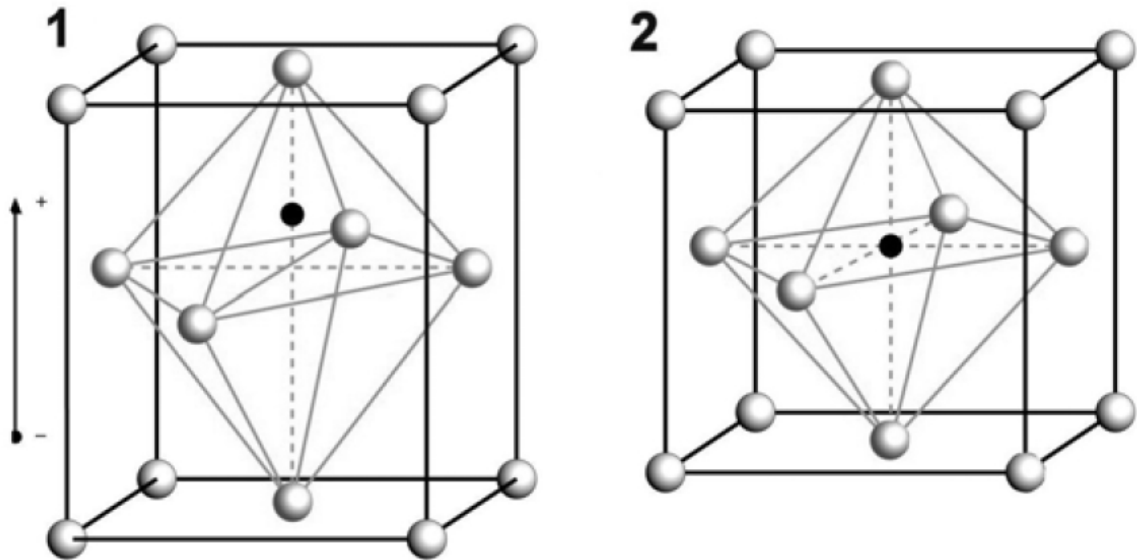


Figura 4.2: Estrutura cristalina de cerâmica piezelétrica

Fonte: Cerâmicas Piezoelétricas: referências e propriedades. ATCP Engenharia, 2010

O circuito elétrico equivalente de um elemento piezelétrico é um circuito RLC ressonante série em paralelo à um capacitor equivalente ao paralelismo dos materiais, como pode ser visto na figura 4.3. A curva característica da impedância em função da frequência revela dois pontos resultantes da impedância na ressonância, que são os pontos de impedância mínima Z_{min} na frequência f_1 e impedância máxima Z_{max} na frequência f_2 conforme figura 4.4 mostra, e exatamente por isso elementos piezelétricos também são largamente utilizados em componentes que promovem estabilidade em circuitos osciladores, denominados de XTAL.

O modelo utilizado é o KS-182T30, onde pela nomenclatura pode-se determinar seus dados como: KS - código do fabricante, 18 - diâmetro em mm, 2 - uso externo, T - material: latão e 3.0 - frequência de ressonância em kHz. Detalhes de suas dimensões e aspecto construtivo é encontrado na Figura 4.5. Sua função então, neste projeto é sentir as vibrações da viga na qual está fixado e converter proporcionalmente os deslocamentos em energia elétrica.

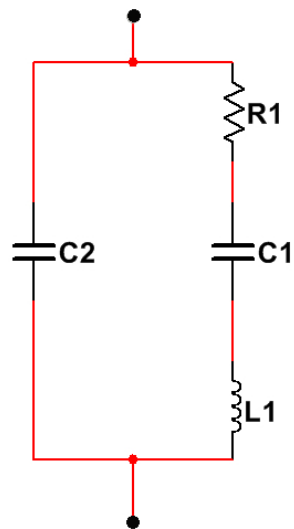


Figura 4.3: Circuito elétrico equivalente ao sensor piezelétrico

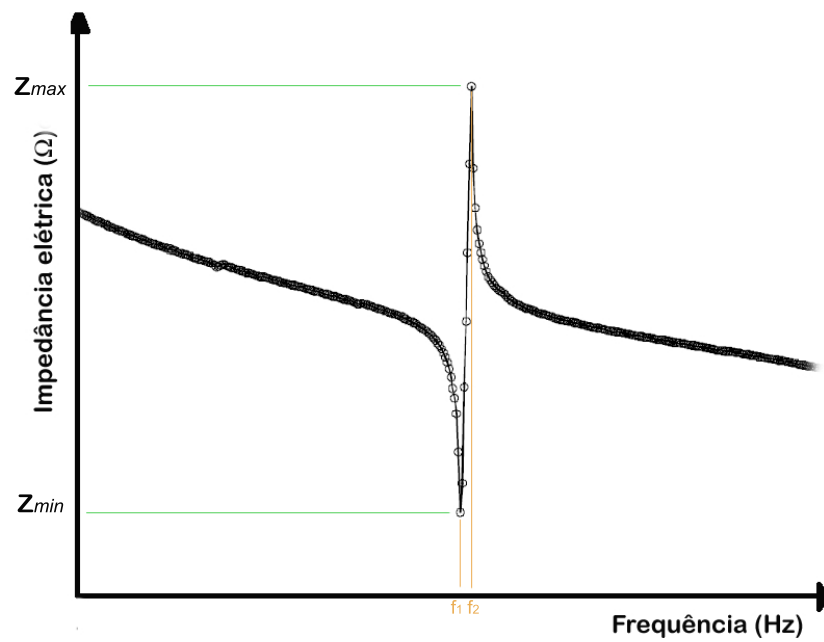


Figura 4.4: Curva característica da impedância em função da frequência de um cristal pzt

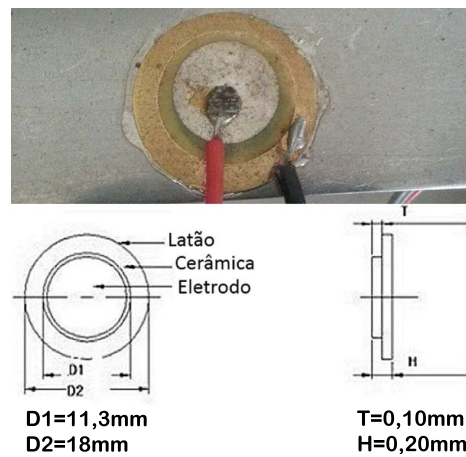


Figura 4.5: Sensor Piezolétrico

4.3 Chave Óptica

Dispositivo composto por um emissor e um detector de luz ambos formados a partir de junções PN, caracterizados por semicondutores. Seu princípio de funcionamento é baseado na presença de tensão elétrica nos terminais do receptor ao receber a luz do emissor e ausência desta mesma tensão caso a luz seja interrompida em sua abertura, conforme pode ser detalhado na Figura 4.6, sua função portanto, será de monitorar a frequência do rotor.

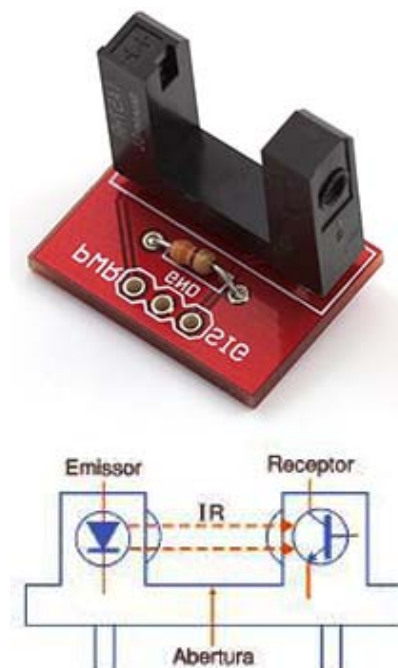


Figura 4.6: Chave Óptica

4.4 Circuito amplificador e grampeador

Um circuito utilizando um amplificador operacional LM741 montado na configuração Amplificador Somador Não-Inversor com duas entradas: uma para o sinal gerado pelo elemento piezelétrico e outra para um nível DC ajustável por um potenciômetro (resistor variável). Esta configuração permite a soma real de tensões em sua entrada, e tem um ganho facilmente calculado pela relação dos resistores de realimentação com a entrada negativa. O circuito necessita de uma alimentação CC simétrica de 12V e possui um ganho variável por outro potenciômetro, entende-se ganho de tensão a relação de tensão de saída pela tensão de entrada. O esquema elétrico básico é mostrado na Figura 4.7, onde as funções dos componentes estão descritas.

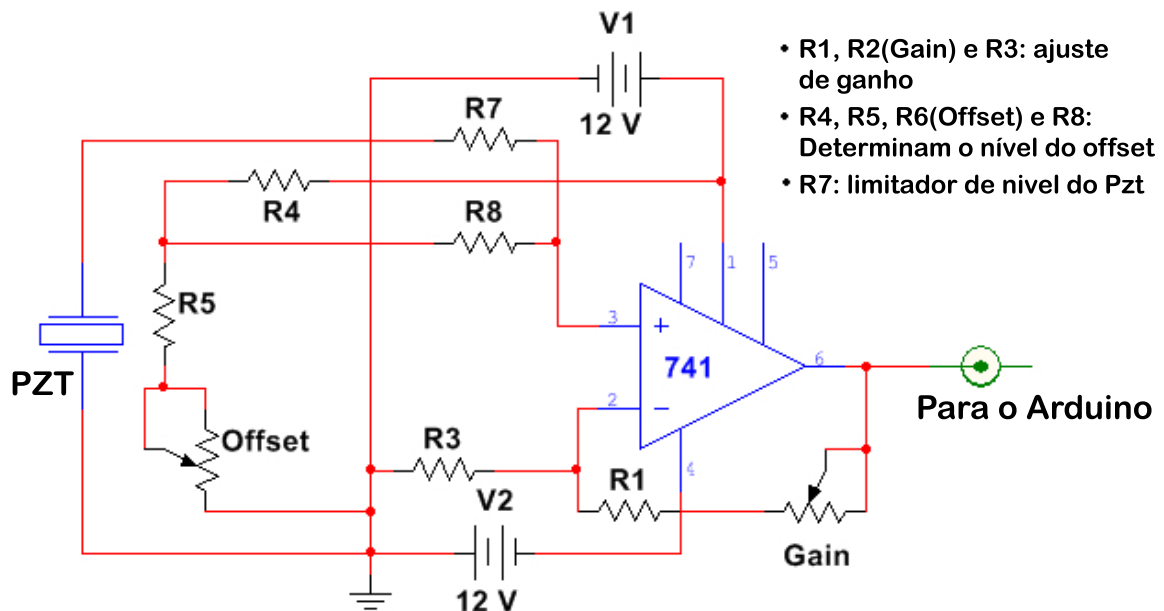


Figura 4.7: Esquema elétrico do circuito amplificador/grampeador

A Figura 4.8 mostra o circuito acondicionado em sua caixa, com os conectores de entrada e saída do sinal, o conector de alimentação de corrente contínua e os potenciômetros de ajuste de ganho e tensão média (offset). Obtem-se com estes ajustes um ganho de tensão variável na faixa de 1 a 6 (0 a 15 dB) e um nível variável de tensão contínua de 0 a 4V.

Sua utilização é necessária devido ao sinal gerado pelo sensor piezelétrico, tal sinal é centralizado no ponto neutro e simétrico, contendo componentes positivas e negativas e a amplitude é proporcional à deformação e pode, dependendo da fonte de excitação, ser de valores baixos demais para um bom detalhamento em sua aquisição. Com ajustes no nível de tensão cc e no ganho do circuito, pode-se condicionar o sinal a ter seu pico de tensão à máxima tensão de entrada analógica do Arduino, que é aproximadamente 5V e o seu ponto médio na metade desta tensão, proporcionando que nenhuma componente



Figura 4.8: Circuito montado com os pontos de acesso, controles e alimentação

do sinal seja negativa, pois o Arduino somente aceita sinais positivos, tal processo pode ser melhor entendido pela Figura 4.9

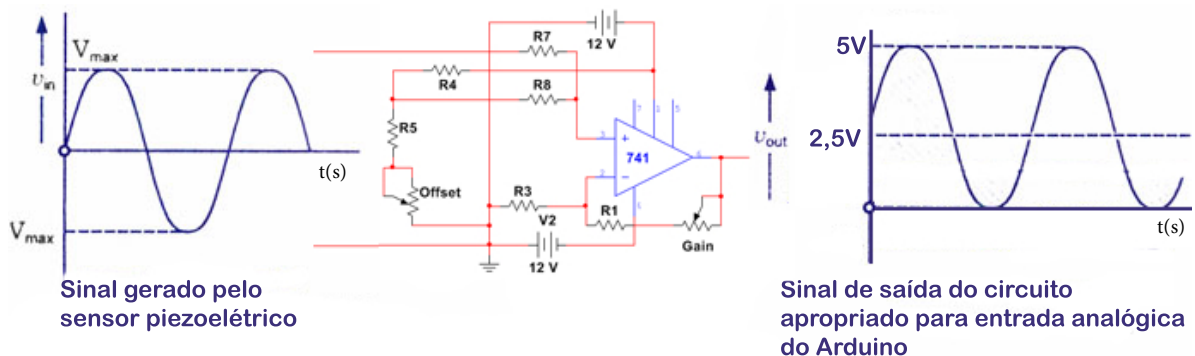


Figura 4.9: Adaptação do sinal para ser transmitido ao Arduino

4.5 Microcontrolador Arduino UNO REV3

O Arduino é um dispositivo para realizar projetos ou protótipos baseados no microcontrolador ATMEL modelo ATMEGA328P-PU de 8 bits, cuja disposição dos pinos é mostrada na figura 4.10, sua estrutura de hardware é livre, a linguagem utilizada é a *Wiring*, baseada em C/C++, possui 6 entradas e 6 saídas analógicas (utilizando sinal digital por modulação de largura de pulso - PWM do inglês *Pulse Width Modulation*) e 14 pinos de entradas/saídas digitais. As entradas são multiplexadas, o que implica na redução da taxa de aquisição conforme se habilite as portas de entrada. As entradas aceitam somente valores positivos de até 5,5V

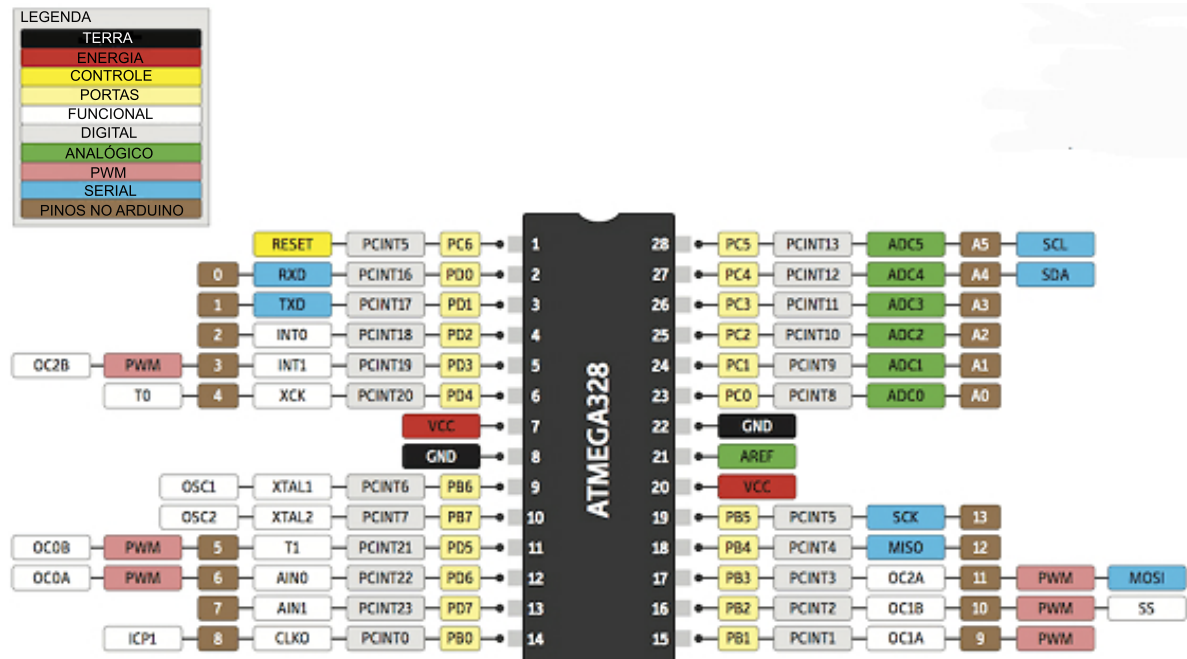


Figura 4.10: Microcontrolador Atmega328P

Um oscilador de 16MHz determina o clock de funcionamento, é alimentado por tensão contínua de 5V até 12V, suas entradas analógicas possuem 1024 níveis de quantização, que correspondem aos valores de tensão de entrada de 0V a 5V, conseqüentemente, a codificação gera uma palavra de 10 bits por amostra pois $2^{10} = 1024$, o passo de quantização é de aproximadamente 4,9mV uniforme. A comunicação com o PC pode ser feita mediante pinos TX/RX ou utilizando a porta USB, podendo ser utilizado os processos de comunicação serial UART TTL 5V ou I²C. A Figura 4.11 mostra os componentes e pontos de acesso e a figura 4.11 mostra o aspecto físico do Arduino UNO REV 3.

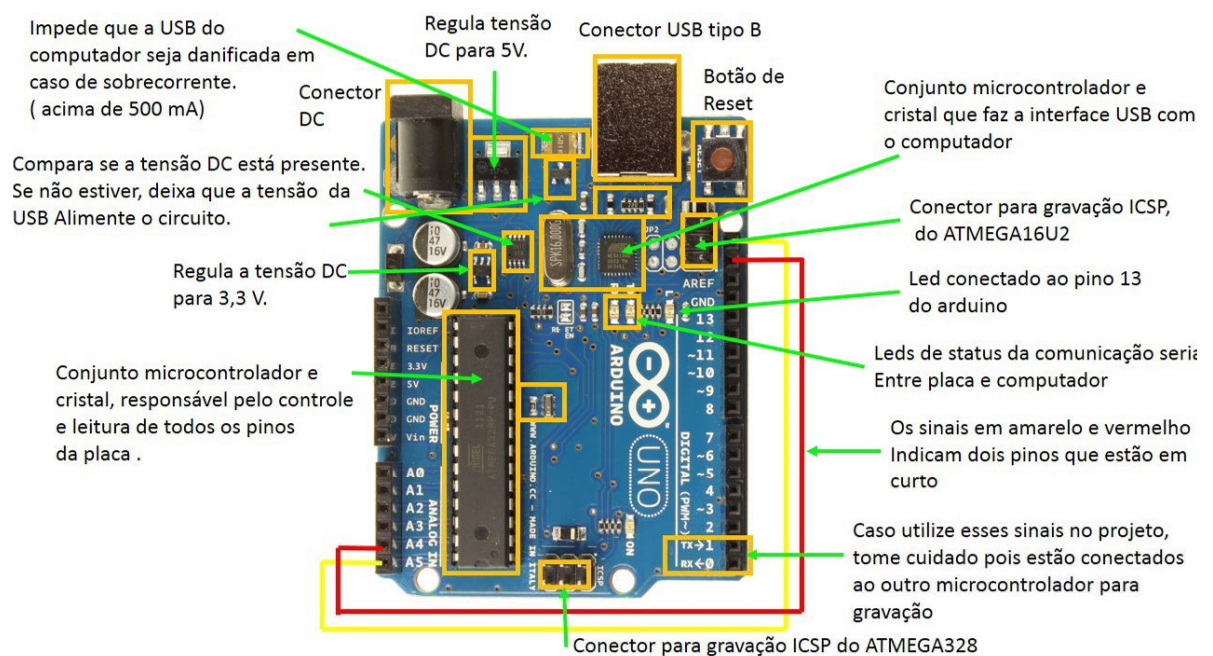


Figura 4.11: Descrição do Microcontrolador Arduino UNO REV 3

Capítulo 5

Procedimento Experimental

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Vibração e Acústica (LAV) da Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP. Os processos práticos foram basicamente três: excitação, aquisição com conversão de sinais em dados e o processamento destes dados. O processo é feito com alterações estruturais como adição de massa ao longo da viga e como rigidez, simulada com uma força de atração ou repulsão provocada pela interação de um eletroímã com um neodímio fixado à viga. A Figura 5.1 representa a estrutura utilizada e os componentes para a execução dos processos práticos acima citados.

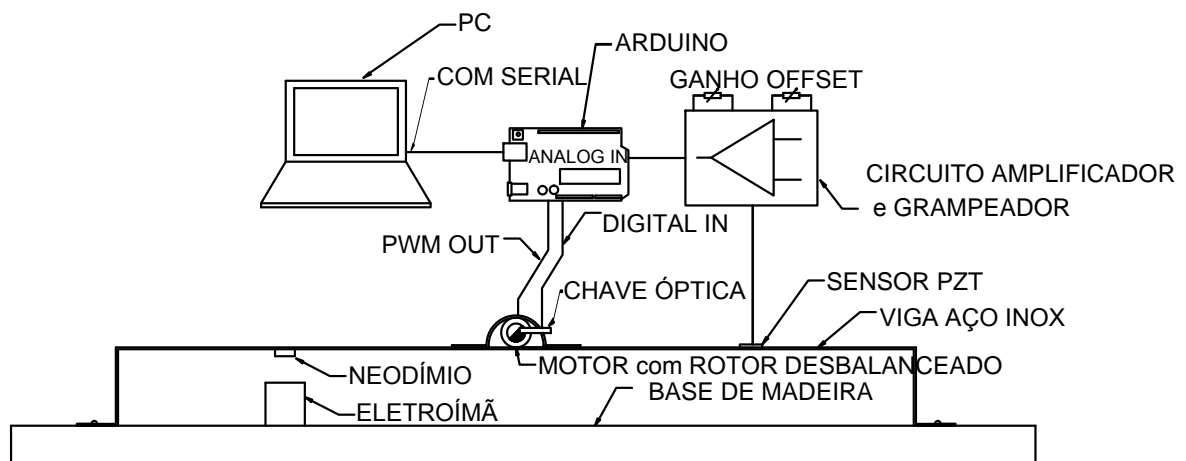


Figura 5.1: Visão Geral do Sistema

5.1 Monitoramento da rotação

O monitoramento do sinal provocado pela rotação do eixo do motor feito pela chave óptica fixada conforme figura 5.2 é enviado à uma entrada digital do Arduino, pois o dispositivo enviará ao Arduino somente dois estados: estado lógico "1" representado por uma tensão de 5 Volts e estado lógico "0" representado pela ausência de tensão.



Figura 5.2: Princípio de funcionamento da chave óptica

A geração desses estados lógicos se dá pela permissão ou obstrução do feixe de luz entre o transmissor e receptor, o receptor percebendo a presença de luz emitida pelo transmissor, envia o estado lógico "1" conforme pode ser visto na figura 5.3 **b** e na ausência deste sinal na entrada do receptor, portanto, estando obstruído, o dispositivo envia o estado lógico "0", conforme indicado na figura 5.3 **a**. A cada revolução completa do

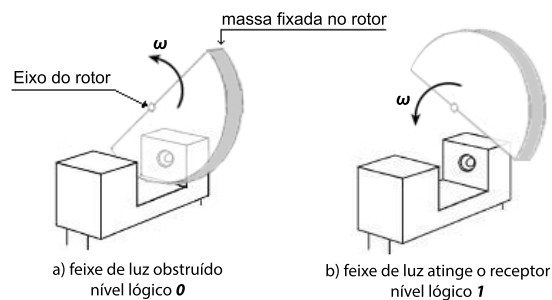


Figura 5.3: Princípio de funcionamento da chave óptica

rotor, haverá duas mudanças de estado possíveis (inicialmente estando em "0", altera para "1" e no segundo semiciclo muda para "0" ou estando inicialmente em "1", no primeiro semiciclo altera para "0" e no segundo muda para "1". Contando a quantidade de mudanças de estado em 1 segundo e dividindo o resultado medido por dois, tem-se a quantidade de ciclos por segundo, na qual é a própria frequência do rotor medida em Hertz [Hz]. Para saber a velocidade angular ω basta seguir a equação 5.1

$$\omega = 2\pi \times f \quad (5.1)$$

onde f é a frequência medida em Hz e ω é resultado em $\frac{rad}{s}$ e assim a chave óptica torna-se um instrumento de medida de rotação, semelhante a um encoder.

5.2 Calibração do circuito amplificador/grampeador

O sinal gerado pelo elemento piezoelétrico é de natureza simétrica, com semiciclos positivos e negativos, cuja amplitude máxima é variante pelo deslocamento ou força mecânica exercida, podendo chegar a dezenas de volts, contudo, no sistema montado, foi verificado em regime de máximo deslocamento uma tensão cuja amplitude de pico a pico ficou próxima à 2,5 V, conforme mostra a figura 5.4 extraída do osciloscópio digital utilizado para calibração. Esta forma de onda não é apropriada para o Arduino devido aos semi-ciclos negativos que serão cancelados, isso ocorre pelo motivo do Arduino só adquirir sinais positivos e também devido à amplitude máxima de tensão, pois para haver o melhor aproveitamento possível da aquisição deste sinal, é ideal que se utilize toda a faixa dinâmica de codificação aproveitada, tal faixa nas entradas analógicas do Arduino compreende a variação de amplitude entre 0 e 5 volts.

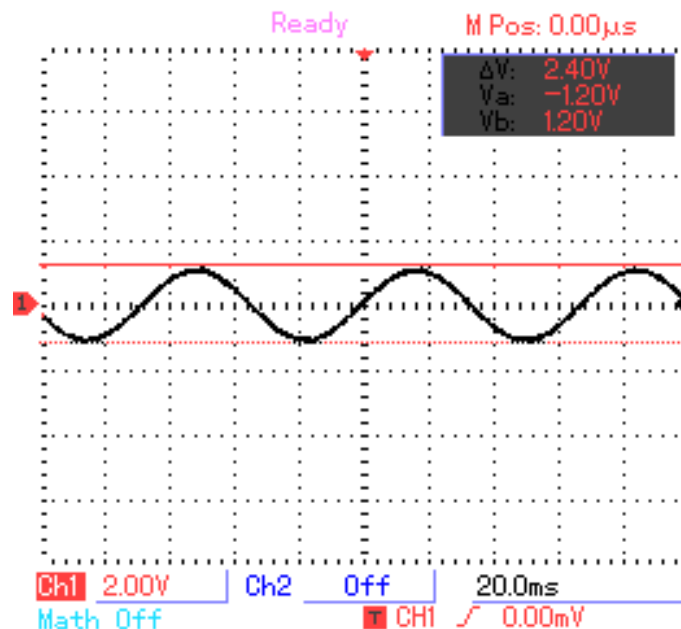


Figura 5.4: Tela do osciloscópio indicando a forma de onda gerada pelo elemento piezoelétrico

Faz-se uma varredura para obter a tensão máxima do sensor pzt variando lentamente o valor da amplitude de tensão contínua no motor de 0V até +5V, o sinal gerado pelo sensor então é aplicado à entrada do circuito amplificador/grampeador positivo, que através de dois resistores variáveis (potenciômetros), realizam-se os controles do ganho do amplificador, que matematicamente é expresso pela relação da tensão de saída com a tensão de entrada, e do nível de tensão contínua que será somado o sinal, fazendo que uma componente do sinal torna-se uma tensão média entre o neutro e a tensão máxima (5V), garantindo assim, seu grampeamento na melhor posição possível como pode ser observado na figura 5.5

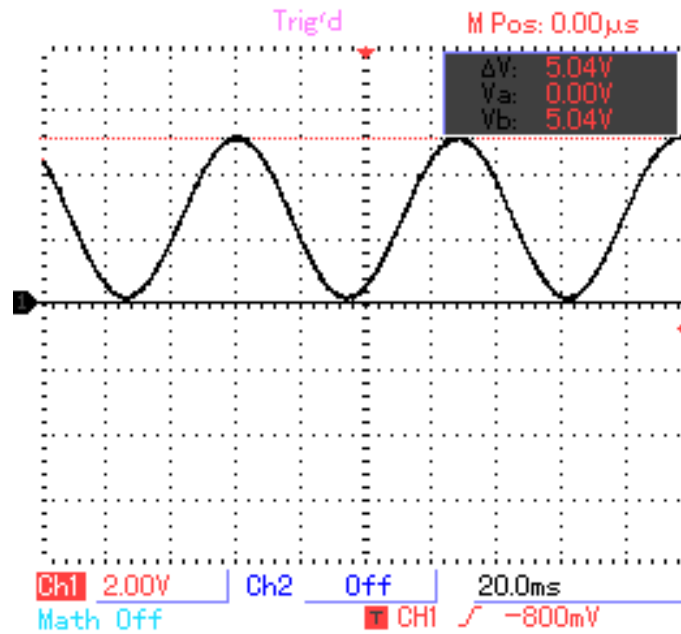


Figura 5.5: Tela do osciloscópio indicando a forma de onda processada pelo circuito amplificador/grampeador

5.3 Aquisição dos sinais

A aquisição do sinal proveniente da chave optica é feita pela entrada digital, escolhido o pino 3, na qual preceberá os estados lógicos conforme descrito no item 4.2 e processará essa informação de forma que se mostre através da comunicação serial com o computador pessoal. A aquisição do sinal do sensor piezoelétrico já adaptado pelo circuito será feita por uma das 6 entradas analógicas, no caso, escolhida a entrada A0. O sinal analógico para ser processado necessita ser digitalizado sob a forma de um código que identifique de forma unívoca todos os seus parâmetros, mas que seja possível a reconversão para o sinal analógico original de forma mais parecida possível. Um dos processos mais comuns em digitalização de sinais analógicos, amplamente usado em mídias de música (CD), sistemas telefônicos (TDM) e pelo Arduino é a modulação por código de pulso (PCM). O processo de modulação por código de pulso consiste na amostragem do sinal, utilizando o critério de Nyquist (LATHI, 2007), onde a frequência de amostragem (f_a) é no mínimo o dobro da máxima do sinal analógico a ser amostrado. O Arduino possui um intervalo de amostragem (T_a) de $100\mu s$, portanto:

$$f_a = \frac{1}{T_a} = \frac{1}{100\mu} = 10kHz \quad (5.2)$$

O valor da frequência de amostragem do Arduino obtida na equação 5.2 permite que se faça a aquisição de sinais que possuam sua frequência máxima de até 5kHz, pois:

$$f_a = 2 \times f_{s_{max}}, \implies f_{s_{max}} = \frac{f_a}{2} = \frac{10k}{2} = 5kHz \quad (5.3)$$

O resultado visto na equação 5.3 permite concluir que há uma ampla margem de segurança de não ocorrer distorções, visto que os sinais gerados pelo sensor piezoelétrico devido ao deslocamento não ultrapassa 100 Hz neste sistema. O sinal analógico amostrado é quantizado para níveis pré-estabelecidos pois possui variações infinitas de valores possíveis no instante de cada amostragem, como exemplo, a figura 5.6 ilustra o processo de digitalização desde a amostragem, passando pela quantização até a codificação exemplificada com 4 bits.

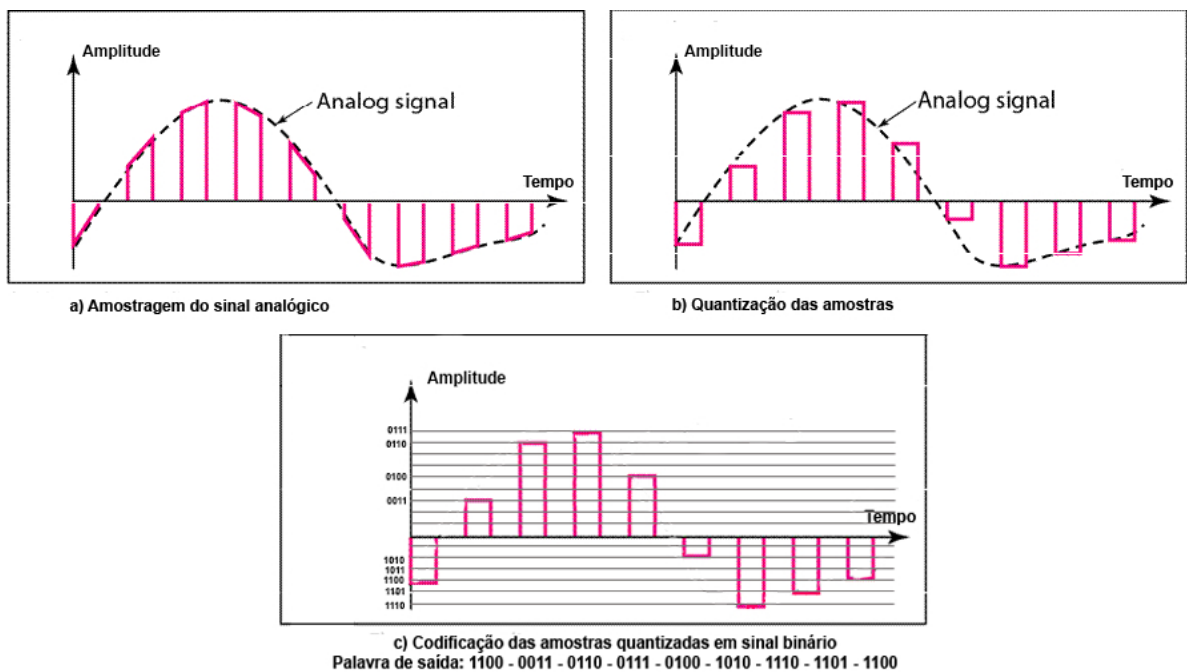


Figura 5.6: Etapas de digitalização de um sinal analógico

Um pequeno problema é com baixas amplitudes, onde a aproximação dos níveis na quantização gera um erro de quantização alto em relação às amplitudes de amostras maiores, essa relação entre a amostra original e a diferença da amostra quantizada pela original denomina-se relação sinal/ruído de quantização (RSR) ou simplesmente erro de quantização. Quanto maior a RSR melhor mais fiel é o sistema na restauração do sinal original. Uma das maneiras de melhorar a RSR é utilizar uma compressão do sinal com ganho maior nas amplitudes menores, o que não se aplica neste sistema, e uma outra solução para minimizar o excesso de ruído é exatamente a amplificação do sinal a ser amostrado, como feito pelo circuito amplificador/grampeador descrito no item 3.4. O Arduino pode fornecer os valores dos códigos na base que for mais conveniente,

por exemplo: binária, hexadecimal, utilizou-se então, a base decimal na qual possui tratamento de forma mais simplificada para a reconstituição e processamento do sinal adquirido.

5.4 Programação do arduíno

Um código simples baseado em C++ é utilizado para o controle da tensão média citado no item 4.1, realiza a leitura da chave optica no modo digital contido no item 4.2 e obtém o sinal do sensor ja condicionado no item 4.3 para finalmente ter sua palavra binária equivalente à amplitude da amostra descrito no item 4.4, conforme a seguir:

```
1 int sensorPin = A5; // declara entrada analogica
2 int sensorValue = 0; // declara sensor normalmente em 0
3 int chave; // declara variavel chave
4 void setup()
5 {
6     Serial.begin(115200);
7     pinMode(8, INPUT); // define o pino 8 como entrada
8 }
9 void loop(){
10    analogWrite(3, 120); // escreve o PWM no pino 3 com valor de
11        120 (0-255)
12    chave = digitalRead(8); // define chave como a leitura do pino
13        digital 8
14    sensorValue = analogRead(sensorPin); // medida analogica do
15        sensor pzt ja condicionado
16    Serial.print(micros()); // mostra o referencial de tempo
17    Serial.print(" ");
18    Serial.print(chave); // mostra contagem da chave optica
19    Serial.print(" ");
20    Serial.print(sensorValue); // mostra valores da leitura
21        analogica
22    Serial.println();
23 }
```

5.5 Obtenção das curvas padrões

Definido o processo de controle da tensão de excitação, do monitoramento da frequência e do processo de medida do sinal do sensor, estabelecer-se-á a medida padrão, onde não haverá nenhum tipo de alteração estrutural no sistema, portanto, a viga sem nenhum dano, em seu estado original. Para cada tensão aplicada ao motor cc realizou-se

uma medida do sensor piezelétrico, obtendo assim uma forma de onda resultante de 500 amostras conforme figura 5.7 .

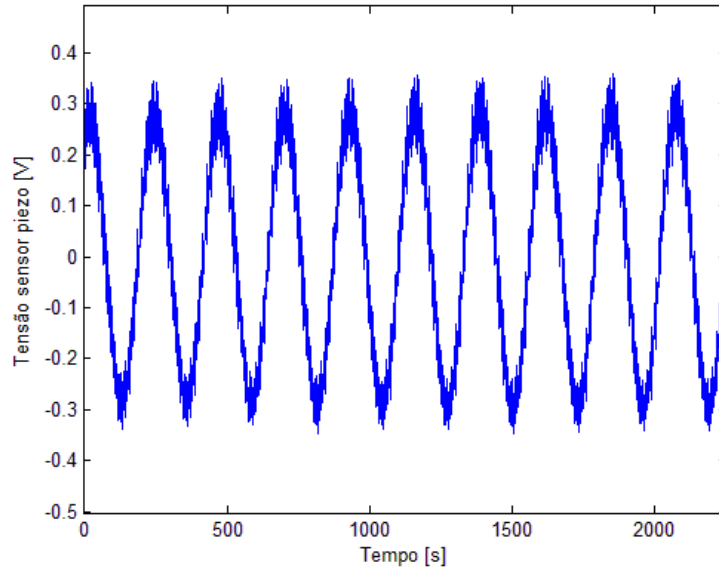


Figura 5.7: Sinal reconstituído após o processo de aquisição

Os valores X das amostras, sequencialmente resultam em uma onda aproximadamente senoidal, terá sua medida resumida a um único valor definido pelo seu valor eficaz (RMS) como descrito abaixo na equação 5.4.

$$X_{RMS} = \sqrt{\bar{X}^2 + \sigma^2} \quad (5.4)$$

Onde \bar{X} é a média aritmética e σ o desvio padrão, que pode ser obtido pela equação 5.5

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma(X - \bar{X})^2}{N}} \quad (5.5)$$

N é definido pela quantidade de amostras. Assim que a amplitude é detectada pelo arduino e enviada ao PC com o aplicativo MATLAB, este processa e armazena o valor de tensão RMS das 500 amostras em função de cada tensão aplicada ao motor na faixa de 0 a 5V, com passos de 0,1 V conforme mostra a figura 5.8.

O segundo processo para análise das amostras é pelo grau de desvio da assimetria ($X_{skewness}$), na qual utiliza-se o coeficiente do momento de assimetria dado pela equação 5.6

$$X_{skewness} = \frac{m_3}{\sigma^3} \quad (5.6)$$

A equação 5.6 se refere ao terceiro momento centrado na média. Os momentos sob a

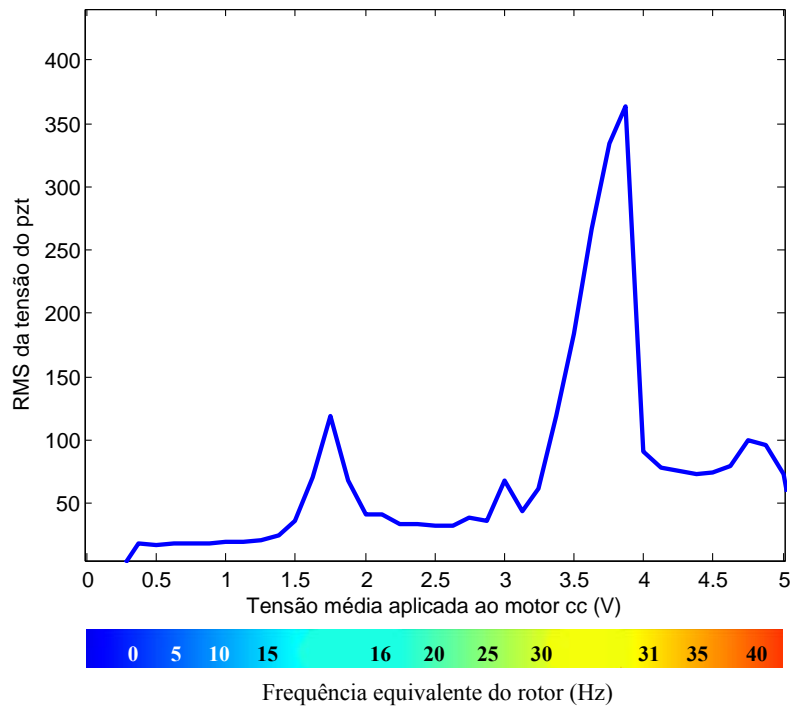


Figura 5.8: Tensão RMS do sensor piezoelétrico em função da tensão média aplicada ao motor

forma abstrata podem ser definidos pela equação 5.7:

$$X_c = \frac{m_c}{\sigma^c} \quad (5.7)$$

Onde m_c é dado por:

$$m_c = (X - \bar{X})^c \quad (5.8)$$

O gráfico do grau de assimetria das amostras para cada tensão aplicada ao motor pode ser vista na figura 5.9

O terceiro processo de análise é a medida do grau de achatamento da distribuição feita pelas amostras feito pelo calculo do quarto momento centrado na média, conhecido como momento de curtose (ou kurtosis), dado na equação 5.9

$$X_{kurtosis} = \frac{m_4}{\sigma^4} \quad (5.9)$$

Onde m_4 pode ser obtido através da equação 5.8 O gráfico da medida pelo grau de achatamento da distribuição das amostras para cada nível de tensão aplicada ao motor é observado na figura 5.10.

As amostras foram medidas simultaneamente com um sistema de aquisição e tratamento de dados da National Instruments composto por um chassis modelo NI PXIe-1078, uma controladora modelo NI PXIe-8115, um módulo de aquisição modelo NI

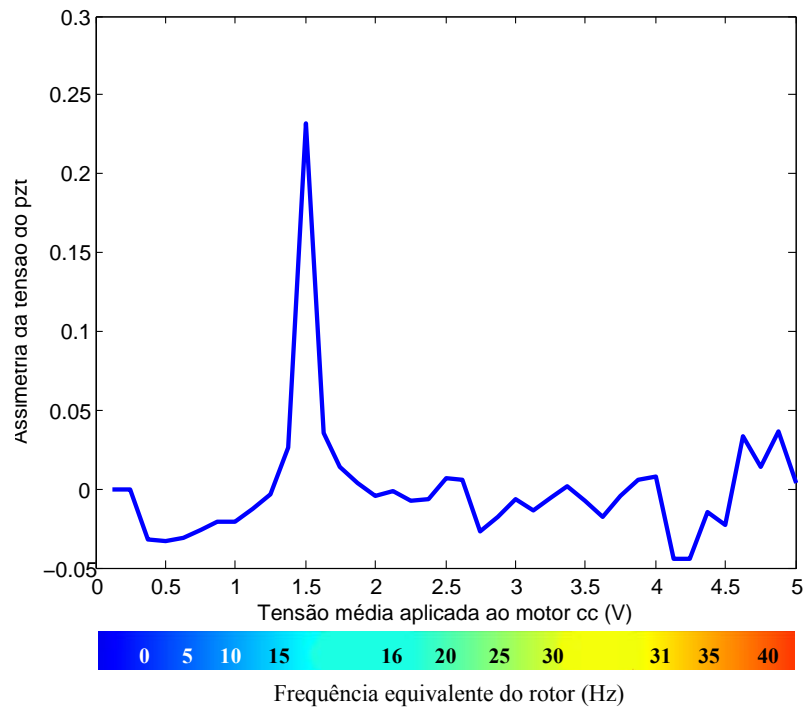


Figura 5.9: Coeficiente do momento de assimetria da tensão do sensor piezoelétrico em função da tensão média aplicada ao motor

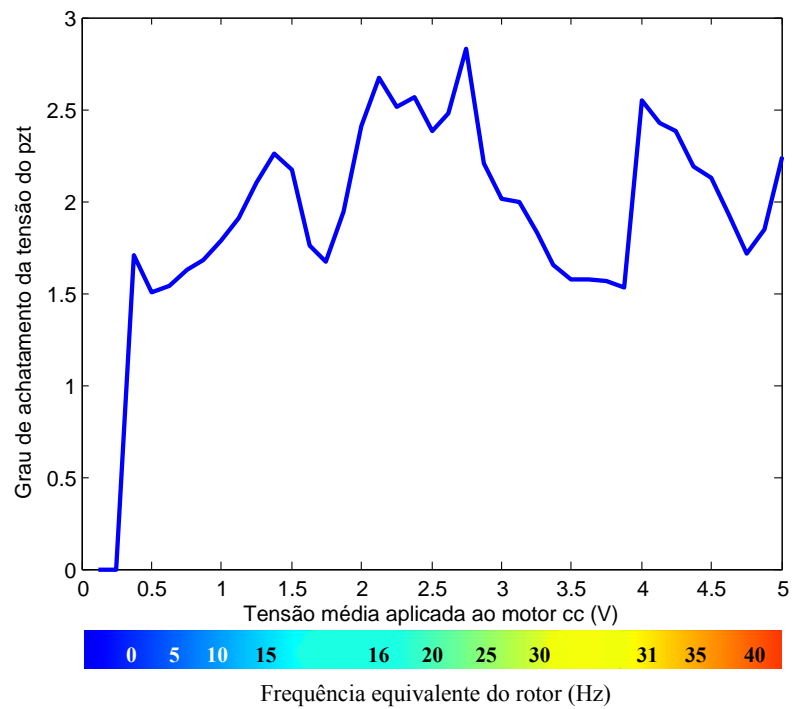


Figura 5.10: Coeficiente do momento de curtose da tensão do sensor piezoelétrico em função da tensão média aplicada ao motor

PXIe-4492, pelo LABVIEW V.30, acelerômetro modelo PCB 352C33, este último mostrado na figura 5.11 e pelos mesmos processos foram extraídos os gráficos da tensão do acelerometro pelo sistema. Os resultados, conforme visto na figura 5.12 para os valores em RMS do sistema sem dano.

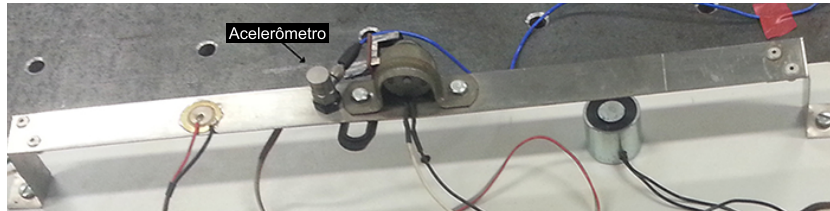


Figura 5.11: Acelerômetro utilizado para comparação

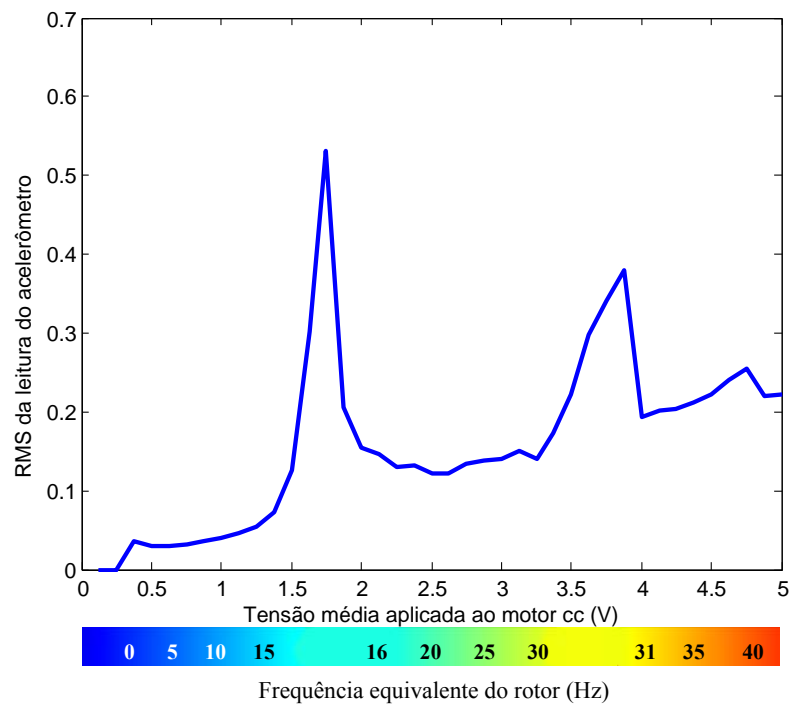


Figura 5.12: Medidas RMS do acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor

As mesmas formas de obtenção da variação de deslocamento com a tensão do sensor piezolétrico, como a assimetria e o grau de achatamento da distribuição, foram feitos com o acelerômetro e o sistema da National como as figuras 5.13 e 5.14 mostram respectivamente.

5.6 Simulações de dano

As simulações de dano à estrutura foram de forma não destrutivas, com o intuito de se repetir o quanto forem necessários os novos ensaios. Dois parâmetros foram alterados, massa e rigidez. As alterações de massa foram feitas através de massas adicionadas à viga. Esta variação de massa foi feita em dois pontos distintos na viga, a 35mm e a 160mm de uma das arestas, conforme pode ser observado na figura 5.15. Para cada posição com variação de massa, obteve-se os resultados mostrados nos gráficos da tensão do elemento piezoelétrico em função da tensão aplicada ao motor, e assim como feito na medida padrão, também foram utilizados os 3 métodos de medidas das amostras, pelo rms, como se pode observar na figura 5.16, pelo grau de assimetria na figura 5.17 e pelo grau de achatamento da distribuição na figura 5.18

As alterações de rigidez foram simuladas com a geração de um campo magnético por um eletroímã que interage com um ímã de neodímio colado na viga, conforme pode ser visto na figura 5.19. O princípio de funcionamento é a interação dos campos magnéticos já existente pelo ímã de neodímio com o campo magnético temporário e proporcional à corrente elétrica produzido pelo eletroímã. O ímã de neodímio-ferro-boro são ímãs artificiais mais recentes produzidos industrialmente e possuem uma ótima relação indução magnética pelo seu peso. O eletroímã produz o campo magnético através da corrente elétrica fluindo pelas espiras que contornam um núcleo ferromagnético, tendo o mesmo comportamento de um ímã permanente. Ambos produzindo o campo magnético, eles terão como resultante, forças de atuação mútua, de repulsão se forem de mesma polaridade (N-N ou S-S) e de atração se as polaridades forem opostas (N-S ou S-N). Foi verificado que a inversão de polaridade do campo magnético provocado pela inversão da polaridade da tensão contínua aplicada ao eletroímã não teve mudanças significativas nas curvas obtidas através da tensão fornecida pelo elemento piezoelétrico, e por este motivo, será apresentada apenas uma das versões de polaridade magnética. Aplicou-se inicialmente uma tensão de 6V ao eletroímã e em seguida os ensaios foram repetidos com um tensão de 12V (força magnética de interação máxima) e obteve-se as curvas da figura 5.20 para os valores RMS, figura 5.21 para a assimetria e 5.22 para o grau de achatamento.

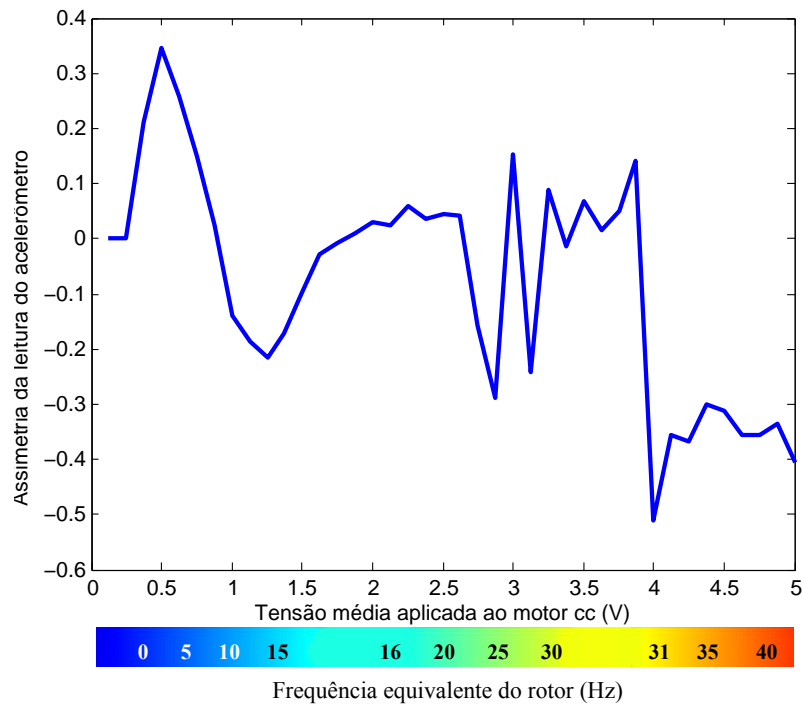


Figura 5.13: Assimetria da medida do acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor

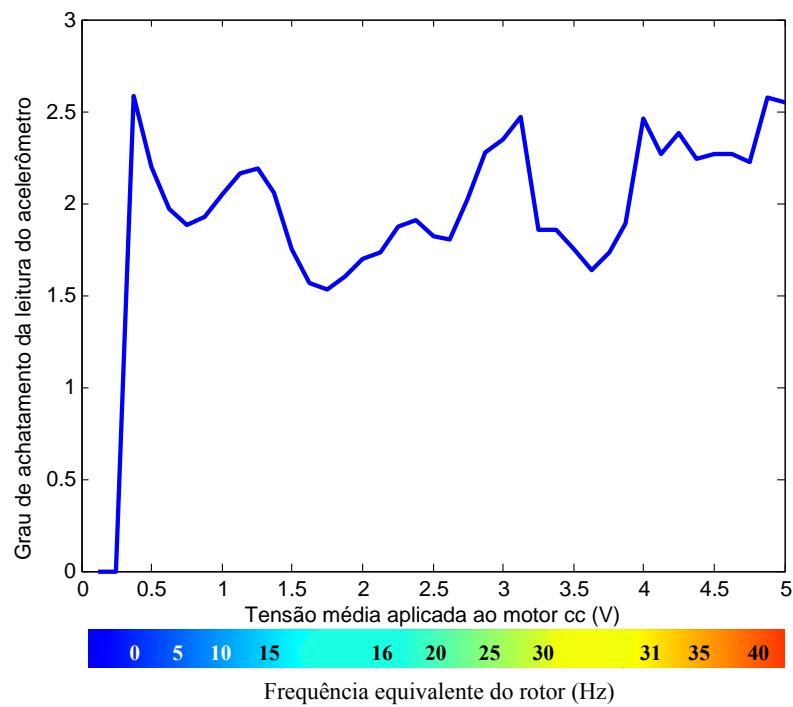


Figura 5.14: Grau de achatamento da distribuição das amostras do acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor

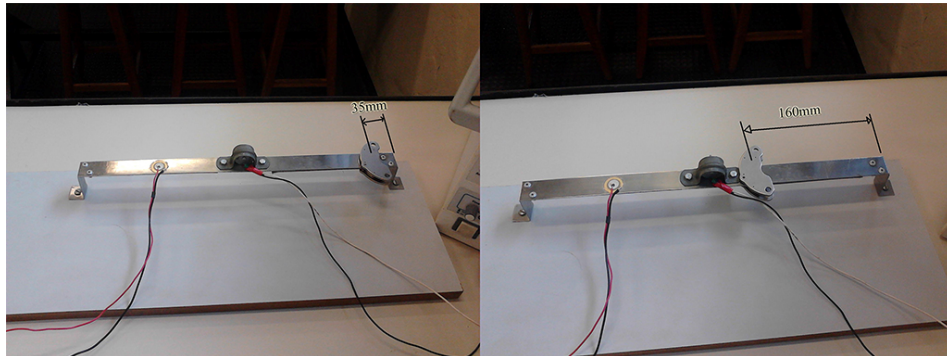


Figura 5.15: Acréscimo de massa à viga

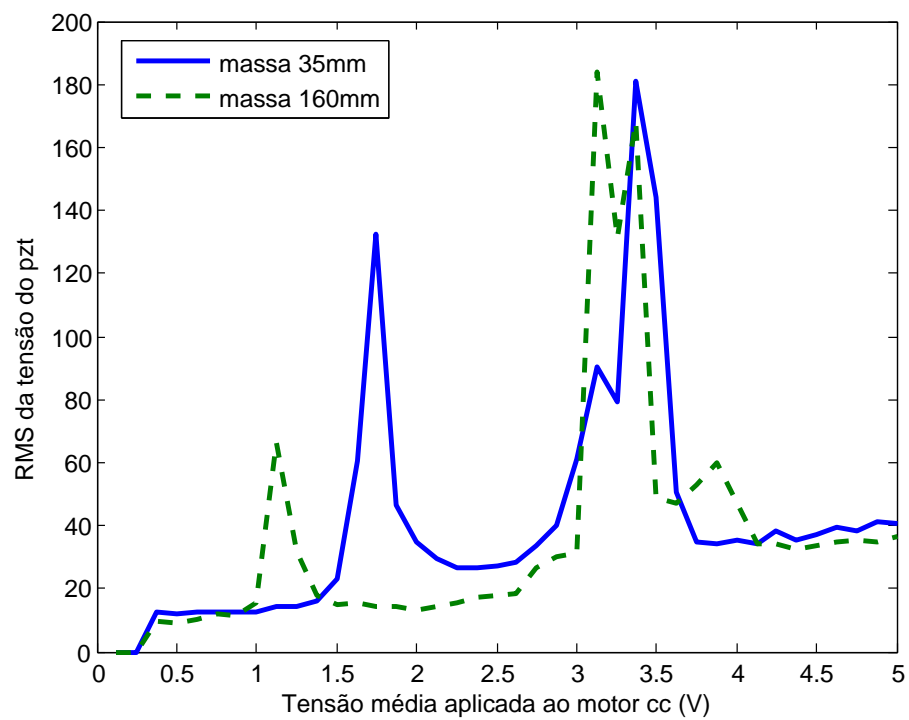


Figura 5.16: Tensão eficaz (RMS) fornecida pelo pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com acréscimo de massa em dois pontos distintos

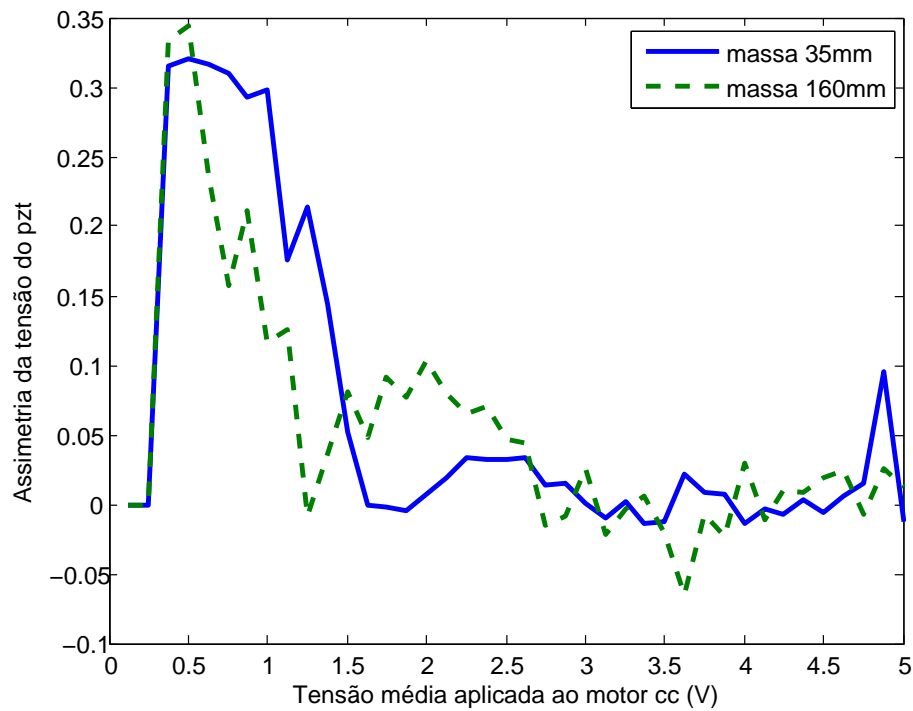


Figura 5.17: Grau de assimetria fornecida pelas amostras do pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com acrescimento de massa em dois pontos distintos

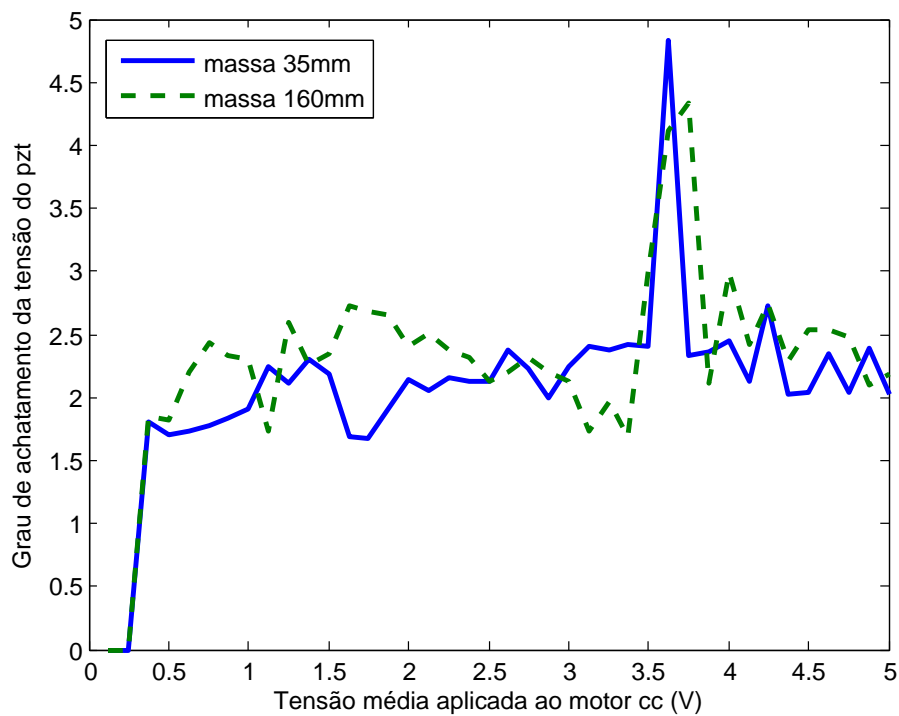


Figura 5.18: Curtose da distribuição das amostras fornecida pelo pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com acrescimento de massa em dois pontos distintos

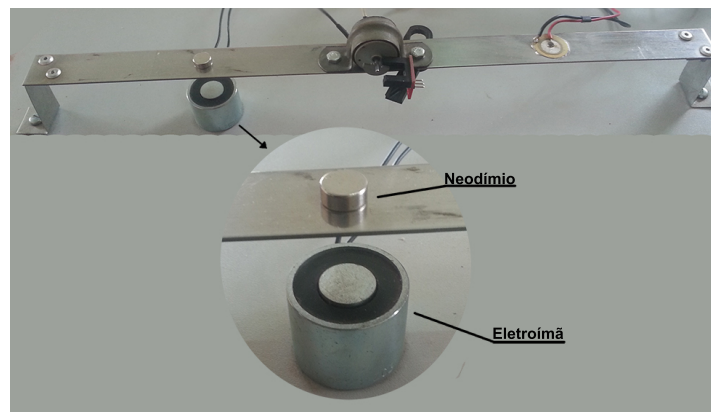


Figura 5.19: Eletroímã 12V e ímã de neodímio fixado na viga

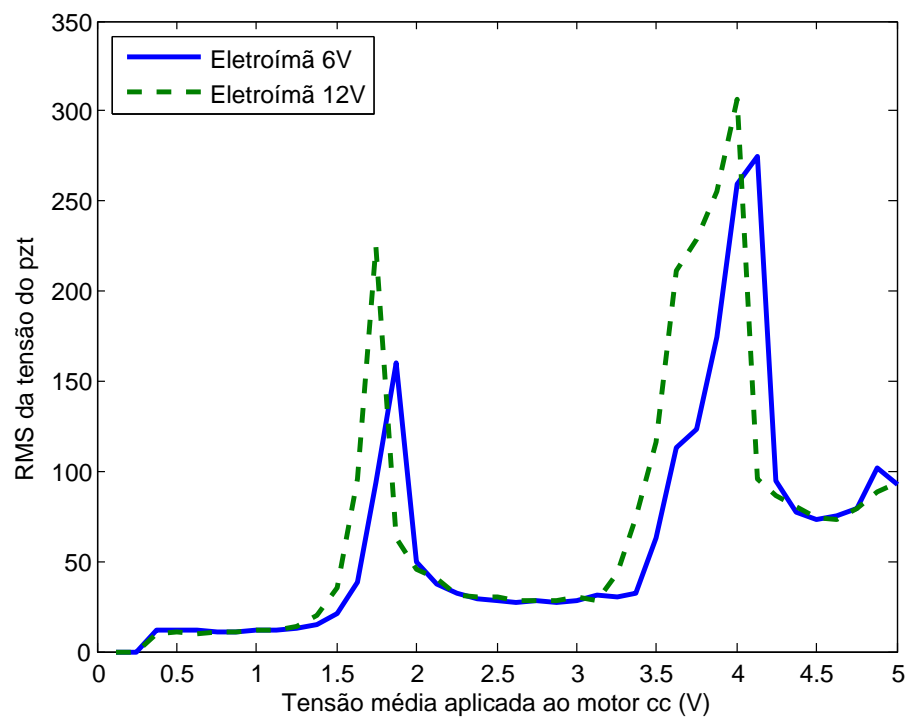


Figura 5.20: Tensão eficaz fornecida pelo pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com alterações de rigidez

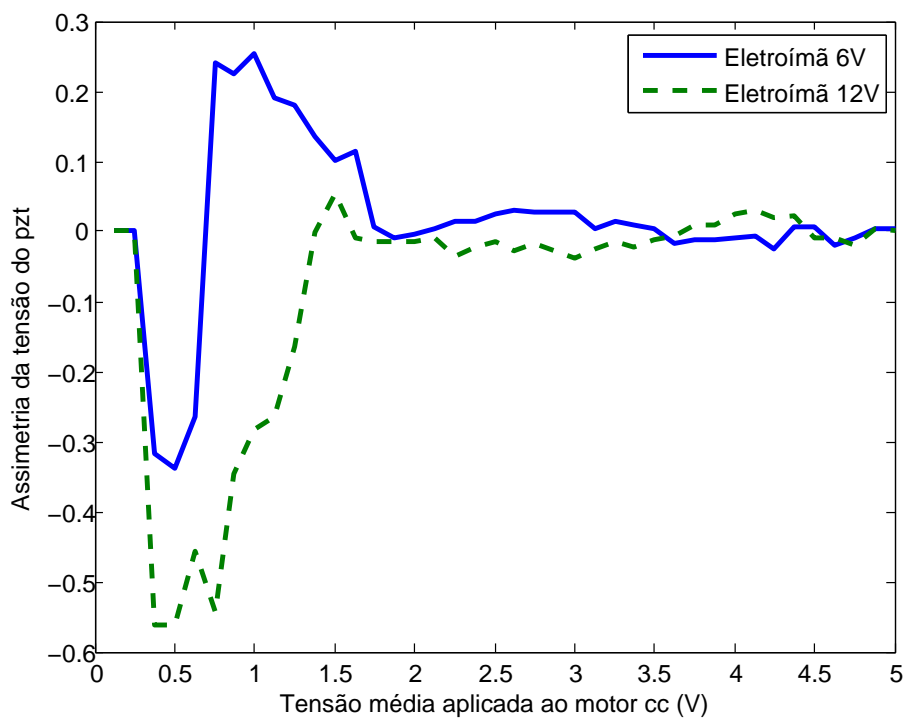


Figura 5.21: Assimetria das amostras da tensão pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com alterações de rigidez

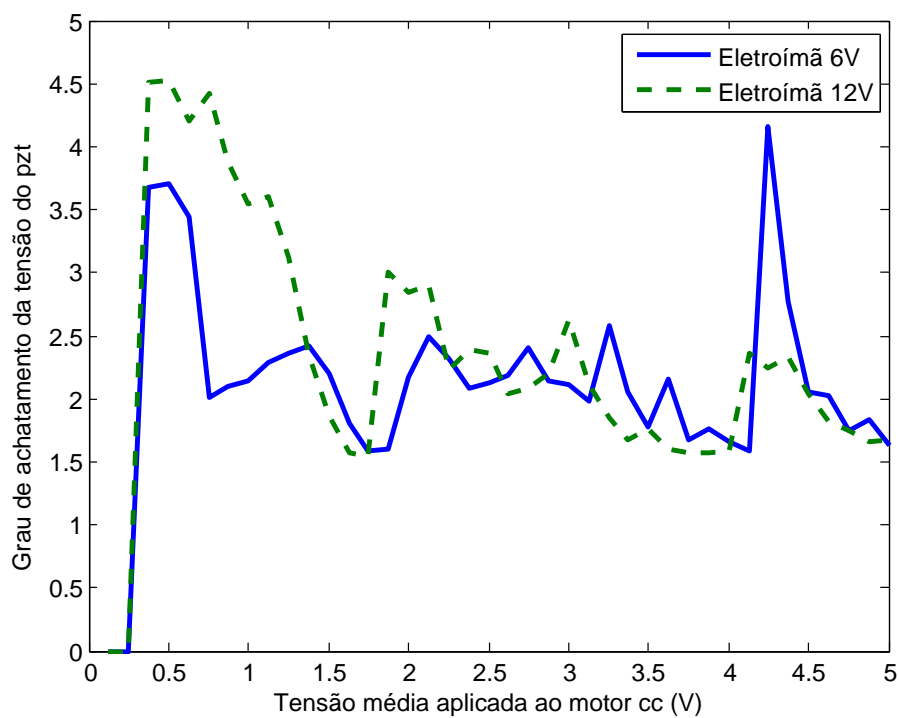


Figura 5.22: Curtose da tensão do pzt em função da variação de tensão aplicada ao motor cc com alterações de rigidez

Capítulo 6

Análise dos Resultados

Antes da análise das amostras coletadas pelo sensor pzt, observa-se o funcionamento da chave óptica para monitoração da frequência. A Figura 6.1 ilustra o resultado das medições, observando a curva preta que demonstra a rotação, e para complementar, foi medido o consumo de corrente elétrica do motor com um amperímetro *trueRMS* e os resultados já calculados em potência elétrica foram ilustrados na cor azul. O efeito Sommerfeld, definido no item 1.1, aparece com bom destaque nos momentos em que o consumo de corrente aumenta significativamente (aumentando a potência consumida) e a rotação está estagnada na frequência de ressonância, tais momentos compreendem os intervalos entre V0 e V1 e entre V2 e V3 destacados em linha pontilhada.

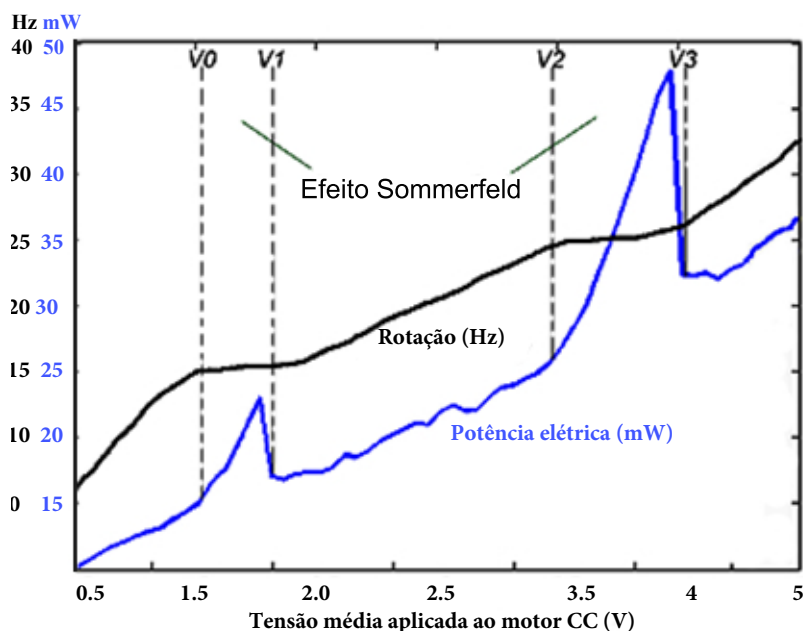


Figura 6.1: Curva da frequência do rotor e consumo de potência medida em função da tensão aplicada ao motor cc

As análises das amostras dos sensores serão divididas em duas etapas, a primeira

será analisado os resultados das medidas feitas isoladamente com o pzt e com o acelerômetro e suas variações de parâmetros, massa e rigidez, na segunda etapa será feito um comparativo entre os dois processos envolvidos: utilizando o pzt e utilizando o acelerômetro.

6.1 Análises individuais

6.1.1 Análise dos resultados utilizando SMIE desenvolvido

Confrontando todas as medidas realizadas com o piezoelétrico, obtemos as curvas da fig 6.2 na qual se refere à raiz do valor quadrático médio (RMS) das amostras coletadas pelo sensor de acordo com as variações da tensão média aplicada ao motor com desbalanceamento.

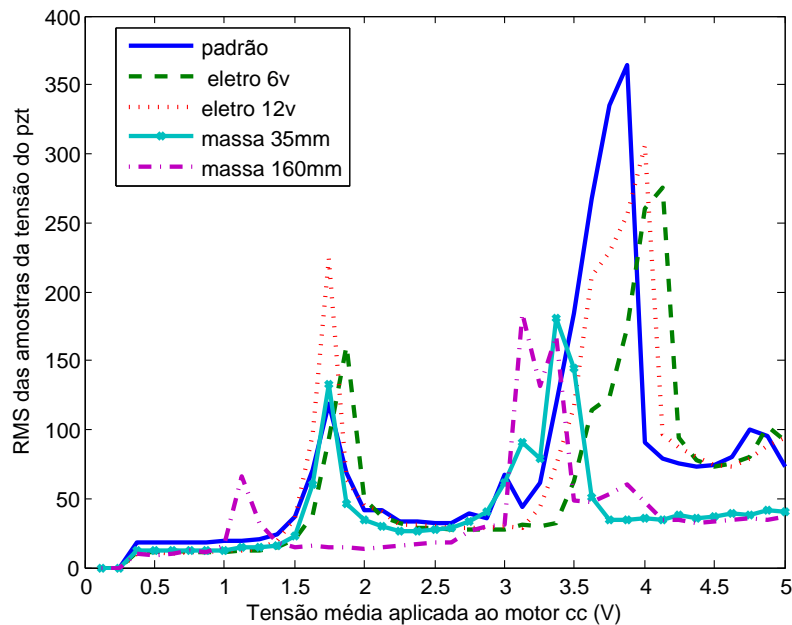


Figura 6.2: RMS das tensões geradas pelo pzt em função da tensão média aplicada ao motor cc

Observa-se que ao acrescentar massa na região próxima ao centro da viga (160mm) a primeira e a segunda captura ocorreram com menor tensão aplicada ao motor, ou seja, as frequências naturais dos primeiro e segundo modos com esta variação de massa estão com valor abaixo da medida padrão, já a massa mais próxima da aresta da viga (35mm) só teve variação significativa na segunda captura. Tratando-se da alteração da rigidez com a interação das forças magnéticas, ao aplicar metade de geração da força magnetomotriz, seis volts, ocorreu uma inversão na variação da frequência natural, ela ficou acima da medida padrão.

Processando as amostras com o momento de assimetria obtêm-se a Figura 6.3. Observa-se que as alterações são bem mais significativas que a análise pela RMS no início do processo até a primeira captura pela ressonância. Os valores positivos do coeficiente de assimetria indicam que a distribuição é assimétrica à direita o que ocorreu exatamente com a adição de massa, com os valores são negativos, a distribuição é assimétrica à esquerda, e de acordo com as curvas, quanto maior a rigidez, maior é a assimetria para a esquerda. Finalmente, se for zero é porque a distribuição das amostras está centrada e este é o motivo em que a segunda captura não é detectada, mesmo com todas as modificações.

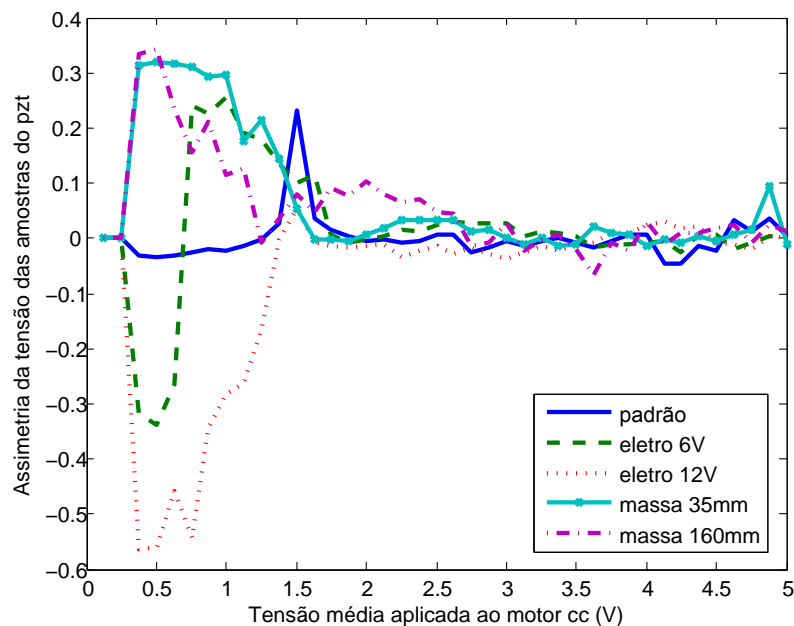


Figura 6.3: Assimetria das tensões geradas pelo pzt em função da tensão média aplicada ao motor cc

A análise pela curtose conforme a figura 6.4, observa-se que um pequeno trecho inicial da distribuição é mesocúrtica e o valor da curtose é aproximadamente zero, todas as amostras posteriores são positivas indicando que a distribuição é leptocúrtica e possui um pico relativamente alto. Observando as modificações, na primeira captura ao aumentar a rigidez, as medidas de curtose possuem um pico mais alto proporcionalmente porém com a mesma tensão aplicada ao motor. Ainda na primeira captura, ao alterar a massa, observa-se que o pico possui amplitude constante, porém o instante em que ele ocorre são distintos, quanto mais distante do centro a massa estiver, com tensão maior ocorrerá essa amplitude. Na segunda captura, as variações de rigidez obtiveram resultado inversos em relação à primeira, estão ocorrendo no mesmo instante, porém, ao aumentar a rigidez o pico da distribuição se mostrou menor e em relação às modificações de massa também ocorreram inversões nos resultados, quanto mais distante

do centro da viga a massa estiver, antes aparecerá o pico da distribuição, ou seja, com menos tensão aplicada ao motor cc e neste momento ocorreram variações de amplitude, quanto mais próxima ao centro da viga menor é sua amplitude.

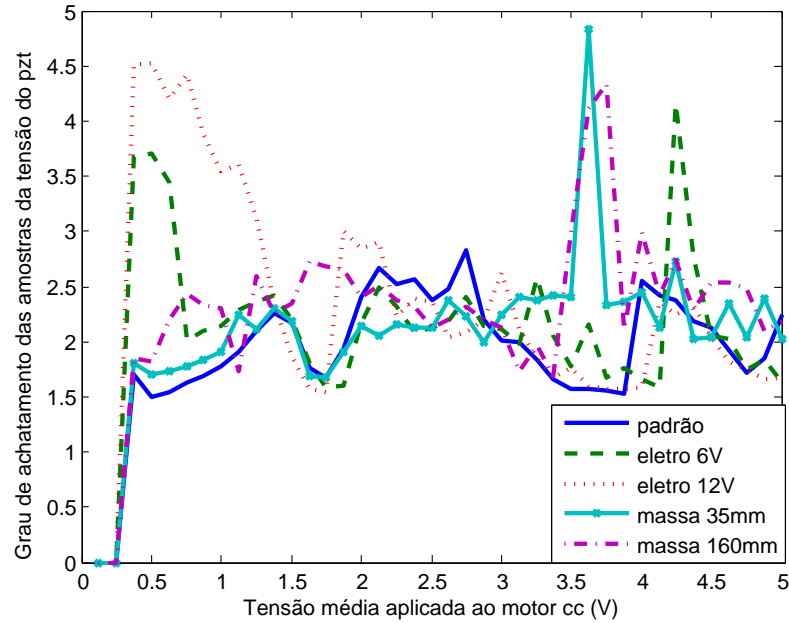


Figura 6.4: Curtose das tensões geradas pelo pzt em função da tensão média aplicada ao motor cc

6.1.2 Análise dos resultados utilizando o acelerômetro e LABVIEW

Utilizando o mesmo procedimento feito para o SMIE, foram feitas as análises estatísticas. Na Figura 6.5 tem-se os valores RMS das amostras em função da tensão aplicada ao motor, o resultado é percebido visualmente pelo gráfico, a primeira captura ocorre com tensão menor quando a massa está ao centro da viga e por ultimo ao aumentar a rigidez, a segunda captura deixa mais evidente esse comportamento. Em relação à amplitude, na primeira captura obteve-se amplitudes maiores com o aumento de rigidez e menores com adição de massa, sendo menor a cada aproximação do centro da viga. Na segunda captura, o comportamento com adição de massa permanece, porem a amplitude diminui com o aumento de rigidez.

A Figura 6.6 mostra o coeficiente do momento de assimetria em função da tensão aplicada ao motor cc. A assimetria é ligeiramente para a direita no início com excessão das amostras obtidas com massa acrescida no centro da viga, na qual antecipa o vale negativo (assimetria para a esquerda). Na segunda captura a assimetria ficou ligeiramente para esquerda sendo antecipada com a adição de massa e retardada pelo aumento

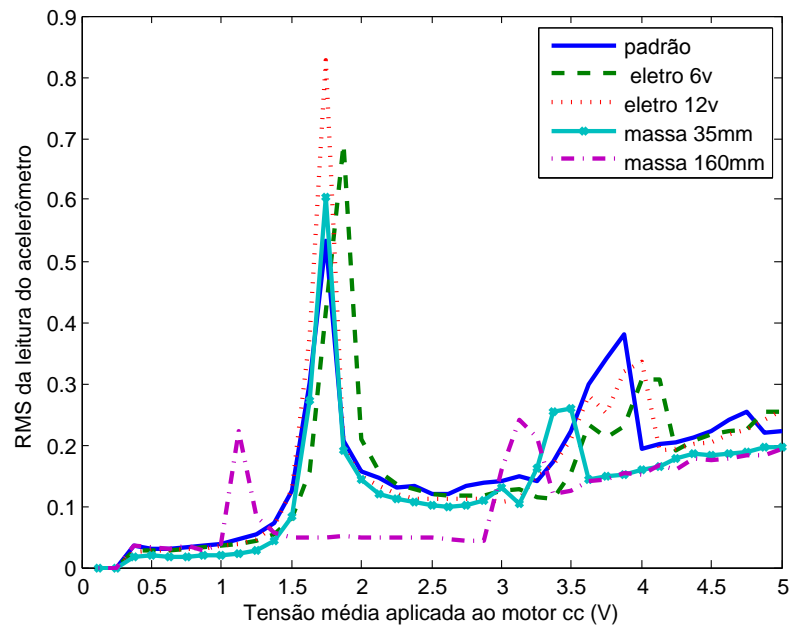


Figura 6.5: RMS das tensões geradas pelo acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor cc

de rigidez.

As amostras analisadas com o momento de curtose são mostradas na Figura 6.7. No início da distribuição é mesocúrtica e o valor da curtose é aproximadamente zero, todas as amostras seguintes indicam que a distribuição é leptocúrtica e aumentam seu valor proporcionalmente com a posição de proximidade ao centro do acréscimo de massa e são menores com o aumento de rigidez.

6.2 Análises Comparativas

A comparação entre os dois processos de coleta de amostra e processamento é desenvolvida a seguir para a validação do SMIE de baixo custo. Um dos principais detalhes é relativo ao comportamento do piezo, que devido ao seu corte e à sua posição em que foi fixada à viga, possui maior sensibilidade para o segundo modo de vibrar, ocorrendo o contrário com o acelerômetro, que indicou maior sensibilidade no primeiro modo de vibrar. Esse comportamento faz com que haja uma diferença entre os modos de vibrar com que os sensores possuem menos sensibilidade, visto que as amplitudes influenciam diretamente os coeficientes da média quadrática, da assimetria e da curtose.

Os valores RMS das amostras obtiveram resultados muito parecidos, considerando as sensibilidades dos sensores que influenciaram o valor da amplitude não afetaram praticamente as medidas, o comportamento com o piezoelétrico e com o acelerômetro são bem semelhantes, inclusive com as modificações, conforme pode ser observado na

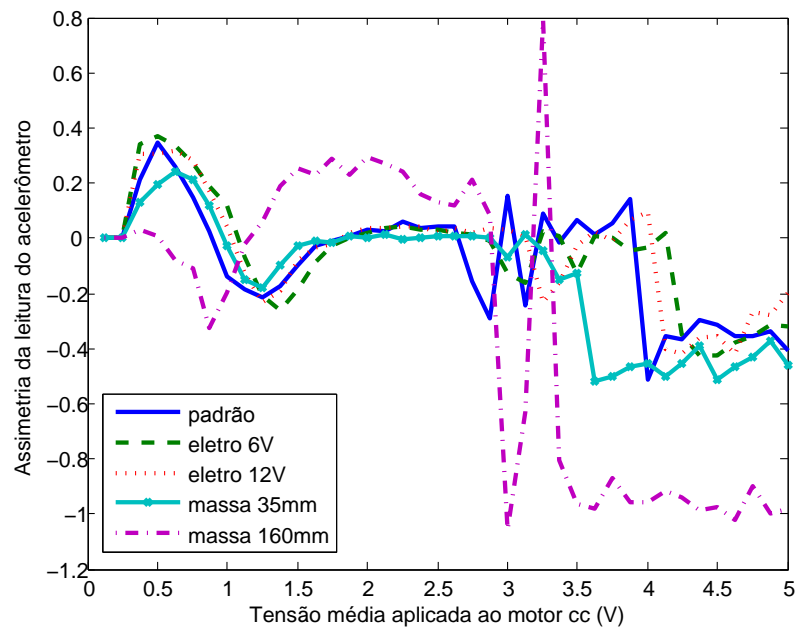


Figura 6.6: Assimetria das tensões geradas pelo acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor cc

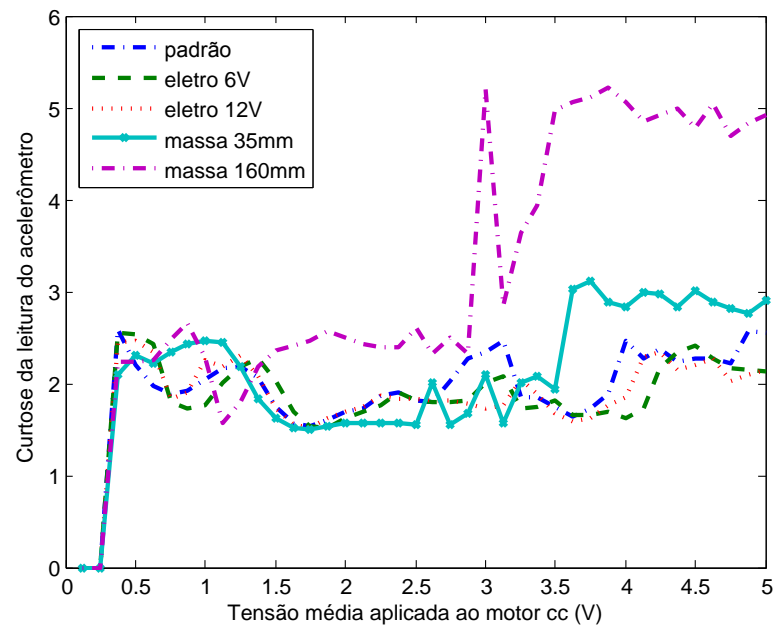


Figura 6.7: Curtose das tensões geradas pelo acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor cc

figura 6.8.

O coeficiente de assimetria da distribuição das amostras coletadas pelos sensores, como mostrado na figura 6.9, se mostrou eficiente para localização do dano somente nos modos de vibrar em que cada sensor possui menor sensibilidade. O elemento piezo elétrico no primeiro modo de vibrar e o acelerômetro no segundo modo de vibrar. O fato de se obter amplitudes menores, a variação que ocorre entre as amostras proporcionalmente à amplitude da amostra é muito maior e isto implica em distorções da distribuição mais perceptíveis em relação onde se obteve amostras de alto valores. No primeiro modo o piezo deixou bem mais enfática a diferença do alongamento da distribuição para esquerda (assimetria negativa) proporcional ao aumento da rigidez e para a direita (assimetria positiva) proporcional à posição da massa adicionada mais ao centro. Já no segundo modo, foi o acelerômetro que deixou explícito que quanto maior o valor de ω_n mais próximo do zero se encontra a curva.

Pelo mesmo motivo exposto para a assimetria, para o coeficiente de curtose também se mostrou eficiente para localização do dano nos modos de vibrar em que os sensores possuem menor sensibilidade como visto na figura 6.10. No primeiro modo maior é pico da curtose quanto maior for o valor de ω_n mostrado pelo piezoelétrico e no segundo modo quanto menor o valor resultante dessa relação, maior é o pico da curtose mostrada pelo acelerômetro.

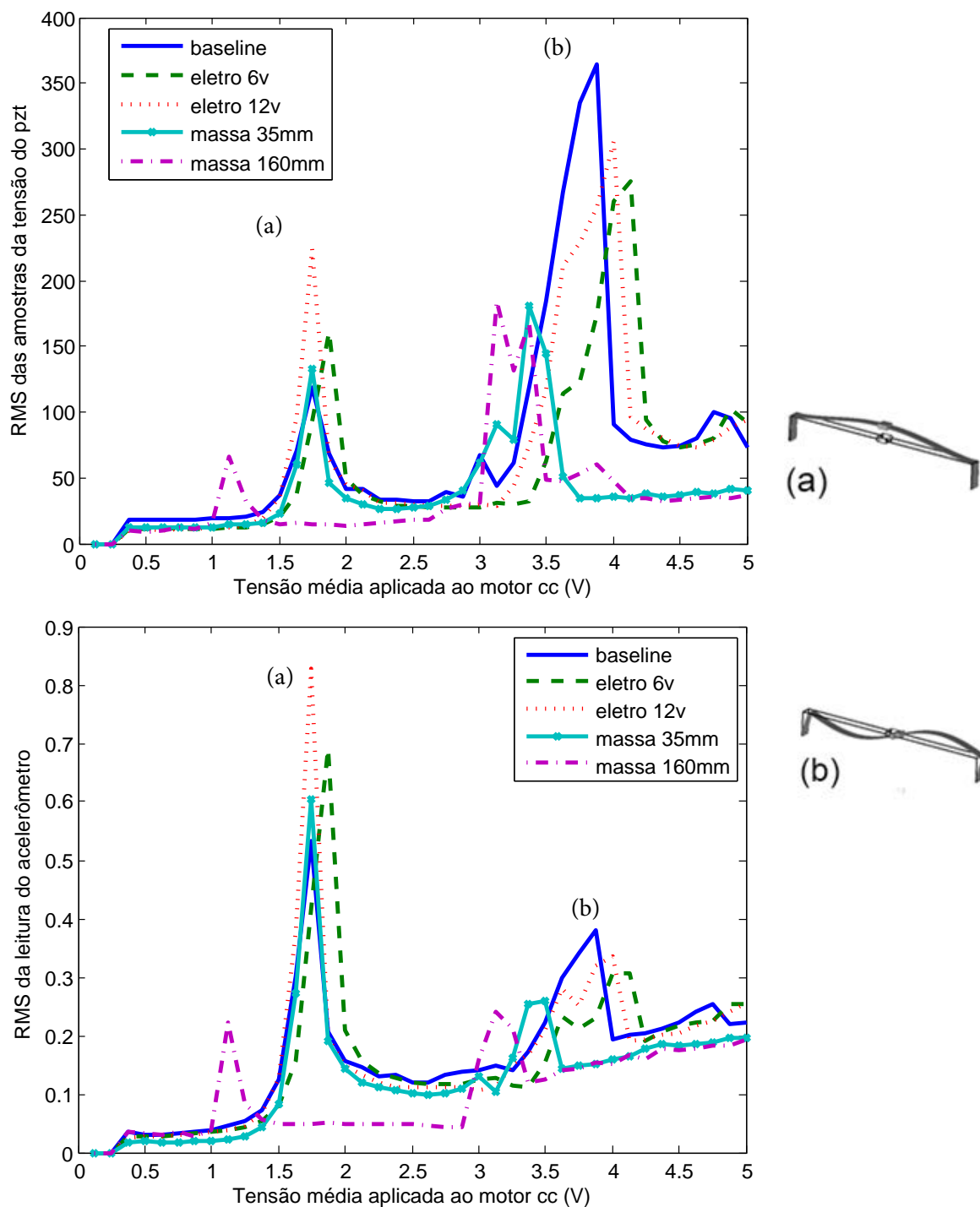


Figura 6.8: RMS das amostras do piezo e acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor cc

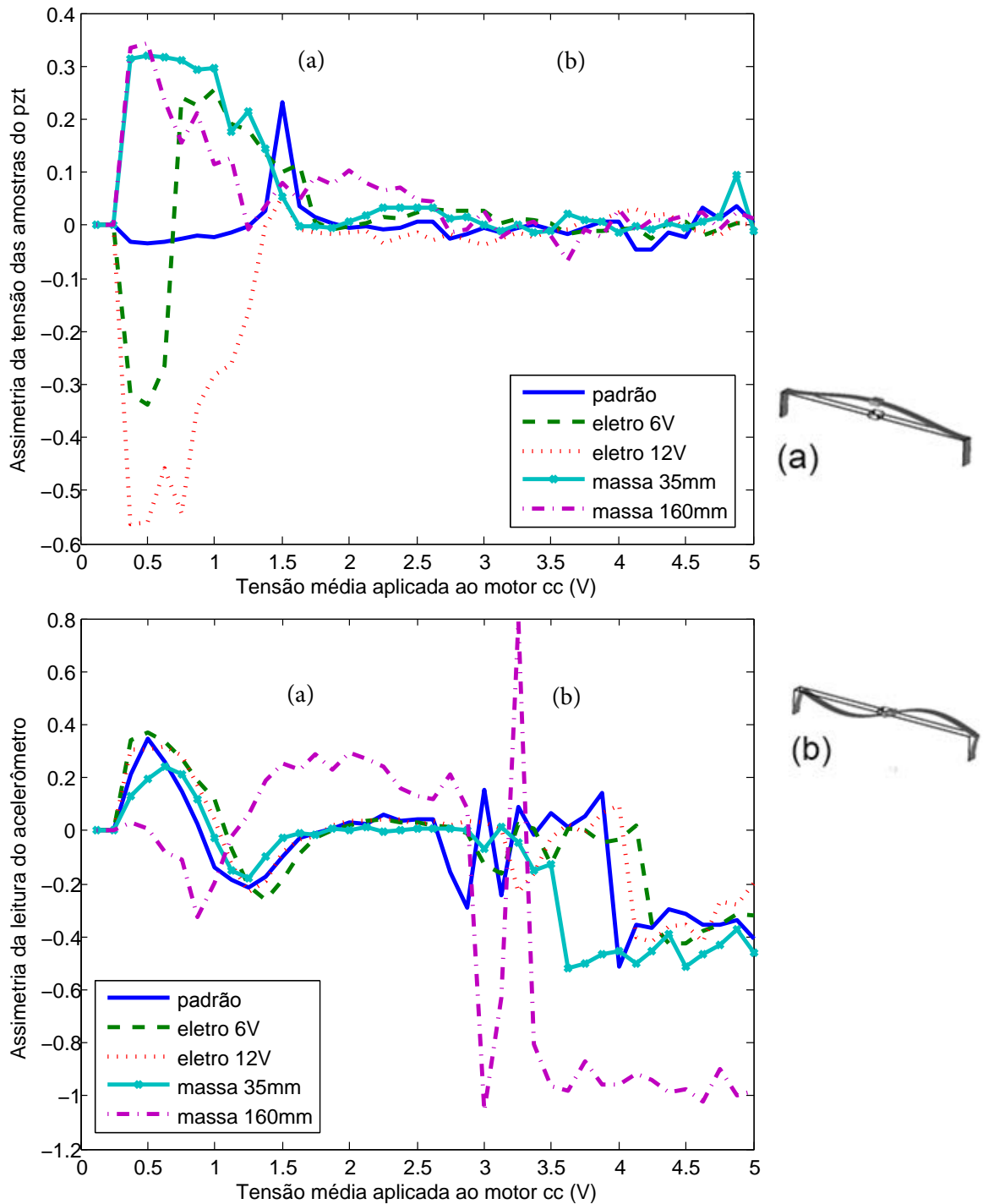


Figura 6.9: Coeficiente de assimetria das amostras do piezo e acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor cc

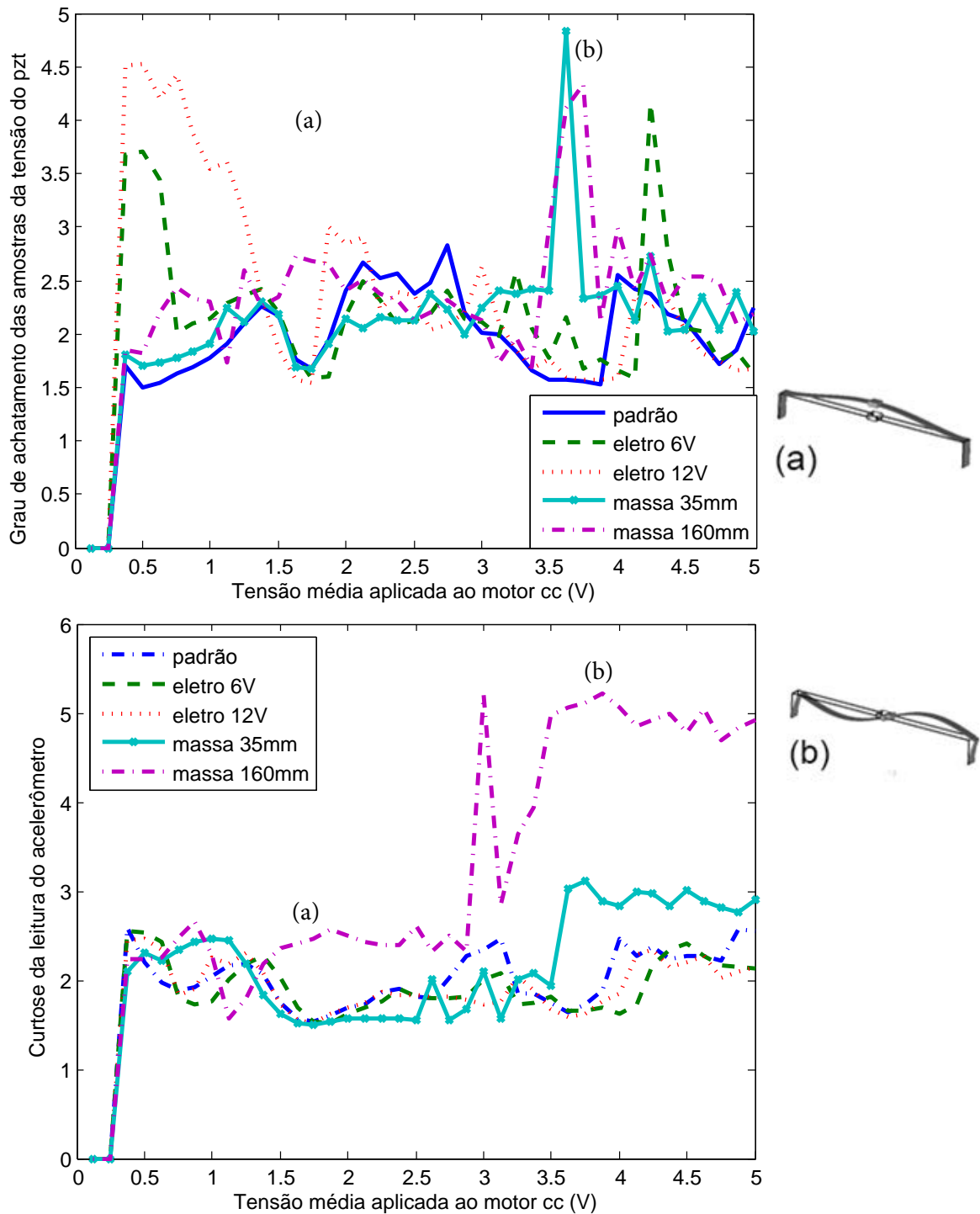


Figura 6.10: Coeficiente de curtose das amostras do piezo e acelerômetro em função da tensão média aplicada ao motor cc

Capítulo 7

Conclusões e propostas futuras

Um sistema de monitoração de integridade estrutural de custo baixo e com boa confiabilidade, cuja especificações não ficam muito atrás de sistemas com custo aproximadamente mil vezes maior, comprovou, através dos ensaios, que sua implantação pode ser possibilitada em sistemas que se deseja o monitoramento em tempo real, com viabilidade econômica, ou em laboratórios didáticos, onde possa haver um SMIE para cada aprendiz, com poucos riscos de existir grandes prejuízos.

7.1 Conclusões

As medidas do sistema desenvolvido se mostrou condizentes com as previsões. As respostas comparativas entre os dois sistemas, o desenvolvido e o da National Instruments, ficaram dentro dos valores esperados, levando em conta os tipos de sensores utilizados. O sensor piezolétrico realizou as conversões de deslocamento mecânicos em sinais elétricos conforme esperado.

O circuito eletrônico de condicionamento do sinal é de fácil construção, bem barato e funciona perfeitamente, sem promover distorções ou atrasos ao sinal.

O arduíno na qual foi utilizado para receber os sinais da chave óptica (que se comportou perfeitamente como um encoder) também controlou o nível médio de tensão elétrica no motor cc através do uso de PWM e ainda digitalizou os sinais provenientes do sensor piezolétrico com uma qualidade muito acima do mínimo exigido para sua total recuperação, e, mesmo com todas essas atividades, atendeu com sobra de recursos o seu emprego neste trabalho.

O custo de construção do sistema inteiro ficou aproximadamente 810 vezes menor que o sistema existente.

O SMIE demonstrou que, através de análises estatísticas das amostras em função das modificações, pode-se detectar e localizar o dano desde seu desenvolvimento inicial.

A disposição dos sensores na estrutura dependerá do tipo de análise estatística que irá usar. Tal análise pode ser escolhida pela variação de parâmetros que o sistema pode

sofrer ao longo do tempo, quanto menor for essa variação, maior deve ser a ordem do coeficiente dos momentos centrados na média, resumindo, x_2 (raiz da média quadrática) para grandes variações de parâmetros, x_3 (assimetria) para variações medianas de parâmetros e x_4 (curtose) para pequenas variações de parâmetros. Os sensores estarão posicionados na estrutura em relação também à provável direção dos deslocamentos. Para análises de assimetria e curtose, fixa-se na estrutura normal ao plano do deslocamento, para as análises de raiz da média quadrática, fixa-se na estrutura paralela ao plano do deslocamento.

7.2 Propostas para trabalho futuros

Sobre as características dos sensores, pode-se cercar as possibilidades dos graus de liberdade do sistema utilizando mais elementos piezoelétricos em planos diferentes e aplicando a forma estatística adequada. Neste contexto, um sensor piezo adicional fixado na lateral do pórtico poderá trazer os resultados equivalentes que o acelerômetro na viga se mostrou mais eficiente, isso implicaria em aumento de custo insignificante, na ordem dos centavos.

Neste mesmo sistema, pode-se adotar mais metodologias nos ensaios, como além de alterar a posição geométrica dos pontos de adição de massa, alterar também a quantidade de massa. A previsão destas modificações seriam apenas nas alterações das frequências naturais, mas pode-se confirmar se não haverá distorções características na distribuição.

Pode-se aproveitar os ensaios do SMIE e também proporcionar um estudo mais profundo nos sistemas de fonte não-ideal em vigas flexíveis, através de valores práticos de parâmetros que delimitam e quantificam a limitação de potência dos motores cc.

Referências Bibliográficas

Arduino Referencias. <<http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>>. Acessado em: 30-06-2015.

ATMEL, A. *8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash*. 2013. Disponível em: <<http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>>.

BALTHAZAR, J. M. et al. An overview on non-ideal vibrations. *Meccanica*, Springer, v. 38, n. 6, p. 613–621, 2003.

BELATO, D. et al. Chaotic vibrations of a nonideal electro-mechanical system. *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier, v. 38, n. 10, p. 1699–1706, 2001.

CASTÃO, K. A.; GOES, L. C.; BALTHAZAR, J. M. A note on the attenuation of the sommerfeld effect of a non-ideal system taking into account a mr damper and the complete model of a dc motor. *Journal of Vibration and Control*, SAGE Publications, v. 17, n. 7, p. 1112–1118, 2011.

CURIE, J.; CURIE, P. Développement, par pression, de lélectricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. *Comptes Rendus*, v. 91, p. 294–295, 1880.

CVETIĆANIN, L. Dynamics of the non-ideal mechanical systems: A review. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, v. 4, n. 2, p. 75–86, 2010.

DOEBLING, S. W. et al. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest*, Citeseer, v. 30, n. 2, p. 91–105, 1998.

FELIX, J. L.; BALTHAZAR, J. M.; BRASIL, R. M. On tuned liquid column dampers mounted on a structural frame under a non-ideal excitation. *Journal of Sound and Vibration*, Academic Press, v. 282, n. 3, p. 1285–1292, 2005.

FELIX, J. L. P.; BALTHAZAR, J. M.; BRASIL, R. Comments on nonlinear dynamics of a non-ideal duffing-rayleigh oscillator: Numerical and analytical approaches. *Journal of sound and Vibration*, Elsevier, v. 319, n. 3, p. 1136–1149, 2009.

GONÇALVES, P. et al. The dynamic behavior of a cantilever beam coupled to a non-ideal unbalanced motor through numerical and experimental analysis. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 333, n. 20, p. 5115–5129, 2014.

GUECHAICHIA, A.; TRENDAFILOVA, I. A simple method for enhanced vibration-based structural health monitoring. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2011. v. 305, n. 1, p. 012073.

- HADJILEONTIADIS, L. J.; DOUKA, E.; TROCHIDIS, A. Crack detection in beams using kurtosis. *Computers & structures*, Elsevier, v. 83, n. 12, p. 909–919, 2005.
- LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares*. [S.l.]: Bookman, 2007.
- LIPPMANN, G. Principe de la conservation de l'électricité, ou second principe de la théorie des phénomènes électriques. *J. Phys. Theor. Appl.*, v. 10, n. 1, p. 381–394, 1881.
- NARKIS, Y. Identification of crack location in vibrating simply supported beams. *Journal of sound and vibration*, Elsevier, v. 172, n. 4, p. 549–558, 1994.
- PARK, G. et al. Performance assessment and validation of piezoelectric active-sensors in structural health monitoring. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 15, n. 6, p. 1673, 2006.
- RYTTER, A. *Vibrational based inspection of civil engineering structures*. Tese (Doutorado) — Aalborg Universitet, 1993.
- SAMANTARAY, A. A note on internal damping induced self-excited vibration in a rotor by considering source loading of a dc motor drive. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Elsevier, v. 43, n. 9, p. 1012–1017, 2008.
- SOHN, H. et al. *A review of structural health monitoring literature: 1996-2001*. [S.l.]: Los Alamos National Laboratory Los Alamos, NM, 2004.
- SPIEGEL, M. R. *Estatística*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1984.
- TSUCHIDA, M. et al. On regular and irregular vibrations of a non-ideal system with two degrees of freedom. 1: 1 resonance. *Journal of Sound and Vibration*, Academic Press, v. 260, n. 5, p. 949–960, 2003.
- TSUCHIDA, M.; GUILHERME, K. de L.; BALTHAZAR, J. M. On chaotic vibrations of a non-ideal system with two degrees of freedom: resonance and sommerfeld effect. *Journal of Sound and Vibration*, Academic Press, v. 282, n. 3, p. 1201–1207, 2005.
- WANG, D. et al. Health monitoring of reinforced concrete structures based on pzt admittance signal. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*. [S.l.], 2009. p. 74931H–74931H.
- YAN, Y. et al. Development in vibration-based structural damage detection technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 21, n. 5, p. 2198–2211, 2007.
- ZUKOVIC, M.; CVETICANIN, L. Chaos in non-ideal mechanical system with clearance. *Journal of Vibration and Control*, SAGE Publications, v. 15, n. 8, p. 1229–1246, 2009.

Apêndice A

Geração da força eletromotriz por PWM

A força de excitação da viga é oriunda da rotação de um eixo com desbalanceamento de um motor CC conforme dito no item 3.1. As variações dessa força podem ser obtidas pela variação da tensão cc, o que seria equivalente à contínua, aplicada ao motor. A tensão será gerada pelo Arduino, sob a forma de tensão média equivalente de um sinal modulado por largura de pulso, PWM, pois seu controle terá uma aceitável precisão nos passos de incremento, tal precisão pode ser observada na figura A.1 cuja medidas foram obtidas utilizando o Multímetro trueRMS Minipa modelo ET-2517A. O nível de

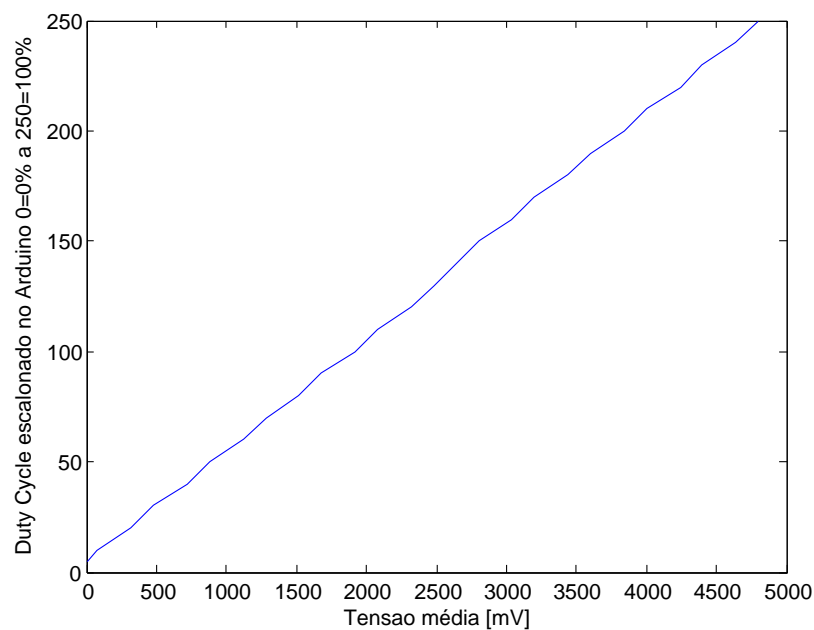


Figura A.1: Variações dos comando de duty-cycle pela tensão medida

amplitude máxima de tensão da PWM gerada pelo Arduino pode ser alterado pela

fonte de alimentação externa de 5V até 12V e seu valor médio é controlado pelo arduino através do controle da proporcionalidade do tempo com tensão, denominada Largura de Pulso em relação ao período completo da onda quadrada, essa proporcionalidade em taxa percentual é conhecida do termo em inglês como *Duty Cycle* e representada pela letra grega tau (τ), a Figura A.2 mostra este controle que é o princípio de funcionamento do PWM. O valor de tensão de um sinal modulado por largura de pulso correspondente

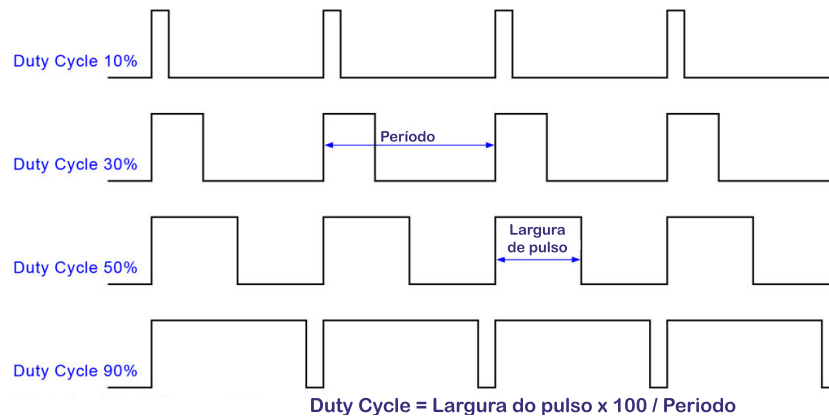


Figura A.2: Formas de onda de modulação por largura de pulso para várias larguras de pulso

a um valor de tensão contínua (V_{cc}) é conhecido como valor médio de tensão \bar{V} é dado pela razão do Ciclo de Trabalho (em porcentagem) por 100, multiplicado pela tensão máxima:

$$\bar{V} = \frac{\tau(\%)}{100} \times \hat{V} \quad (\text{A.1})$$

Utilizou-se a própria alimentação do terminal USB usado na comunicação serial, determinando o valor máximo de tensão de 5V. Para a realização de cada teste, a tensão de saída PWM foi variada de 0 a 5V em passos de 0,1V controlada por software para cada tipo de medida, tanto a *medida padrão* como com variações estruturais.

Apêndice B

Chassis NI PXIe-1078



Resumo das especificações

Especificações gerais

Quantidade de slots	9
Tipo de barramento PXI	Compatível com PXI híbrido PXI Express
Quantidade de slots para periféricos PXI	0
Quantidade de slots para periféricos PXI Express	3
Quantidade de slots híbridos para periféricos	5
Sistema operacional / target	Any
Suporte a LabVIEW RT	Sim
Largura de banda máxima do sistema	1.75 GB / s
Aceita módulos PXI e CompactPCI de 3U	Sim
Montagem opcional frontal ou traseira em rack	Sim
Controladora integrada	Não

Requisitos de alimentação

Potência total disponível	300 W
Faixa de tensão de entrada	100 V - 240 V
Faixa de frequência de entrada	50 Hz - 60 Hz
Fonte de alimentação	AC
Fonte de alimentação substituível em campo	Não
Monitoramento de tensão e controle de desativação da alimentação remota	Não

Resfriamento

Especificações gerais

Nível de pressão sonora do ventilador no modo automático	49.9 dBA
Potência sonora do ventilador no modo automático	59.3 dBA
Nível de pressão sonora do ventilador no modo alto	65.4 dBA
Potência sonora do ventilador no modo alto	74.1 dBA
Seletor de modo automático / alto do ventilador	Sim
Quantidade de ventiladores	2
Capacidade de resfriamento por slot	38.25 W

Especificações físicas

Comprimento	214.2 mm
Largura	355.6 mm
Altura	177 mm
Temperatura de operação	0 °C - 50 °C
Altitude máxima	2000 m

Apêndice C

Controlador NI PXIe-8115



Resumo das especificações

Especificações gerais

Tipo de controladora	Embarcada
Tipo de barramento PXI	PXI Express
Frequência de clock da CPU	2.5 GHz
Quantidade de núcleos	Dual-core
Memória padrão	2 GB
Memória máxima	8 GB
Sistema operacional / target	Windows
Slots necessários	4

Especificações físicas

Comprimento	21.6 cm
Largura	8.1 cm
Altura	13 cm
Temperatura de operação	5 °C - 50 °C
Opção de extensão de temperatura	0 °C - 55 °C
Altitude máxima	2000 m

Apêndice D

Módulo de Aquisição NI PXIe-4492



Resumo das especificações

Especificações gerais

Família de produtos	Dynamic Signal Analyzers
Tipo de medição	Accelerometer Voltage
Form Factor	PXI / PXI Express
Tipo de barramento PXI	PXI Express
Sistema operacional / target	Windows
Conformidade com RoHS	Sim

Entrada analógica

Canais single-ended	8
Canais diferenciais	0
Resolução da entrada analógica	24 bits
Faixa máxima de tensão	
Range	-10 V - 10 V
Sensitivity	14 μ Vrms
Faixa mínima de tensão	
Range	-1 V - 1 V
Sensitivity	2.2 μ Vrms
Quantidade de faixas	2
Amostragem simultânea	Yes
Memória on-board	4095 samples

Especificações gerais

Corrente de excitação	4 mA
Distorção harmônica total (THD)	98 dB
Faixa dinâmica	114 dB
Condicionamento de sinais	Anti-aliasing filter Current excitation

Saída analógica

Quantidade de canais	0
----------------------	---

E / S digitais

Canais bidirecionais	0
Canais somente de entrada	0
Canais somente de saída	0

Contadores / temporizadores

Contadores	0
------------	---

Especificações físicas

Comprimento	10 cm
Largura	6 cm
Altura	1 cm
Conector de E / S	InfiniBand connector

Apêndice E

Acelerômetro PCB 352C33

Acelerômetro 352C33	INGLÊS	SI	
DESEMPENHO			
Sensibilidade ($\pm 10\%$)	100 mV / g	10,2 mV / (m / s ²)	
Faixa de Medição	± 50 g PK	± 490 m / s ² pk	
Faixa de frequência ($\pm 5\%$)	0,5 para 10000 Hz	0,5 para 10000 Hz	
Faixa de frequência ($\pm 10\%$)	0,3 a 15000 Hz	0,3 a 15000 Hz	
Frequência Ressonância	≥ 50 kHz	≥ 50 kHz	
Resolução de banda larga (1-10000 Hz)	0,00015 g rms	0,0015 m / s ² rms	[3]
Não-linearidade	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	[1]
Sensibilidade transversal	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	[2]
De Meio Ambiente			
Limite de sobrecarga (Choque)	$\pm 5,000$ g pk	± 49000 m / s ² pk	
Faixa de temperatura (operação)	-65 A 200 ° F	-54 A 93 ° C	[4]
Sensibilidade Strain Base de Dados	0,003 g / $\mu\epsilon$	0.029 (m / s ²) / $\mu\epsilon$	[3]
Elétrico			
Tensão de Excitação	18 a 30 VDC	18 a 30 VDC	
Constante Corrente de Excitação	2 a 20 mA	2 a 20 mA	
Impedância de saída	≤ 200 Ohm	≤ 200 Ohm	
Saída de polarização de voltagem	7 a 12 VDC	7 a 12 VDC	
Quitação Constante de Tempo	1,0 a 2,5 seg	1,0 a 2,5 seg	
Tempo de deposição (dentro de 10% de viés)	<10 seg	<10 seg	
Ruído Espectral (1 Hz)	39 ug / $\sqrt{\text{HZ}}$	380 (iM / ² seg) / $\sqrt{\text{HZ}}$	[3]
Ruído Espectral (10 Hz)	11 ug / $\sqrt{\text{HZ}}$	110 (iM / ² seg) / $\sqrt{\text{HZ}}$	[3]
Ruído Espectral (100 Hz)	3,4 ug / $\sqrt{\text{HZ}}$	33 (iM / ² seg) / $\sqrt{\text{HZ}}$	[3]
Ruído Espectral (1 kHz)	1,4 ug / $\sqrt{\text{HZ}}$	14 (iM / ² seg) / $\sqrt{\text{HZ}}$	[3]
Físico			

Acelerômetro 352C33	INGLÊS	SI	
Tamanho - Altura	0,62 em	15,7 mm	
Peso	0,20 oz	5,8 gm	[3]
Sensing Elemento Sensitivo	Cerâmico	Cerâmico	
Tamanho - Hex	0,44 em	11.2 mm	
Sensing Geometry	Cisalhamento	Cisalhamento	
Material da caixa	Titânio	Titânio	
Vedação	Hermético	Hermético	
Conector Elétrico	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack	
Posição Conexão Elétrica	Lado	Lado	
Linha de montagem	10-32 Feminino	10-32 Feminino	
Torque de montagem	10 a 20 in-lb	113 para 226 cm N-	



Fonte: <http://www.pcb.com/products.aspx?m=352C33>

Apêndice F

Arduino UNO REV3 esquemático

