



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**LUÍS EDUARDO DE MAGELLA MATTOS TAVARES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM RECUPERADOR DE ENERGIA POR  
VIBRAÇÃO UTILIZANDO UM ELEMENTO PIEZOELÉTRICO  
ACOPLADO A UM MECANISMO DE ROTAÇÃO**

**OURO PRETO - MG  
2023**

**LUÍS EDUARDO DE MAGELLA MATTOS TAVARES**

**luis.tavares@aluno.ufop.edu.br**

**DESENVOLVIMENTO DE UM RECUPERADOR DE ENERGIA POR  
VIBRAÇÃO UTILIZANDO UM ELEMENTO PIEZOELÉTRICO  
ACOPLADO A UM MECANISMO DE ROTAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de  
Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Ouro Preto  
como requisito para a obtenção do  
título de Engenheiro Mecânico.

**Professor orientador:** DSc. Gustavo Paulinelli Guimarães

**Professor coorientador:** DSc. Ronilson Rocha

**OURO PRETO – MG  
2023**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T231d Tavares, Luis Eduardo De Magella Mattos.

Desenvolvimento de um recuperador de energia por vibração utilizando um elemento piezoelétrico acoplado a um mecanismo de rotação. [manuscrito] / Luis Eduardo De Magella Mattos Tavares. - 2023. 49 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães.

Coorientador: Prof. Dr. Ronilson Rocha.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Mecânica - Vibração. 2. Força (Mecânica). 3. Engenharia mecânica - Sistemas. 4. Energia - Conversão. 5. Filtros elétricos de cristal. I. Guimarães, Gustavo Paulinelli. II. Rocha, Ronilson. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Luís Eduardo de Magella Mattos Tavares**

**Desenvolvimento de um recuperador de energia por vibração utilizando um elemento piezoelétrico acoplado a um mecanismo de rotação**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 19 de julho de 2023

### Membros da banca

Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Ronilson Rocha - Coorientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Diogo Antônio de Sousa - Universidade Federal de Ouro Preto  
Me. João Carlos Vilela de Castro - Universidade Federal de Ouro Preto

Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/07/2023



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Paulinelli Guimaraes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/07/2023, às 18:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0563842** e o código CRC **0A2F0690**.

Aos meus pais e avós, aos amigos e aos  
professores.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus orientadores Professores Diogo, Gustavo, João Carlos e Ronilson pela atenção incentivo e orientação neste trabalho.

Aos meus professores do Instituto de Ciências Exatas e Biológicas (ICEB) por me ensinar os fundamentos de Cálculo, Física, Química e Programação que são imprescindíveis para o exercício da Engenharia.

Aos meus professores e técnicos da Escola de Minas (EMOP), com destaque para aqueles que são membros do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), os quais me propuseram inúmeros desafios e ensinamentos que me prepararam para a vida profissional.

Aos meus professores dos Colégios Arquidiocesano de Ouro Preto (CAOP), Nossa Senhora das Dores e Santo Agostinho que me ensinaram atenciosamente os conteúdos de educação básica, além de terem participado fortemente em minha formação humana, enfatizando os ensinamentos morais e éticos.

Aos meus queridos amigos de Ouro Preto (os que são naturais do município e os que são estudantes universitários), os de Belo Horizonte e os de Costa Dourada pelos momentos agradáveis, incluindo as conversas e travessuras diversas.

Às minhas babás e governantas Naná, Geralda, Rose e Silvia por todo zelo e carinho durante a minha infância e início da vida adulta.

À minha família (primos, tios, avós) pela companhia, carinho e apoio em minha formação.

Aos meus pais, meus maiores apoiadores e financiadores em tudo o que eu fiz e que proponho a fazer no futuro. Além do cuidado e dos diversos ensinamentos.

E aos minhas mascotes (cachorros e gatos) por toda fofura, diversão e companheirismo.

*“Aventurar-se causa ansiedade, mas deixar de se arriscar é perder a si mesmo. E aventurar-se no sentido mais elevado é precisamente tomar consciência de si próprio”.*

Søren Kierkegaard

## RESUMO

O objetivo desse trabalho foi alimentar uma carga elétrica com dispositivo de recuperação de energia do tipo piezoelétrico acoplado a um mecanismo de rotação. A justificativa deve-se à necessidade do monitoramento contínuo de equipamentos com o uso de sensores e dispositivos eletrônicos de baixo consumo utilizando fontes de energia sustentáveis. A revisão bibliográfica abordou os seguintes conteúdos: sistemas mecânicos, piezoelectricidade, fundamentos de conversão de energia elétrica e recuperação de energia baseada em vibrações mecânicas. Estes foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho, caracterizado como uma pesquisa experimental, quantitativa e exploratória, na qual o procedimento metodológico baseou-se no projeto descritivo que possibilitou a concepção da bancada de ensaio, e a partir disso foi feita a montagem do dispositivo recuperador de energia. O resultado em que houve mais energia recuperada foi aquele que o valor de potência elétrica foi de 5 mW para uma tensão elétrica contínua igual a 3,29 V. Conclui-se que a hipótese foi respondida e que é possível alimentar uma carga elétrica de baixo consumo com o dispositivo construído.

**Palavras-chave:** Vibrações Mecânicas. Recuperação de Energia. Piezoelectricidade. Conversão de Energia. Sistemas Mecânicos.

## ABSTRACT

*The objective of this work was to power an electric load with a piezoelectric energy harvester device coupled to a rotational mechanism. The justification is due to the need for continuous monitoring of equipment with the use of sensors and low-consumption electronic devices using sustainable energy sources. A literature review addressed the following contents: mechanical systems, piezoelectricity, fundamentals of electrical energy conversion and vibration energy harvesting. These were essential for the development of the work, characterized as an experimental, quantitative and exploratory research, in which the methodological procedure was based on the descriptive project that enabled the design of the test bench, and from that the assembly of the energy harvesting device was made. The result in which there was more energy recovered was the one in which the electrical power value was 5 mW at a direct voltage equal to 3.29 V. It is concluded that the hypothesis was answered and that it is possible to power a low-consumption electronic gadget with the built prototype.*

**Key-words:** Mechanical Vibrations. Energy Harvesting. Piezoelectricity. Energy Conversion. Mechanical Systems.

**LISTA DE SÍMBOLOS**

- $x$  - Posição.
- $\dot{x}$  - Velocidade.
- $\ddot{x}$  - Aceleração.
- $t$  - Tempo.
- $A$  - Amplitude máxima de oscilação; Área da seção transversal;
- $\omega_n$  - Frequência natural angular.
- $x_0$  - Posição inicial.
- $m$  - Massa.
- $\omega$  - Frequência angular; Frequência angular da força.
- $k$  - Rigidez.
- $f_0$  - Produto da amplitude máxima da força pelo inverso da massa.
- $I$  - Momento de inércia da área da seção transversal.
- $dA$  - Elemento infinitesimal de área.
- $y$  - Distância a um eixo.
- $k_{eq}$  - Rigidez equivalente.
- $E$  - Módulo de elasticidade.
- $l$  - Comprimento da viga; Comprimento.
- $Y$  - Deslocamento transversal da viga.
- $\rho$  - Densidade do material.
- $w$  - Deslocamento da linha neutra na direção transversal.
- $q$  - Força aplicada.
- $G$  - Módulo de elasticidade transversal.
- $\kappa$  - Coeficiente de cisalhamento.

- $\delta$  - Coeficiente referente a intensidade do amortecimento.
- $\alpha$  - Coeficiente referente a parte linear da rigidez.
- $\beta$  - Coeficiente referente a resposta oscilatória não-linear.
- $V$  - Tensão elétrica.
- $R$  - Resistência elétrica.
- $P$  - Potência elétrica.
- $\nu$  - Coeficiente de Poisson.
- $Q_m$  - Fator de qualidade.
- $K_p$  - Constante elétrica.
- $S_{ij}$  - Coeficiente de flexibilidade elástica.
- $D_{ij}$  - Coeficiente piezoelétrico direto.
- $K^\sigma$  - Fator de permissividade.
- $F$  - Força aplicada.
- $b$  - Base.
- $h$  - Espessura.
- $d$  - Coeficiente de deformação piezoelétrica.
- $e$  - Permissividade elétrica.
- $q$  - Carga elétrica.
- $\epsilon_{ij}$  - Permissividade elétrica do material piezoelétrico.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Exemplo de movimento harmônico: pêndulo simples.....	5
Figura 2: Posição.....	6
Figura 3: Deslocamento.....	6
Figura 4: Frank Oppenheimer operando uma bancada experimental.....	7
Figura 5: Um corpo rígido em translação retilínea.....	8
Figura 6: Um corpo rígido em translação curvilínea.....	8
Figura 7: Um corpo rígido girando em torno de um eixo fixo.....	9
Figura 8: Oscilação livre.....	10
Figura 9: Oscilação harmonicamente excitada.....	10
Figura 10: Efeito piezoelétrico direto.....	13
Figura 11: Efeito piezoelétrico indireto.....	13
Figura 12: Princípio de funcionamento de um circuito retificadora.....	15
Figura 13: Exemplo de um circuito retificador.....	15
Figura 14: Princípio de funcionamento de um sonar.....	16
Figura 15: Dispositivo com duas camadas piezoelétricas.....	16
Figura 16: Sistemas de recuperação de energia.....	19
Figura 17: Exemplo de um recuperador de energia.....	20
Figura 18: Esboço da montagem do experimento.....	23
Figura 19: Esboço do sistema mecânico.....	24
Figura 20: Chapa de aço de 3/8” .....	24
Figura 21: Motor de corrente contínua.....	25
Figura 22: Acoplamento rígido para o disco com o imã.....	25
Figura 23: Suporte fixador para a viga.....	26

Figura 24: Chapa de latão com lâminas de PZT-5H (viga).....	26
Figura 25: Protoboard de 830 pontos.....	27
Figura 26: Diagrama elétrico.....	28
Figura 27: Placa de aquisição.....	28
Figura 28: Diagrama elétrico com resistor.....	29
Figura 29: Tacômetro digital.....	31
Figura 30: Diagrama de blocos do LabVIEW.....	31
Figura 31: Painel frontal do LabVIEW.....	32
Figura 32: Montagem da bancada experimental e instrumentos de coleta de dados.....	33
Figura 33: Montagem da bancada experimental.....	34
Figura 34: Oscilação livre da viga.....	35
Figura 35: Oscilação forçada a uma frequência de 15 Hz.....	36
Figura 36: Oscilação forçada a uma frequência de 36 Hz.....	37
Figura 37: Oscilação forçada a uma frequência de 47,5 Hz.....	38
Figura 38: Oscilação forçada a uma frequência de 70,4 Hz.....	39
Figura 39: Valores de tensão contínua com presença de um resistor.....	40

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Propriedades do PZT-5H. ....	17
Tabela 2 - Dimensões da Viga. ....	25
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do latão 792 (UNS C79200). ....	26
Tabela 4 - Variáveis e indicadores. ....	30

**LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação 1 - Oscilação livre de um sistema massa-mola com um grau de liberdade.....	10
Equação 2 - Oscilação forçada de um sistema massa-mola com um grau de liberdade.....	10
Equação 3 - Oscilação forçada de um sistema massa-mola com um grau de liberdade.....	10
Equação 4 - Frequência natural.....	11
Equação 5 - Momento de inércia da área da seção transversal.....	11
Equação 6 - Rigidez equivalente.....	12
Equação 7 - Rigidez equivalente para uma viga em balanço.....	12
Equação 8 - Viga de Euler-Bernoulli em vibração livre.....	12
Equação 9 - Viga de Timoshenko-Ehrenfest com seção transversal uniforme.....	12
Equação 10 - Modelo de Duffing.....	12
Equação 11 - Potência elétrica.....	14
Equação 12 - Tensão elétrica gerada em uma viga piezoelétrica bimorfa em balanço.....	18
Equação 13 - Deslocamento transversal da viga piezoelétrica bimorfa em balanço.....	18
Equação 14 - Carga elétrica da viga piezoelétrica bimorfa em balanço.....	18

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema .....	1
1.2	Justificativa .....	3
1.3	Objetivos .....	4
1.3.1	Geral.....	4
1.3.2	Específicos .....	4
1.4	Estrutura do Trabalho .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1	Sistemas Mecânicos.....	5
2.2	Piezoelasticidade e Fundamentos de Conversão de Energia Elétrica.....	13
2.3	Recuperação de Energia Baseada em Vibrações Mecânicas .....	18
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
3.1	Tipos de Pesquisa .....	21
3.2	Materiais e Métodos .....	23
3.3	Variáveis e Indicadores.....	30
3.4	Instrumento de Coleta de Dados .....	31
3.5	Tabulação de Dados.....	32
3.6	Considerações Finais .....	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>34</b>
4.1	Resultados .....	34
4.2	Discussões.....	41
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>44</b>
5.1	Conclusão.....	44
5.2	Recomendações.....	44
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>45</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

Os fenômenos de vibração estão presentes nos mais diversos equipamentos na indústria, principalmente no setor mecânico e, por conta disso, surge-se a importância de compreender os fundamentos de vibrações mecânicas.

Rao (2008, p. 6) aborda que “a vibração de um sistema envolve a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para energia potencial”. Neste sentido, a chamada vibração determinística é um tipo de classificação para os tipos de vibrações, que, segundo Rao (2008) são oscilações conhecidas em qualquer instante de tempo e presentes em vários equipamentos industriais, como os motores.

Logo, Rao (2008) aborda que a maioria dos motores têm problemas de vibração em razão do desbalanceamento inerente e, o consequente desequilíbrio pode ser causado pela falha de projeto ou manutenção inadequada. Assim, uma análise de dados da aceleração, força e deslocamento de um determinado ponto em um equipamento permite a detecção de falhas e anomalias em sua estrutura e em seus componentes (RAO, 2008). Isso é possível devido à avaliação da vibração, que, de forma quantitativa, evidencia o bom ou mau funcionamento do equipamento.

Portanto, existe a necessidade de empregar sensores para monitorar continuamente as vibrações dos equipamentos. Para isso, é necessário selecionar uma fonte de energia para alimentar os sensores.

A respeito do desenvolvimento de sistemas de alimentação de energia elétrica sem o uso de baterias para dispositivos de baixo consumo, como os sensores, López (2011) traz importantes contribuições que merecem destaque. Conforme argumentado pelo autor, a busca por soluções mais sustentáveis e eficientes para a alimentação de dispositivos de baixo consumo tem motivado o avanço tecnológico em diversas áreas do conhecimento, sobretudo nas engenharias elétrica e mecânica.

Nesse contexto, a abordagem denominada *Energy Harvesting* ou Recuperação de Energia tem despertado crescente interesse e se apresentado como uma alternativa promissora para a alimentação de dispositivos de baixa potência. Tal abordagem consiste na conversão de diferentes formas de energia, tais como cinética, térmica ou eletromagnética, em energia

elétrica, por meio do emprego de materiais piezoelétricos, indutores eletromagnéticos ou placas fotovoltaicas (SPIES, 2013).

Essa tecnologia tem ganhado relevância em diferentes campos de aplicação, como em sistemas de monitoramento e controle de processos industriais, automação residencial, saúde, transporte, entre outros. Além disso, a energia gerada por meio da recuperação de energia apresenta vantagens significativas em relação às baterias convencionais, tais como a redução do impacto ambiental e a eliminação da necessidade de manutenção ou troca de baterias (ERTURK, 2011).

Para efeitos de aplicação do estudo, percebe-se a relação entre a recuperação de energia e a Manutenção Preditiva, pois, de acordo com Pinto (2001), a Manutenção Preditiva requer condições básicas, sendo, em alguns casos, a possibilidade de monitorar ou medir algum parâmetro referente ao equipamento. Neste sentido, é possível a adoção de equipamentos alimentados por dispositivos de *Energy Harvesting*, no intuito de monitorar o equipamento em funcionamento como ação preventiva baseada na condição o qual encontra-se o equipamento (XENOS, 1998), favorecendo, assim, o acompanhamento de componentes, mesmo que estes estejam em difícil acesso para o operador.

Dessa forma, para o desenvolvimento deste trabalho, é necessário selecionar o tipo do dispositivo de recuperação de energia a ser empregado. Erturk (2011) destaca que, materiais que possuem o efeito piezoelétrico são largamente empregados para dispositivos de *Energy Harvesting*, devido à sua versatilidade, por gerar valores de tensão e potência condizentes para a alimentação de redes de sensores sem fio.

O efeito piezoelétrico é estudado por Callister (2008), que define a piezoelectricidade como uma propriedade exibida por alguns materiais cerâmicos, a qual pode ser entendida como a produção de eletricidade pela pressão. Quando o material piezoelétrico é submetido a forças externas, ocorre sua deformação, o que, ocasionalmente resulta em uma polarização que gera um campo elétrico. Por conseguinte, é estabelecida uma diferença de potencial elétrico que pode ser utilizada como fonte de energia elétrica em pequena escala.

Como resultado, busca-se empregar dispositivos recuperadores de energia do tipo piezoelétrico que serão aplicados em elementos rotativos. Para Norton (2010), os elementos rotativos estão presentes em diversas máquinas para transmitir movimento de rotação e torque de uma posição a outra, a exemplo, eixo de turbina eólica. Assim, a proposta deste estudo é

desenvolver um dispositivo de alimentação para um dispositivo eletrônico, que pode ser um sensor, com o intuito de monitorar um elemento rotativo.

Logo, de acordo com o contexto, tem-se a seguinte problemática:

**Como alimentar uma carga elétrica com um dispositivo de recuperação de energia do tipo piezelétrico acoplado a um mecanismo de rotação?**

## **1.2 Justificativa**

A saber, Erturk (2011) afirma que a recuperação de energia baseada em vibrações mecânicas tem recebido mais atenção desde o início dos anos 2000. O mesmo autor relata que a motivação para a área de estudo se deve pela baixa demanda de energia para alguns componentes eletrônicos como redes de sensores sem fio, empregados para aplicações de monitoramento.

É válido ressaltar que, considerando o interesse em monitorar processos, existem abordagens tratadas pela automação industrial, entre as quais está o emprego de sensores conectados em uma rede sem fio. O Portal da Indústria (2020) exemplifica a situação de uma pequena indústria que produz massas para pastel e pizza em Salvador, a Japastel. Depois de instalar sensores na máquina de empacotamento de pizza a empresa elevou a capacidade produtiva em 33% entre 2018 e 2019. Isso ocorreu devido ao monitoramento otimizado dos processos de produção pelo emprego dos sensores, o que melhorou a qualidade dos produtos sem aumentar o número de colaboradores e os posteriores custos de produção. Devido a esse resultado, o emprego de tecnologias para monitoramento é atrativo para a indústria em geral.

Levando em conta a atratividade de implementar a tecnologia de *Energy Harvesting* para a indústria, Fu (2016) afirma que há menos investigação e aproveitamento de mecanismos rotativos como fonte de energia para ser recuperada, se comparado a mecanismos translacionais. Com isso, existe a oportunidade do desenvolvimento de dispositivos para monitorar sistemas rotacionais como a medição da pressão de pneus (WETSBY, 2012), avaliação de energia de fluxo de fluidos (HAMLEHDAR, 2019), e, por fim, o próprio equipamento que alimenta o dispositivo de *Energy Harvesting* (KOUMOTO, 2012).

Dadas as capacidades de implementação e os beneficiamentos que podem ser obtidos com o desenvolvimento de dispositivos de recuperação de energia para mecanismos rotativos, tem-se a justificativa para a realização deste trabalho.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Geral**

Alimentar uma carga elétrica a partir de um dispositivo de recuperação do tipo piezoelétrico acoplado a um mecanismo de rotação.

### **1.3.2 Específicos**

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre: sistemas mecânicos, piezoeletricidade, fundamentos de eletrônica e recuperação de energia baseada em vibrações mecânicas;
- Elaborar um procedimento metodológico para montar uma bancada com dispositivo de recuperação de energia;
- Aplicar o procedimento metodológico para desenvolver o dispositivo recuperador de energia;
- Avaliar se o dispositivo recuperador de energia pode ser empregado para alimentar uma carga elétrica.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

O trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo que no primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo consiste em uma revisão bibliográfica, a qual define os principais conceitos abordados e explicita informações relevantes para a sequência do trabalho.

No capítulo 3 (três) é abordada a metodologia utilizada, descrevendo os equipamentos e componentes empregados na montagem da bancada experimental.

O quarto capítulo contém os resultados experimentais que são apresentados em gráficos e há uma discussão acerca dos valores obtidos.

No capítulo 5 (cinco) é reservado para a conclusão do trabalho realizado, descrevendo o cumprimento dos objetivos e discorrendo sobre possíveis trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sistemas Mecânicos

Os sistemas mecânicos constituem-se da associação de elementos estruturais e mecânicos com o objetivo de transmitir esforços, forças e momentos (GANS, 2014).

Para um melhor entendimento desse trabalho, é importante revisar conceitos acerca de cinemática e de vibrações mecânicas.

Rao (2008, p. 6) preleciona que:

Qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado *vibração* ou *oscilação*. O balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda dedilhada são exemplos típicos de vibração. A teoria de vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles.

Balachandran (2010) afirma que as vibrações estão presentes em diversos aspectos do cotidiano. Movimentos presentes no corpo humano - como o batimento cardíaco e a vibração das cordas vocais durante a fala - são periódicos, ou seja, se repetem após um intervalo de tempo, como o exemplo da figura 1. A oscilação também é conhecida como movimento harmônico (TIPLER, 2009).

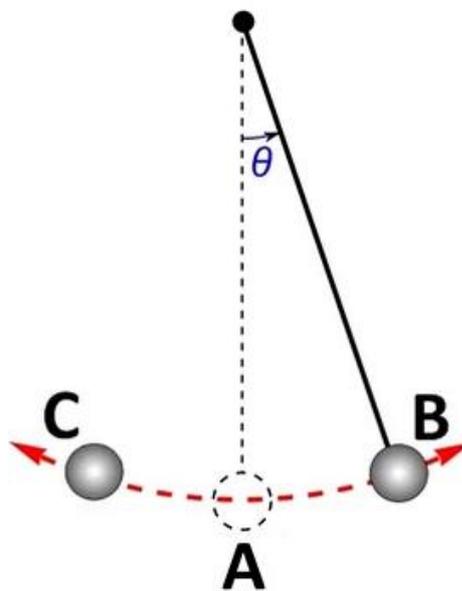


Figura 1: Exemplo de movimento harmônico: pêndulo simples  
Fonte: Toda Matéria, 2023.

Para entender os fenômenos de vibração, é importante definir as grandezas físicas acerca do movimento, as quais são: posição, deslocamento, velocidade e aceleração. Ademais, a posição ( $x$ ) de um corpo refere-se à localização deste no espaço que está ilustrada na figura 2.

O deslocamento é entendido como a mudança da posição do corpo, visto na figura 3. A velocidade ( $\dot{x}$ ) - por sua vez - é definida como o quociente do deslocamento pelo intervalo de tempo e, por fim, a aceleração ( $\ddot{x}$ ) é descrita pela variação da velocidade em um instante no tempo (HIBBELER, 2005).

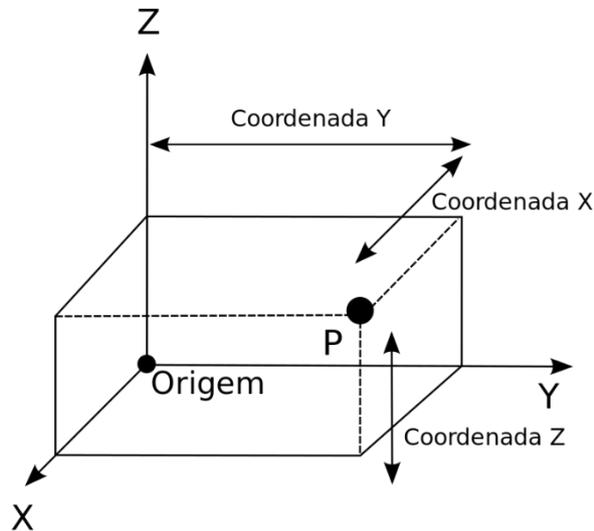


Figura 2: Posição  
Fonte: Wikipédia, 2022.

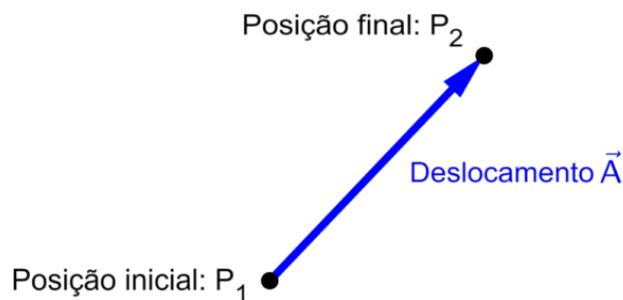


Figura 3: Deslocamento.  
Fonte: Neurochispas, 2023.

As grandezas anteriormente descritas são utilizadas para descrever o movimento harmônico. Hewitt (2015) descreve que a condição para haver movimento harmônico simples é que a força restauradora seja proporcional ao deslocamento em relação ao equilíbrio, sendo que essa condição é satisfeita, pelo menos aproximadamente, para a maioria das vibrações. A curva característica de um movimento harmônico simples representado em um gráfico da posição em função do tempo é uma curva senoidal que pode ser obtida, por exemplo, com o traçado deixado por um pêndulo oscilando sob uma folha de papel se movendo na direção transversal, ilustrado na figura 4 (Hewitt apud Oppenheimer, 2015, p. 358).



Figura 4: Frank Oppenheimer operando uma bancada experimental.  
Fonte: Hewitt, 2015.

Para desenvolver um equacionamento matemático referente ao movimento do sistema mecânico, deve-se saber o seu número de graus de liberdade, que é definido como o número de coordenadas independentes necessárias para definir a posição do sistema em movimento (NORTON, 2010).

Os conceitos anteriormente abordados têm aplicação na descrição quantitativa do movimento de um corpo, que pode ocorrer em forma de translação e/ou rotação. Segundo a descrição de Beer (2006), a translação de um corpo ocorre quando este se move de tal forma que todas as partículas mantêm seu movimento em paralelo, podendo ocorrer em uma trajetória retilínea ou curvilínea, exemplificadas nas figuras 5 e 6 respectivamente. Completando a afirmação anterior, Hibbeler (2005) argumenta que a rotação é um fenômeno em que um eixo de referência é tomado como base para que o corpo gire, e todas as partículas que o compõem descrevem um movimento circular, como é visto na figura 7.

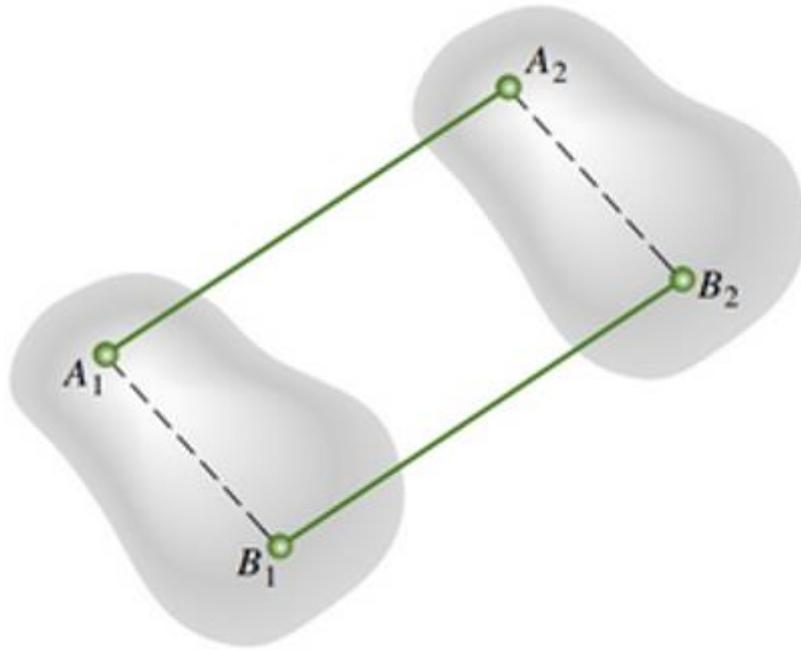


Figura 5: Um corpo rígido em translação retilínea.  
Fonte: Beer, 2006.

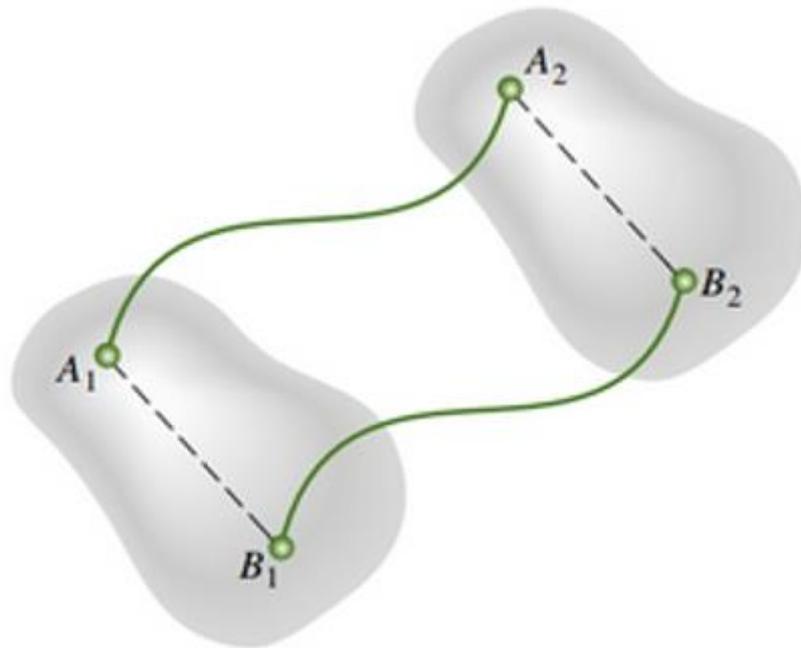


Figura 6: Um corpo rígido em translação curvilínea.  
Fonte: Beer, 2006.

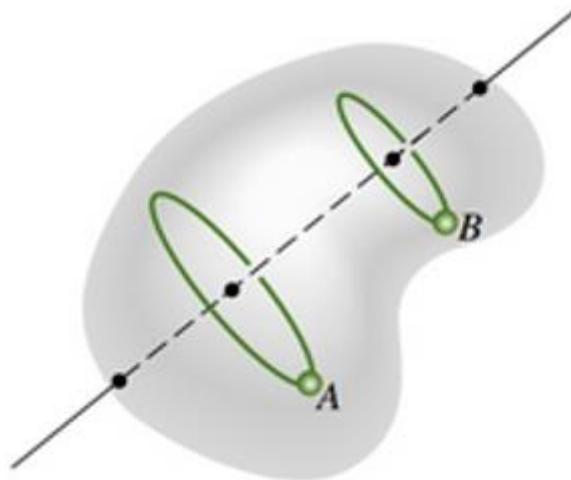


Figura 7: Um corpo rígido girando em torno de um eixo fixo.  
Fonte: Beer, 2006.

A partir dos conceitos descritos sobre movimento e vibrações mecânicas, pode-se determinar a forma e tamanho de componentes de sistemas mecânicos. Isso é feito por meio da análise dinâmica, que estuda as forças envolvidas no movimento requisitado, conforme descrito por Shigley (1969), com a finalidade de avaliar os esforços que são submetidos nos corpos – observando a resistência do material, e também a deslocamento, velocidade e aceleração resultantes, que induzem na vibração mecânica.

Devido à presença de vibrações mecânicas durante o movimento de um mecanismo, é importante definir os conceitos de vibrações livre e forçada. Balachandran (2010) preleciona que a vibração livre ocorre para um sistema mecânico que oscila devido apenas a uma perturbação inicial, ou seja, após o início do movimento não haverá outro esforço externo aplicado sob os componentes do mecanismo.

A vibração forçada se dá quando há esforço externo aplicado ao sistema mecânico durante o seu movimento, ou quando ele já está submetido a uma vibração. Se este esforço for de natureza harmônica, então a vibração forçada será do tipo harmonicamente excitada (CRAIG, 2006).

A equação 1 e a figura 8 referem-se a um corpo em oscilação livre, enquanto a figura 9 e as equações 2 e 3 são para a oscilação forçada (harmonicamente excitada). As equações em questão são adequadas para descrever um sistema massa-mola com um grau de liberdade sem amortecimento (RAO, 2008).

$$x(t) = A \text{sen}(\omega_n t); \quad (1)$$

Onde  $x$  é a posição,  $t$  é o tempo,  $A$  é a amplitude máxima de oscilação e  $\omega_n$  é a frequência natural.

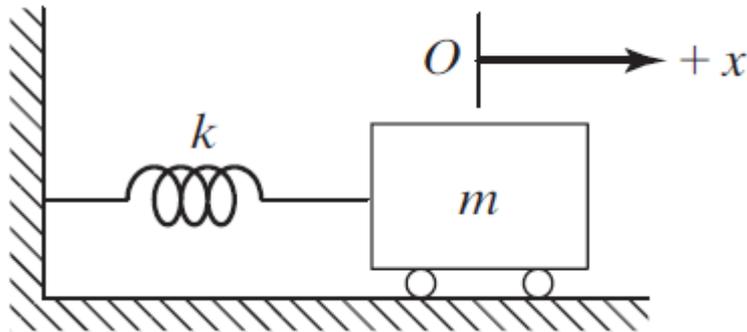


Figura 8: Oscilação livre.

Fonte: Rao, 2008.

$$x(t) = \left(x_0 - \frac{F_0}{k - m\omega^2}\right) \cos \omega_n t + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_n}\right) \text{sen} \omega_n t + \left(\frac{F_0}{k - m\omega^2}\right) \cos \omega t; \quad (2)$$

Reescrevendo a equação 2, multiplicando e dividindo por  $(m)$ , tem-se a equação 3.

$$x(t) = \left(x_0 - \frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2}\right) \cos \omega_n t + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_n}\right) \text{sen} \omega_n t + \left(\frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2}\right) \cos \omega t; \quad (3)$$

Onde  $x_0$  é a posição inicial,  $F_0$  é a amplitude máxima da força,  $m$  é a massa,  $\omega$  é a frequência angular da força,  $k$  é a constante de rigidez e  $f_0 = F_0/m$ .

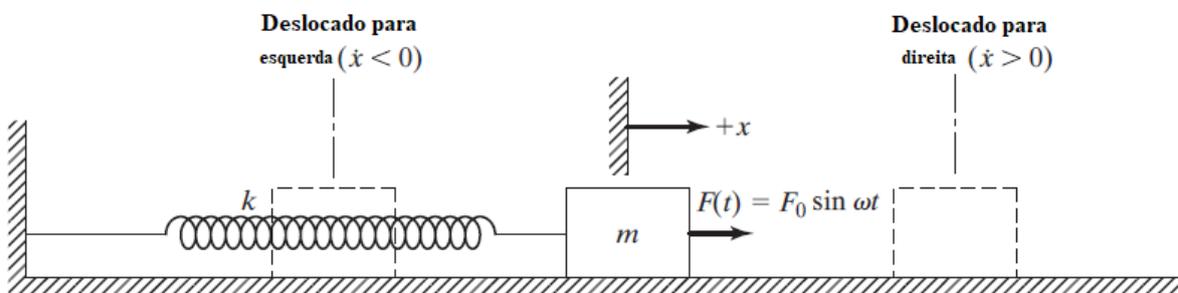


Figura 9: Oscilação harmonicamente excitada.

Fonte: Adaptado de Rao, 2008.

Percebe-se que há um termo “ $\omega_n$ ” presente nas equações 1 e 2. Este é uma constante que é nomeada de frequência natural do sistema (INMAN, 2018). Quando o sistema oscilar em

vibração livre, assim como o da figura 8, ele terá sua frequência de oscilação igual a natural que é dada pela equação 4.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad (4)$$

Em uma oscilação forçada, note que tanto o segundo como o terceiro termos da equação não são definidos se a frequência de excitação for igual à frequência natural. Note também que, à medida que a frequência de excitação se aproxima da frequência natural, a amplitude da vibração resultante torna-se cada vez maior. Esse grande aumento de vibração define o fenômeno da ressonância, que tende a levar a falha ou até quebra da mola (INMAN, 2018).

Outro aspecto importante a ser descrito é a deflexão de um corpo. Quando um elemento estrutural é submetido a um carregamento ocorre a sua deformação. São muito utilizadas em projetos de engenharias civil e mecânica as vigas, que são membros delgados carregados perpendicularmente ao seu eixo longitudinal. O estudo da deflexão de uma viga é importante para avaliar se o carregamento aplicado e a deformação sofrida são aceitáveis para garantir a integridade da estrutura (LEET, 2009).

Quando uma viga é suportada em apenas um ponto, que restringe os movimentos de rotação e de translação é dito que ela está engastada. Sobre essa condição é dita que ela está em balanço (HIBBELER, 2004).

Existe uma propriedade mecânica dos materiais chamada de módulo de elasticidade ( $E$ ), sendo que este pode ser considerado como uma resistência do material à deformação elástica. Esse é um importante parâmetro de projeto utilizado para calcular deflexões elásticas (CALLISTER, 2008). Outro parâmetro geométrico que deve ser definido é o momento de inércia de área da seção transversal ( $I$ ). Este é definido como a integral do produto dos elementos de área ( $dA$ ) de uma figura plana pelo quadrado de suas distâncias a um eixo de referência no plano da figura ( $y$ ), como está na equação 5 (HIBBELER, 2004).

$$I = \int y^2 dA; \quad (5)$$

De acordo com Martha (2010) ao se multiplicar esses dois parâmetros (módulo de elasticidade e momento de inércia) determina-se a rigidez à flexão do corpo ( $EI$ ). Tipler (2009)

preleciona que a rigidez equivalente de um corpo ( $k_{eq}$ ) pode ser entendida como a razão da força aplicada sobre a deformação sofrida, destacado pela equação 6.

$$k_{eq} = \frac{F}{x}; \quad (6)$$

Para uma viga em balanço, a sua rigidez equivalente pode ser calculada pela equação 7 (RAO, 2008).

$$k_{eq} = \frac{3EI}{l^3}; \quad (7)$$

Onde  $l$  é o comprimento da viga.

O movimento de uma viga sobre vibração livre pode ser descrito pela equação de Euler-Bernoulli (8) (CRAIG, 2006).

$$\frac{d^4Y}{dx^4} - \omega^2 \frac{\rho A}{EI} Y = 0; \quad (8)$$

Onde  $Y$  é o deslocamento transversal da viga,  $\rho$  é a densidade do material e  $A$  é a área da seção transversal.

Para vigas de menor comprimento existe a Teoria de Viga Grossa, ou de Timoshenko-Ehrenfest, a qual considera os efeitos da deformação de cisalhamento e da inércia rotacional (CRAIG, 2006). A equação 9 é adequada para uma viga com seção transversal uniforme:

$$EI \frac{d^4w}{dx^4} = q(x) - \frac{EI}{\kappa AG} \frac{d^2q}{dx^2}; \quad (9)$$

Onde  $w$  é o deslocamento da linha neutra na direção transversal,  $q$  é força aplicada sobre a viga,  $G$  é o módulo de elasticidade transversal e  $\kappa$  é o coeficiente de cisalhamento.

Para um sistema mecânico em que a sua rigidez não se comporte de forma linear, a análise de movimento pode ser descrita por meio do modelo de Duffing, representado pela equação 10 (BERGER, 1997):

$$\ddot{x} + \delta \dot{x} + \alpha x + \beta x^3 = F_0 \cos(\omega t); \quad (10)$$

Onde  $\delta$  determina a intensidade do amortecimento,  $\alpha$  controla a parte linear da rigidez e  $\beta$  é o coeficiente responsável pela resposta oscilatória não-linear.

## 2.2 Piezoelectricidade e Fundamentos de Conversão de Energia Elétrica

Com base nos conceitos elucidados acerca dos sistemas mecânicos, é possível abordar o próximo tópico da presente revisão, a saber: a piezoelectricidade.

A descoberta do efeito piezoelétrico remonta a 1880, quando os irmãos Pierre e Jacques Curie observaram que certos cristais, como o quartzo, adquirem uma polarização elétrica quando são deformados (COTTONE, 2011). Adicionalmente, a aplicação de um campo elétrico a um material piezoelétrico resulta em sua deformação, tornando esses cristais altamente relevantes em aplicações como sensores de deformação (baseados no efeito piezoelétrico direto) e atuadores, que são baseados no efeito piezoelétrico inverso (quando é aplicada uma tensão elétrica no material e ele sofre uma deformação mecânica), conforme descrito por Spies (2013). As figuras e demonstram o efeito piezoelétrico direto e indireto.

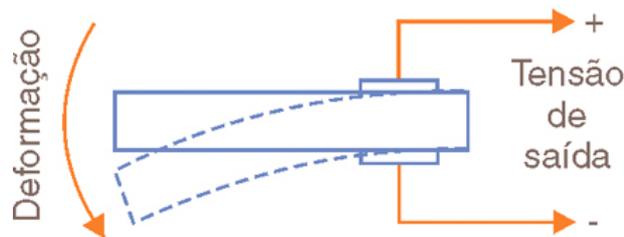


Figura 10: Efeito piezoelétrico direto.  
Fonte: Adaptado de Gomes, 2017.

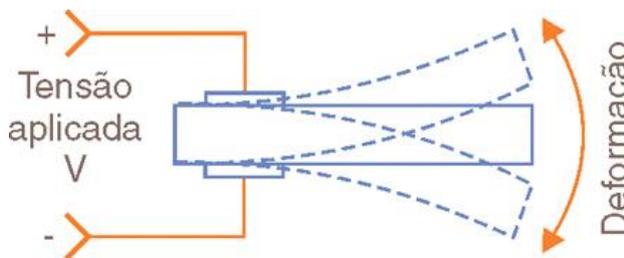


Figura 11: Efeito piezoelétrico indireto.  
Fonte: Adaptado de Gomes, 2017.

Conforme destacado por Markus (2002), a diferença de potencial elétrico surge da interação e concentração de cargas elétricas, o que cria a possibilidade de condução de eletricidade. Assim, a grandeza física correspondente e associada à diferença de potencial elétrico entre dois pontos é denominada de tensão elétrica ( $V$ ), sendo avaliada em volts, conforme elucidado por Halliday (2023).

A existência de uma diferença de potencial elétrico em um circuito elétrico fechado promove a movimentação de elétrons livres, o que caracteriza o fenômeno conhecido como corrente elétrica, cuja unidade de medida é o ampere (NUSSENZVEIG, 2015). Ademais, a corrente elétrica pode apresentar um fluxo unidirecional, denominado corrente contínua, ou ser oscilatória, com inversão periódica de sentido, que é a corrente alternada (MARKUS, 2002).

Todo material apresenta uma oposição ao movimento dos elétrons, o que leva a uma perda de energia. Essa característica é conhecida como resistência elétrica ( $R$ ) - medida em ohms - e está relacionada às propriedades do material e a geometria do meio condutor. A resistência elétrica em circuito induz a uma queda de tensão elétrica do circuito. De acordo com a lei de conservação da energia, a redução da diferença de potencial elétrico em um circuito deve ser acompanhada por uma conversão da energia para outra forma qualquer, seja em trabalho ou em calor, sendo essa propriedade associada à potência elétrica, que pode ser determinada em um circuito pela equação 11 (HALLIDAY, 2023).

$$P = V^2/R; \quad (11)$$

Outra propriedade elétrica importante é a capacitância, que, de acordo com Tipler (2009), representa a quantidade de carga elétrica que pode ser armazenada em um material. Isso permite o armazenamento de energia e a liberação rápida de corrente elétrica. Devido a essas características, o capacitor é um elemento que se opõe a variações de tensão elétrica. Essa propriedade recebe o nome de reatância capacitiva (BOYLESTAD, 2012). Com isso, o capacitor é empregado em aplicações que necessitem da estabilização do potencial elétrico, como é utilizado em um circuito retificador (HOROWITZ, 2017).

A partir do efeito piezoelétrico é gerada tensão elétrica alternada (CALLISTER, 2008). Entretanto, existe a possibilidade de que a tensão precise ser contínua. Para isso podem ser empregados dispositivos eletrônicos conhecidos como diodos semicondutores, os quais permitem a condução de corrente em apenas um sentido (HAYT, 2013). Essa propriedade permite a construção da ponte retificadora, que funciona com a entrada de uma tensão alternada e saída de uma tensão pulsante em valor positivo, como está exemplificado nas figuras 12 e 13.

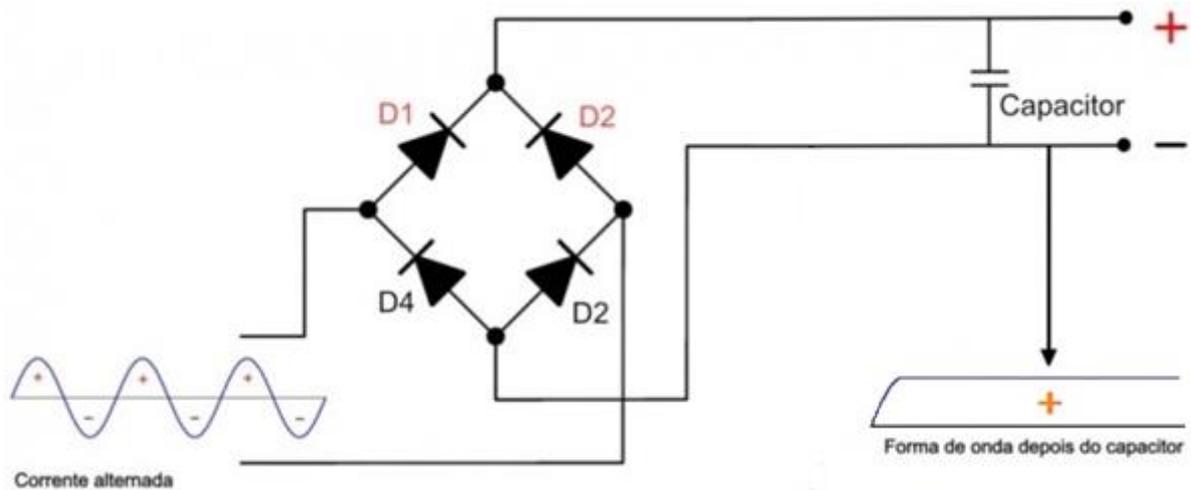


Figura 12: Princípio de funcionamento de um circuito retificador.  
 Fonte: Adaptado de Mundo da Elétrica, 2023.



Figura 13: Exemplo de um circuito retificador.  
 Fonte: Adaptado de AutoCore Robótica, 2023.

Com a utilização de um circuito eletrônico, é possível empregar elementos piezoelétricos para algumas finalidades bastante úteis, que serão apresentadas a seguir.

A exemplo de aplicação do efeito piezoelétrico, Langevin em 1917 utilizou de cristais de quartzo excitados eletricamente para emitir e receber pulsos sonoros de alta frequência em meio subaquático. Este experimento proporcionou a criação do sonar, que é utilizado para determinar a distância de um submarino a um obstáculo, como é visto na figura 14 (CADY, 2018).

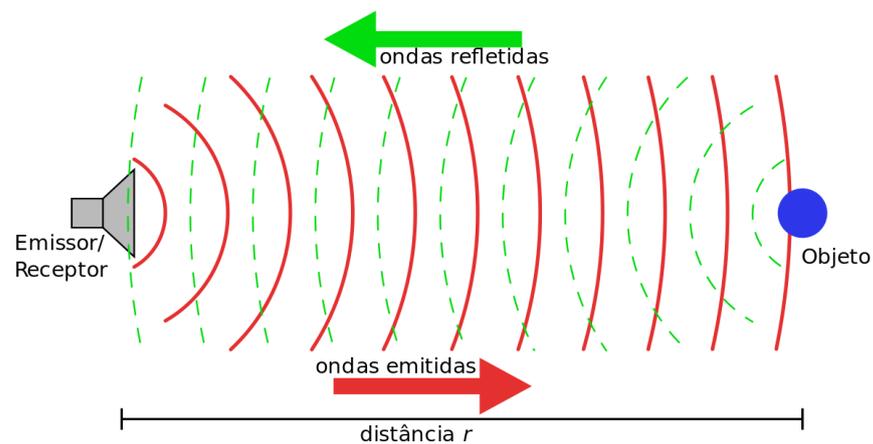


Figura 14: Princípio de funcionamento de um sonar.  
Fonte: Wikipédia, 2023.

Ajitsaria et al. (2007) desenvolveram um modelo de viga em balanço para geração de energia usando uma aproximação analítica baseada na teoria de viga de Euler-Bernoulli e nas equações de Timoshenko. Jeong et al. (2008) investigaram a possibilidade de combinar a frequência de vibração externa com a frequência de ressonância de um dispositivo com duas camadas piezelétricas (bimorfa), o que proporciona maior tensão elétrica gerada pela deformação do elemento piezoelétrico. Esta montagem está disposta na figura 15.

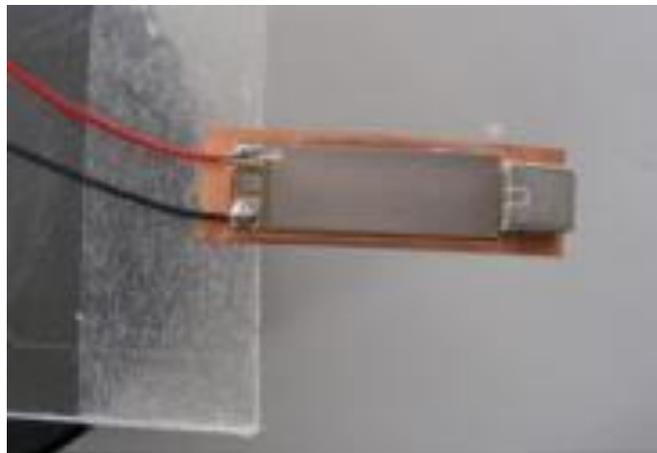


Figura 15: Dispositivo com duas camadas piezoelétricas.  
Fonte: Jeong, 2008.

Devido à possibilidade de empregar elementos piezelétricos em várias aplicações, com destaque para seu uso como componente em instrumentos de medição, deve-se considerar cuidadosamente a seleção de materiais. Isso é particularmente importante ao selecionar materiais piezoelétricos para uso em sistemas que serão expostos a uma ampla faixa de temperatura operacional. Para operações em temperatura ambiente (25°C), o PZT-5H mostrou ótimo desempenho ao avaliar a sua piezoeletricidade (HOOKER, 1998).

Algumas propriedades desse material estão contidas na tabela 1:

Tabela 1: Propriedades do PZT-5H

<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	65	
<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	7500	
<b>Coefficiente de Poisson (<math>\nu</math>)</b>	0,36	
<b>Fator de Qualidade (<math>Q_m</math>)</b>	70	
<b>Constante Elétrica (<math>K_p</math>)</b>	0,65	
<b>Coefficiente de Flexibilidade Elástica (<math>\times 10^{-12}</math> m<sup>2</sup>/N)</b>	S11	16,5
	S33	20,7
	S44	43,5
	S12	-4,78
	S13	-8,45
	S66	42,6
<b>Coefficiente Piezoelétrico Direto (<math>\times 10^{-12}</math> C/N)</b>	D31	-186
	D33	670
	D15	660
<b>Fator de Permissividade (<math>K^\sigma</math>)</b>	$\epsilon_{33}$	3400

Fonte: Adaptado de Chopra, 2013.

Existem equações que são empregadas para determinar o comportamento dos elementos piezoelétricos que são montados em uma viga em balanço, como a da figura 15. A equação 12 fornece a tensão elétrica gerada para uma viga bimorfa em balanço (CHOPRA, 2013). A equação 13 é utilizada para determinar o deslocamento da extremidade da viga e a equação 14 fornece a carga ( $q$ ) gerada pela solicitação do elemento (LEO, 2007).

$$V = -\frac{3 Fl d}{4 bh e}; \quad (12)$$

Onde  $F$  é a força aplicada,  $l$  é o comprimento,  $b$  é a base,  $h$  é a espessura,  $d$  é o coeficiente de deformação piezoelétrica,  $e$  é a permissividade elétrica.

$$w = \frac{h}{EA_l} F + \nu; \quad (13)$$

Onde  $A_l$  é área de seção longitudinal e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

$$q = Fd + \frac{\varepsilon A}{h} \nu; \quad (14)$$

Onde  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica do material piezoelétrico.

As propriedades e dispositivos referentes a piezoeletricidade e a eletrônica elucidados nos parágrafos anteriores são importantes para que haja a possibilidade de desenvolver formas de recuperar energia a partir das vibrações mecânicas. O próximo subtópico contém uma breve revisão sobre algumas técnicas acerca da recuperação de energia, com ênfase nas que são baseadas em vibrações mecânicas.

### 2.3 Recuperação de Energia Baseada em Vibrações Mecânicas

*Energy Harvesting* (traduzido como recuperação de energia) é o processo pelo qual a energia derivada de fontes externas (por exemplo, solar, térmica, eólica, gradientes de salinidade e energia cinética) é capturada e armazenada para alimentar dispositivos autônomos de baixo consumo, como aqueles utilizados em eletrônicos vestíveis e redes de sensores sem fio (RADICAN, 2017). A figura 16 ilustra o fluxo da energia em um sistema de recuperação de energia.

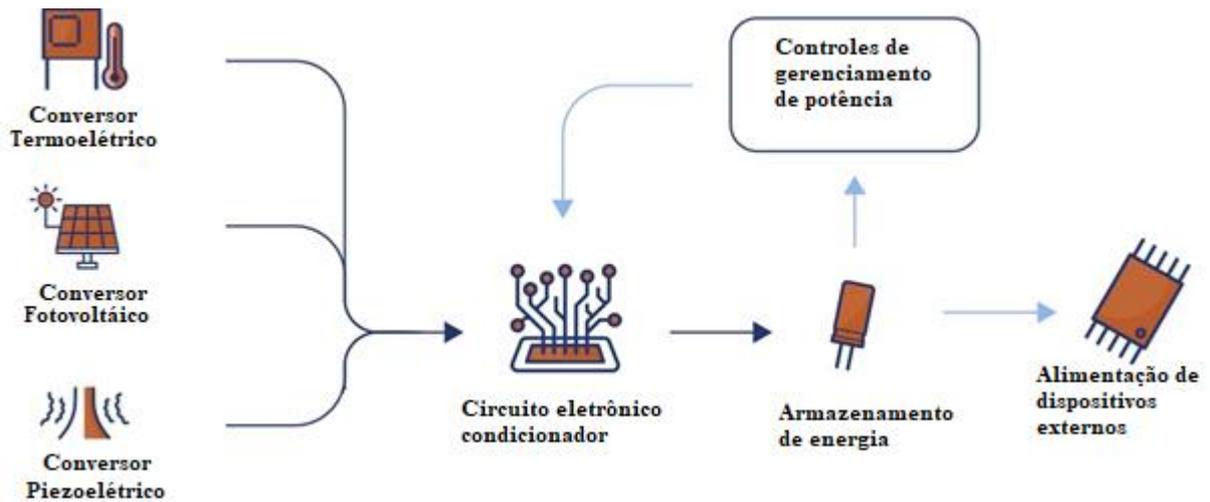


Figura 16: Sistemas de recuperação de energia.  
 Fonte: Adaptado de ONiO, 2023.

A recuperação de energia pode ser feita por meio de diversas fontes renováveis. Para os métodos fotovoltaico e eletromagnético, a potência gerada é maior, com a capacidade de alimentar equipamentos de escala industrial (KHALID et al, 2023). Por outro lado, a conversão de energia mecânica de vibração em elétrica tem sido utilizada para alimentar equipamentos com menor consumo, como relógios, calculadoras e painéis de instrumentação veicular. Dessa maneira existe o propósito de efetuar o *Energy Harvesting* com a captura de quantidade diminutas de energia de uma ou mais fontes circundantes com possibilidade de acúmulo e armazenamento para uso posterior. No método de recuperação de energia por vibração, existem duas aplicações em destaque para captação de energia, a piezoelétrica e a eletromagnética (MOHANTY, 2019). Esta última mostra obter a maior geração de energia a partir de vibrações, mas Roundy (2005), demonstrou que a técnica piezoelétrica é a maneira mais eficiente de colher energia proveniente da vibração.

Segundo Berlincourt (1981), a cerâmica é o PTZ mais popular devido as suas excelentes propriedades físicas e químicas, além da alta aplicabilidade em situações específicas pelo ajuste adequado da razão de titanato e zirconato. O autor também afirma que os piezoelétricos possuem características importantes como:

- Elevada dureza e densidade, possibilitando a fabricação em qualquer formato;
- Imunidade à umidade devido a serem quimicamente inertes;

A recuperação de energia em mecanismos rotacionais é uma das áreas de rápido crescimento para eletrônicos autoalimentados usando energia rotacional disponível ou energia convertida de outras fontes no ambiente. Novos mecanismos e metodologias, como o uso da

gravidade e de força centrífuga combinadas com mecanismos não-lineares são documentados em diversas pesquisas. Um bom exemplo é a colheita de energia piezoelétrica rotacional com acoplamento magnético destacado na figura 17 (MEI *et al*, 2021).

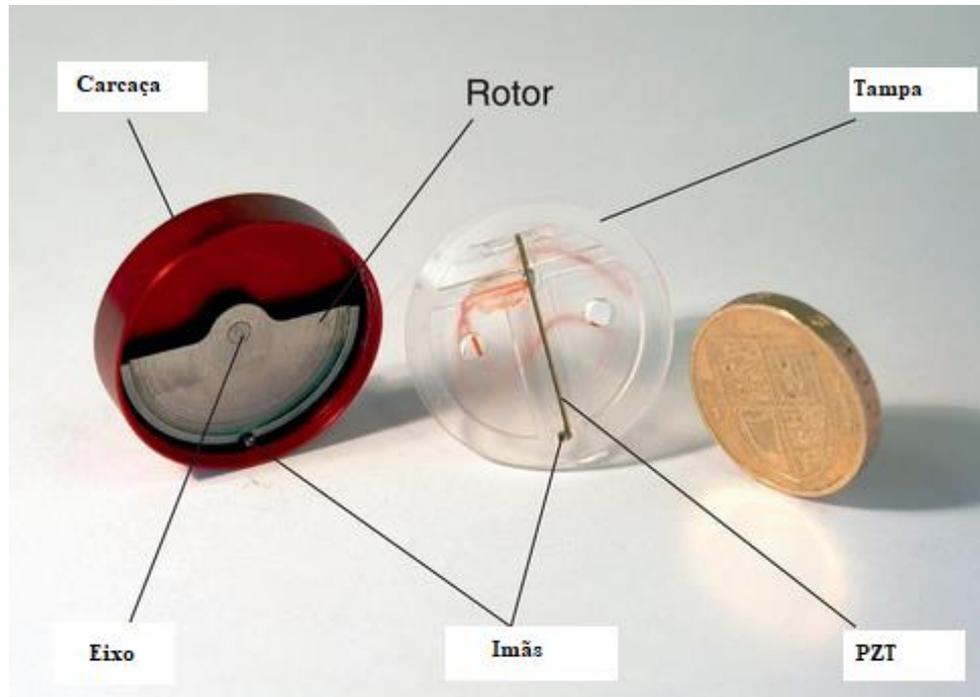


Figura 17: Exemplo de um recuperador de energia.  
Fonte: Adaptado de Fu, 2018.

Fu e Yeatman (2017) avaliaram a possibilidade de recuperar energia a partir de um eixo de um motor com o uso de ímãs permanentes para excitar uma pastilha piezoelétrica em balanço para baixas velocidades de rotação, que é uma forma versátil de montar um dispositivo de *Energy Harvesting*.

Desse modo, tem-se um referencial bibliográfico suficiente para elaborar um procedimento metodológico para conceber um recuperador de energia piezoelétrico acoplado a um mecanismo de rotação.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são abordadas as características da metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa, incluindo a classificação quanto à forma de levantamento e tratamento dos dados, bem como a descrição dos procedimentos técnicos adotados durante a elaboração do recuperador de energia piezoelétrico acoplado a um mecanismo de rotação.

#### 3.1 Tipos de Pesquisa

A pesquisa é uma atividade primordial no âmbito científico, uma vez que permite a aquisição de novos conhecimentos e aprofundamento nos temas abordados. É um processo ininterrupto, que busca constantemente o aprimoramento e a ampliação da compreensão dos fenômenos estudados. Cada tipo de pesquisa apresenta um objetivo particular e, embora possuam características distintas, todas se pautam em um processo permanentemente inacabado, visto que a evolução científica é contínua e dinâmica (GERHARDT E SILVEIRA, 2009).

De acordo com Minayo (2003), a pesquisa é um processo complexo e dinâmico que se desenvolve em diferentes níveis, e pode ser classificada de acordo com a forma de abordagem utilizada, sendo que as principais abordagens são a qualitativa e a quantitativa. O método qualitativo, por sua vez, é caracterizado por ser interpretativo e consiste em um conjunto de técnicas a serem adotadas para construir uma realidade, buscando estudar conjunturas que podem ser difíceis de serem descritas numericamente. A análise, descrição e gravação das informações coletadas são elementos fundamentais para a construção do conhecimento e para a compreensão da realidade em estudo.

A investigação científica pode ser conceituada, conforme Gil (2022, p. 17), como “o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo fornecer respostas aos problemas que são propostos”, ou seja, um processo metodológico, com o propósito precípuo de fornecer respostas adequadas e precisas para problemas previamente identificados e delimitados. Nesse sentido, a pesquisa é indispensável em situações nas quais as informações disponíveis são insuficientes para suprir as demandas de resposta do problema investigado.

De acordo com Gil (2022), é possível classificar o tipo de pesquisa segundo seus objetivos, que são diversas finalidades buscadas pelos pesquisadores para alcançar respostas para suas indagações e problemas investigados, sendo as principais:

- Pesquisa exploratória: têm como objetivo familiarizar o indivíduo com o problema, tornando o mais visível, utilizando ferramentas de aprimoramento de ideias e coleta de dados;
- Pesquisa descritiva: têm como objetivo determinar as características de um fenômeno de estudo e suas variáveis, utilizando métodos estatísticos e pesquisas de campo para determinar seus pontos de estudo;
- Pesquisa explicativa: tem como objetivo identificar fatores que contribuem para ocorrência de fenômenos, explicando o porquê da finalidade do estudo e seus acontecimentos.

Conforme Gil (1999), é importante ressaltar os procedimentos técnicos adotados em diferentes tipos de pesquisa. A pesquisa bibliográfica, por exemplo, é baseada na utilização de livros e obras acadêmicas, bem como na coleta de dados por meio de estudo de casos e experimentos. Por sua vez, a pesquisa documental - conforme Fonseca (2002) - é elaborada a partir de diversas fontes, sem a necessidade de tratamentos analíticos. Já a pesquisa-ação é concebida a partir de bases empíricas, em estreita associação com a ação ou resolução de um problema. Por fim, segundo Yin (2001), o estudo de caso envolve um estudo minucioso e exaustivo de um ou mais objetos, de maneira a permitir um amplo e detalhado conhecimento, seguindo a lógica do planejamento, da coleta e da análise de dados. Dessa forma, é possível entender que diferentes abordagens podem ser utilizadas na pesquisa, cada uma com seus próprios métodos e objetivos específicos.

À luz das características inerentes à pesquisa científica, o presente estudo pode ser devidamente enquadrado no espectro da pesquisa quantitativa, exploratória e bibliográfica uma vez que se fundamenta em resultados claramente mensuráveis, que são obtidos através do ensaio em bancada. Ademais, trata-se de uma pesquisa experimental, cuja metodologia compreende a observação sistemática e controlada do dispositivo de Energy Harvesting em pleno funcionamento, a fim de investigar suas possíveis aplicações e limitações. O estudo realizado é uma pesquisa exploratória, pois há a familiarização do o indivíduo com o problema. E por fim, é uma pesquisa bibliográfica por ser baseada na utilização de livros e obras acadêmicas, bem como na coleta de dados por meio de estudo de casos e experimentos.

### 3.2 Materiais e Métodos

Com o objetivo de realizar a elaboração e construção do dispositivo de recuperação de energia, foi empreendido um estudo bibliográfico, cuja descrição pormenorizada incluiu a explanação dos principais conceitos relativos às vibrações mecânicas e ao fenômeno da piezoelectricidade. Além disso, realizou-se uma revisão acerca de dispositivos eletrônicos empregados na modulação da tensão e corrente geradas a partir das oscilações do material piezoelétrico. Por fim, é feito o projeto descritivo da montagem do recuperador de energia.

A figura 18 ilustra o esboço da montagem do experimento, que é base para a elaboração do projeto.

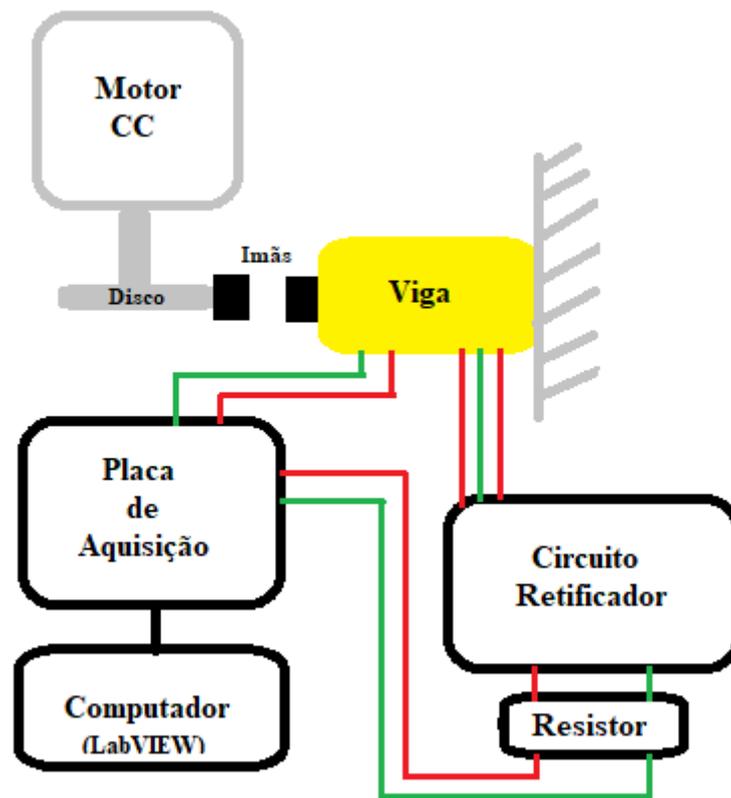


Figura 18: Esboço da montagem do experimento.  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Foi idealizado o mecanismo para efetuar a recuperação de energia a partir de um movimento de rotação. Um motor de corrente de corrente contínua é posto em funcionamento, o que leva ao movimento de rotação do ímã que está fixado no disco. Isso leva a uma variação harmônica na força entre esse ímã e o outro que está fixado na viga em balanço, sendo que esses ímãs devem estar bem próximos para garantir maior amplitude da força de excitação. Deste

modo, o elemento piezoelétrico irá vibrar assim como é descrito pelas teorias de viga de Euler-Bernoulli (equação 8) e de Timoshenko (equação 9).

Um esboço desse sistema mecânico está ilustrado na figura 19.

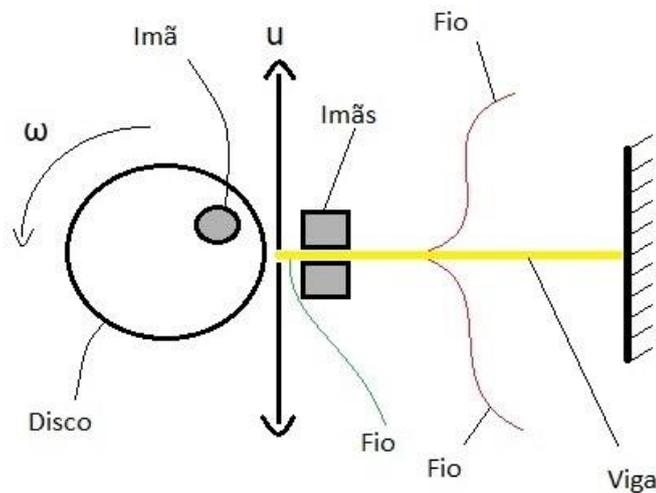


Figura 19: Esboço do sistema mecânico.  
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Onde  $\omega$  representa a velocidade angular do disco e  $u$  representa o deslocamento transversal da viga em balanço.

A montagem do experimento foi instalada sobre uma chapa de aço com espessura de 3/8" (9,5 mm) com uma borracha colada em sua face virada para bancada, com o intuito de manter a posição entre os componentes fixa e de atenuar as vibrações geradas pelos ensaios, como mostra a figura 20.



Figura 20: Chapa de aço de 3/8".  
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Foi utilizado um motor de corrente contínua Akiyama® modelo AK555/390ML 12S18200C para proporcionar o movimento de rotação, que é a fonte de excitação mecânica para o elemento piezoelétrico, sendo que a velocidade do motor varia de 100 a 18200 RPM, e ele está destacado na figura 21. Este motor foi alimentado por uma fonte de tensão variável

ICEL PS-6100. O eixo do motor foi prolongado com o uso de um acoplamento rígido com o intuito de fixar um outro eixo com um disco de aço com 32mm de diâmetro, que é visto na figura 22. Neste, foi fixado um ímã cilíndrico de neodímio classe N35 com 10 mm de diâmetro e 4 mm de comprimento.



Figura 21: Motor de corrente contínua.  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

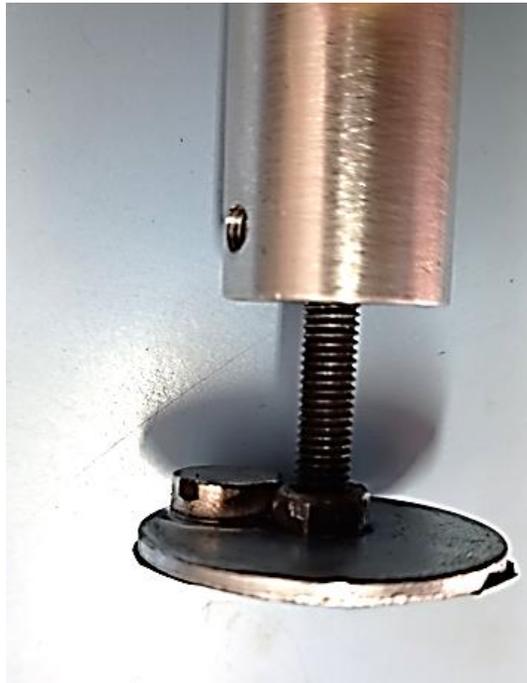


Figura 22: Acoplamento rígido para o disco com o ímã.  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na outra extremidade da chapa base, foi instalado um suporte fixador para a viga, como mostra a figura 23. Percebe-se que esta configuração de fixação da lâmina de latão com pastilhas de PZT-5H é semelhante a de uma viga em balanço.



Figura 23: Suporte fixador para a viga.  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

O elemento piezoelétrico empregado foi o PZT-5H, em destaque na figura 24, sendo que foi adquirido um modelo que contém duas lâminas coladas sobre uma folha de latão (uma em cada face). Assim como no disco acoplado ao motor, foram instalados dois ímãs semelhantes para possibilitar a excitação da viga, por meio da interação entre os campos magnéticos de cada ímã. A tabela 2 contém as dimensões dos elementos constituintes da viga. O PZT-5H foi empregado devido a suas boas propriedades piezoelétricas a temperatura ambiente.

Tabela 2: Dimensões da Viga

Latão		PZT-5H	
Comprimento	70 mm	Comprimento	59 mm
Largura	32 mm	Largura	29 mm
Espessura	0,21 mm	Espessura	0,205 mm

Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 24: Chapa de latão com lâminas de PZT-5H (viga).  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A tabela 3 contém as propriedades mecânicas do latão:

Tabela 3: Propriedades Mecânicas do latão 792 (UNS C79200)

Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	7800
Coefficiente de Poisson	0,27 – 0,30
Módulo de Elasticidade (GPa)	190 - 210

Fonte: The Piping Mart, 2023.

Para cada lâmina de piezoelétrico foi feito um ponto de solda ao qual foi ligada um fio de 0,65mm de diâmetro e também foi feito outro ponto de solda sob a folha de latão, que também recebeu um fio. Assim, pode ser transmitida a diferença de potencial elétrico gerada pela deformação dos elementos piezoelétricos. Foram posicionados dois imãs sobre a folha de latão, para interagir com o outro imã que foi colado no disco de aço conectado ao eixo do motor elétrico.

Os fios foram ligados a uma Protoboard de 830 pontos, exemplificada na figura 25. Nesta, foram instalados os componentes eletrônicos necessários para condicionar a energia elétrica gerada, que formaram um retificador de tensão elétrica. Foi utilizada uma ponte de diodos do tipo Schottky 1N5819 e um capacitor de 470  $\mu$ F que suporta até 40 V, como está no diagrama elétrico da figura 26.

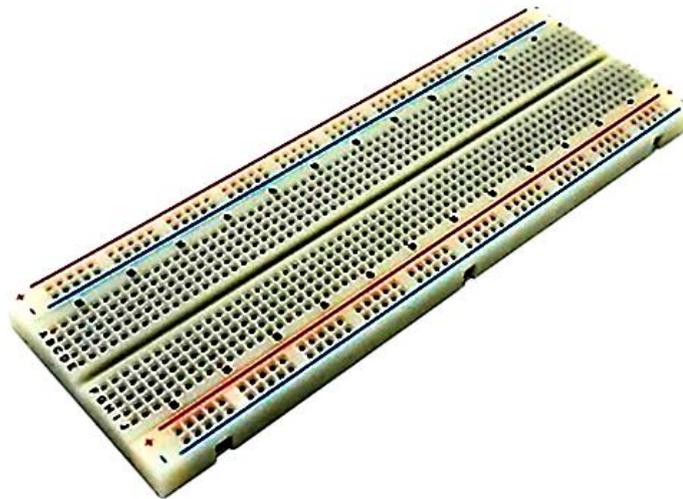


Figura 25: Protoboard de 830 pontos.  
Fonte: RoboCore, 2023.

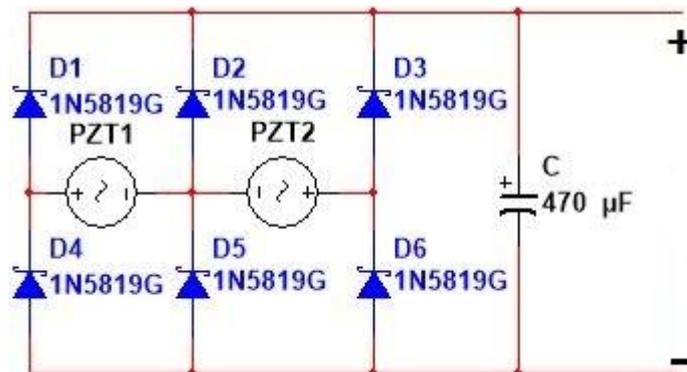


Figura 26: Diagrama elétrico.  
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

São colocados fios para a saída do capacitor que são ligados a placa de aquisição NI-USB 6009 da fabricante National Instruments, vista na figura 27. Esta é conectada a um computador que possui o *software* LabVIEW®, sendo que em sua interface gráfica são exibidos gráficos com os valores de tensão elétrica gerados nos elementos piezoelétricos e o valor de tensão elétrica de saída no capacitor.



Figura 27: Placa de aquisição.  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Por fim, foram selecionados dois resistores de valores diferentes (3,10 e 2,15 k $\Omega$ ) para serem ligados um de cada vez em paralelo com o capacitor, o que é utilizado como uma forma de simular a presença de uma carga que será alimentada pela energia elétrica gerada no elemento piezoelétrico, como está no diagrama da figura 28.

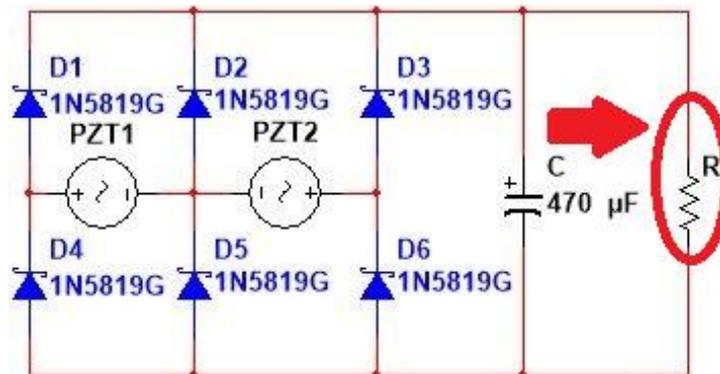


Figura 28: Diagrama elétrico com resistor.  
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A viga se deforma harmonicamente quando é excitada pela variação do campo magnético devido a rotação do motor. Essa deformação gera uma tensão elétrica alternada, sendo esta a fonte de energia utilizada para alimentar a carga elétrica. Os fios são ligados ao circuito instalado na Protoboard, e esta é conectada a placa de aquisição que envia os valores medidos de tensão alternada e contínua para o *software* LabVIEW, o qual exibe os resultados em curvas. Estas mostram o valor da tensão elétrica em função do tempo e também há o espectro dessa função, que exibe com clareza a frequência de oscilação da tensão elétrica.

Deve-se ressaltar que esta montagem está sujeita a erros e incertezas de medição, entretanto há rigor suficiente para garantir repetibilidade e correlação entre os resultados.

### 3.3 Variáveis e Indicadores

Conforme Marconi e Lakatos (2022), as variáveis podem ser definidas como termos que permitem a classificação ou a mensuração de aspectos, conceitos operacionais e fenômenos que estão presentes em uma pesquisa. Para Gerhardt & Silveira (2009), as variáveis se referem à presença ou ausência de fenômenos na realidade da pesquisa, possibilitando que o pesquisador possa discorrer adequadamente sobre suas características e peculiaridades.

Com base nas proposições de Marconi e Lakatos (2022), pode-se afirmar que as variáveis, fundamentais no processo de pesquisa, são classificadas em independentes e dependentes. As variáveis independentes constituem-se em fatores determinantes, condições ou causas que exercem influência ou afetam outras variáveis, enquanto as variáveis dependentes são aquelas que apresentam valores a serem explicados ou descobertos, sofrendo influência de variáveis independentes relacionadas a ela. É importante ressaltar que a compreensão adequada e clara das variáveis envolvidas em um estudo é imprescindível para a obtenção de resultados confiáveis e coerentes com os objetivos propostos.

De acordo com Gil (2022, p. 109), os indicadores são uma medida quantitativa que busca informar sobre algum aspecto relevante da realidade em questão. O autor enfatiza que a escolha dos indicadores deve ser realizada com cautela, pois, embora os mesmos devam ser simples, é possível que haja diversos indicadores para uma única variável em estudo. Desse modo, é necessário avaliar cuidadosamente as opções disponíveis, a fim de selecionar aqueles que melhor se adequam aos objetivos da pesquisa e permitem uma análise mais completa e precisa dos dados coletados.

Na tabela 4 são apresentadas as variáveis do trabalho e seus indicadores.

Tabela 4: Variáveis e indicadores

VARIÁVEIS	INDICADORES
Motor CC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de rotação</li> <li>• Força magnética do ímã acoplado</li> </ul>
Viga contendo os elementos piezoelétricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequência de oscilação</li> <li>• Tensão elétrica gerada</li> <li>• Força magnética do ímã acoplado</li> </ul>

Fonte: Pesquisa direta, 2023

### 3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Os instrumentos de coleta de dados empregados foram o *software* comercial LabVIEW, da National Instruments e uma placa de aquisição NI USB-6009 da National Instruments e um tacômetro digital Minipa MDT-2238, em destaque na figura 29.

Na interface do programa LabVIEW, encontra-se o digrama de blocos, que é utilizado para inserir os comandos necessários para a coleta dos dados de tensão elétrica. Esse diagrama está disposto na figura 30.



Figura 29: Tacômetro digital.  
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

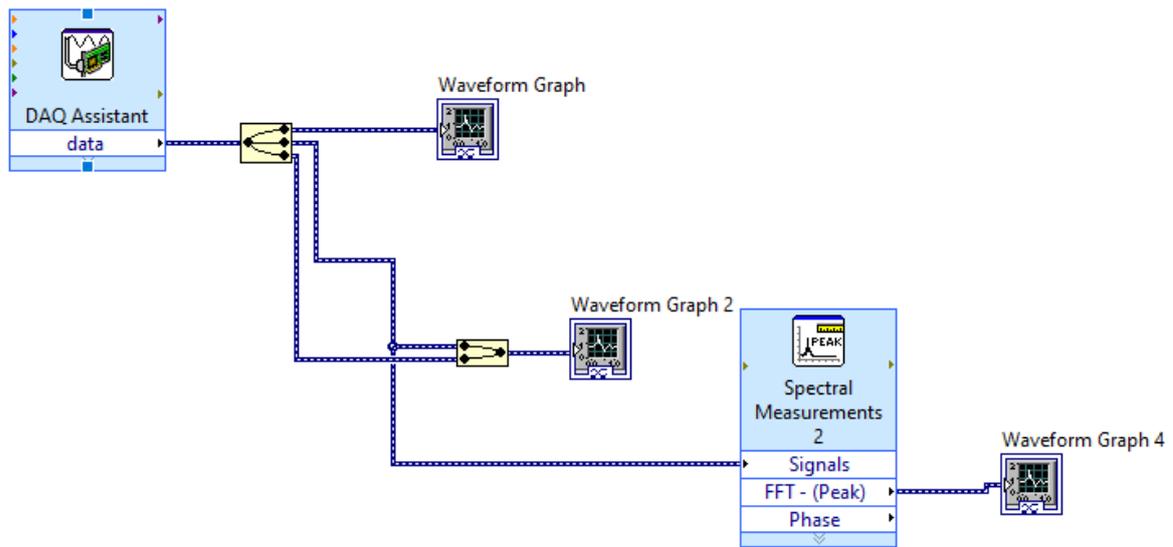


Figura 30: Diagrama de blocos do LabVIEW.  
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

### 3.5 Tabulação de Dados

A tabulação dos dados foi feita com os *softwares* Microsoft Excel, Microsoft Word e LabVIEW. Os dados amostrados são tabulados e exibidos em curvas no painel frontal da interface do programa LabVIEW, como é visto na figura 31.

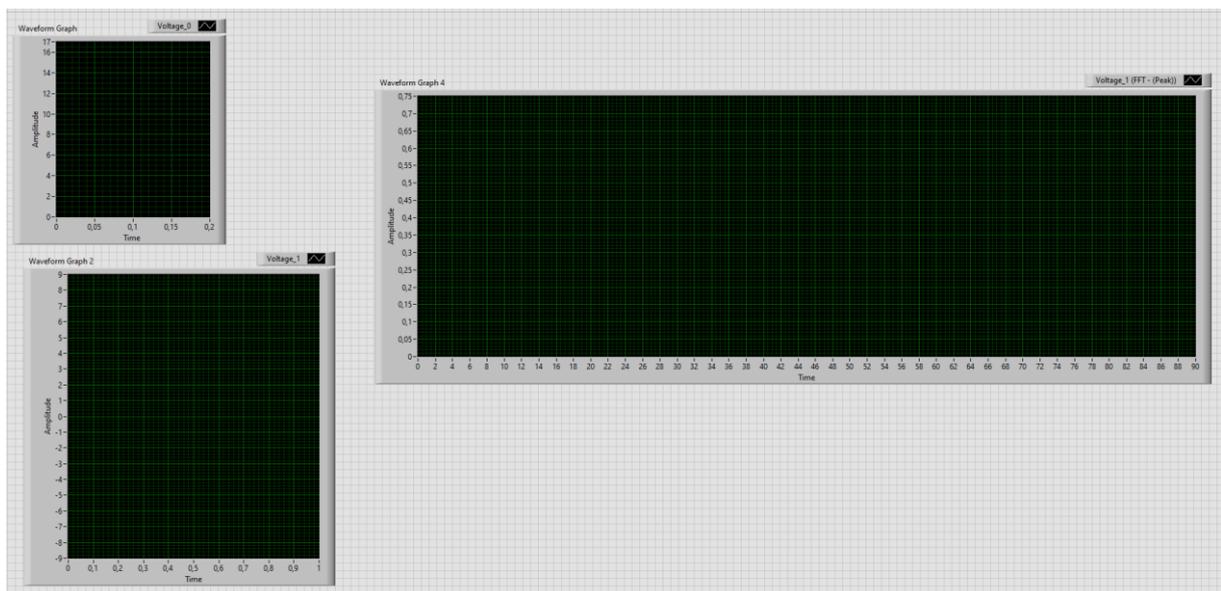


Figura 31: Painel frontal do LabVIEW.  
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

### **3.6 Considerações Finais**

No presente capítulo foram expostos de maneira minuciosa os procedimentos metodológicos adotados para a realização deste estudo, bem como os *softwares* utilizados durante a aquisição e processamento dos dados referentes ao dispositivo de *Energy Harvesting*.

Nas seções subsequentes, os resultados oriundos das análises realizadas são minuciosamente descritos, abordando as especificidades e particularidades do objeto de pesquisa, visando alcançar os objetivos propostos. Ademais, é apresentada uma discussão aprofundada acerca dos resultados, pautada em uma análise crítica e reflexiva, que busca identificar as contribuições e limitações deste estudo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados

Com base no procedimento metodológico foi construída a bancada experimental, ilustrada nas figuras 32 e 33.



Figura 32: Montagem da bancada experimental e instrumentos de coleta de dados.  
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Observa-se na figura 32 a montagem do experimento, que compreende os seguintes componentes:

- Fonte de Tensão – responsável pela alimentação do motor de corrente contínua;
- Bancada experimental – contém os componentes do experimento, em destaque na figura 33;
- Computador – exibe no monitor os resultados do experimento por meio do *software* LabVIEW.

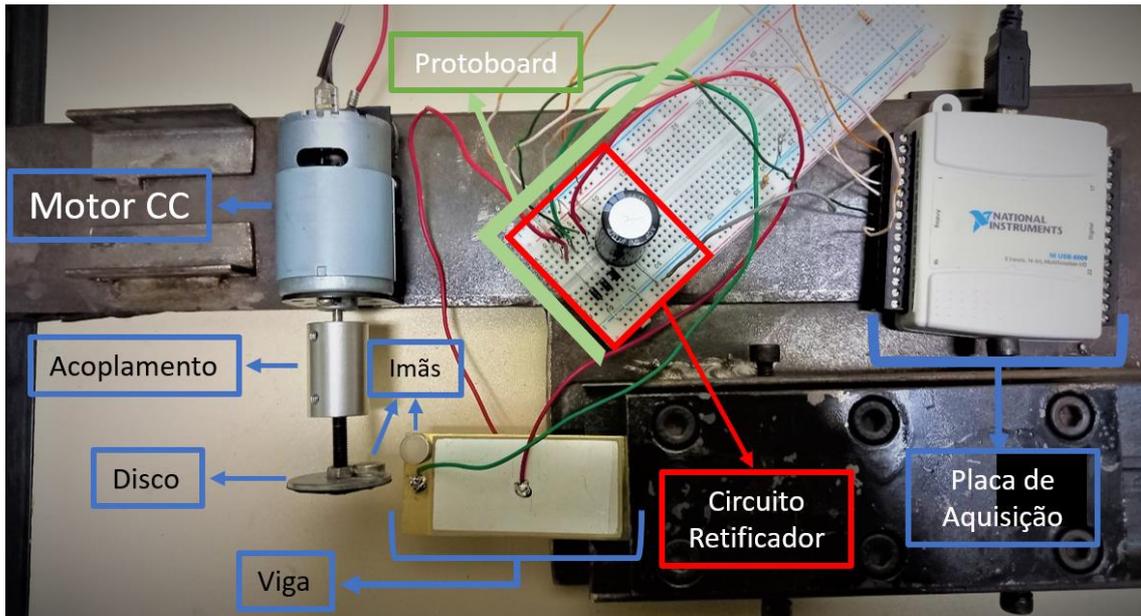


Figura 33: Montagem da bancada experimental.  
 Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Observa-se na figura 33 os componentes da bancada experimental, que são:

- Motor CC – promove o movimento de rotação;
- Acoplamento – conecta o eixo do motor ao eixo do disco;
- Disco – suporte para o imã de excitação;
- Imãs – utilizados para produzir a força de excitação sobre a viga;
- Viga – elemento que contém o material piezoelétrico, que é o conversor de energia empregado nesse trabalho;
- Protoboard – empregada para efetuar a ligação dos componentes eletrônicos;
- Circuito retificador – responsável para converter a tensão alternada em tensão contínua;
- Placa de Aquisição – utilizada para coletar os dados de tensão elétrica e enviá-los para o programa LabVIEW;

A taxa de aquisição adotada para as medições foi de mil amostras por segundo, o que permite aquisição de sinais com frequência de até 500 Hz.

Inicialmente foi realizada a medição da frequência natural da estrutura a partir de uma oscilação livre, como é mostrado na figura 34:

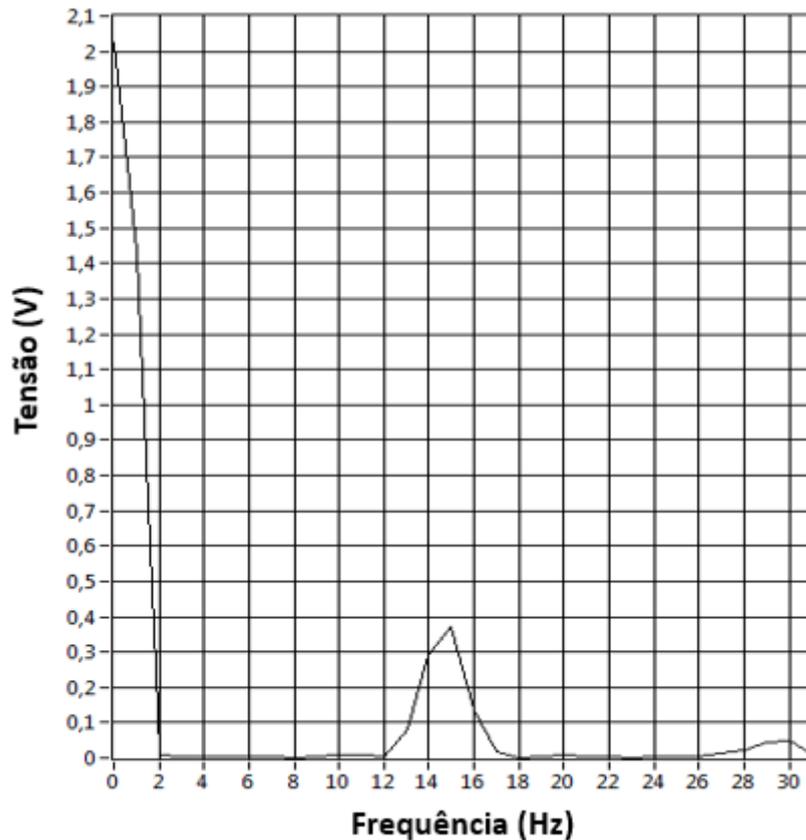


Figura 34: Oscilação livre da viga.  
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A partir da figura 34, o espectro de frequência indica que a frequência natural é de aproximadamente 15 Hz.

Para efetuar as oscilações forçadas, a rotação do motor foi variada de 350 RPM até 5000 RPM (5,8 – 83 RPS), e foram selecionados os valores para análise em que a tensão elétrica alternada tinha as maiores amplitudes.

Os resultados da medição para o motor a 904 RPM (15 RPS) estão indicados na figura 35.

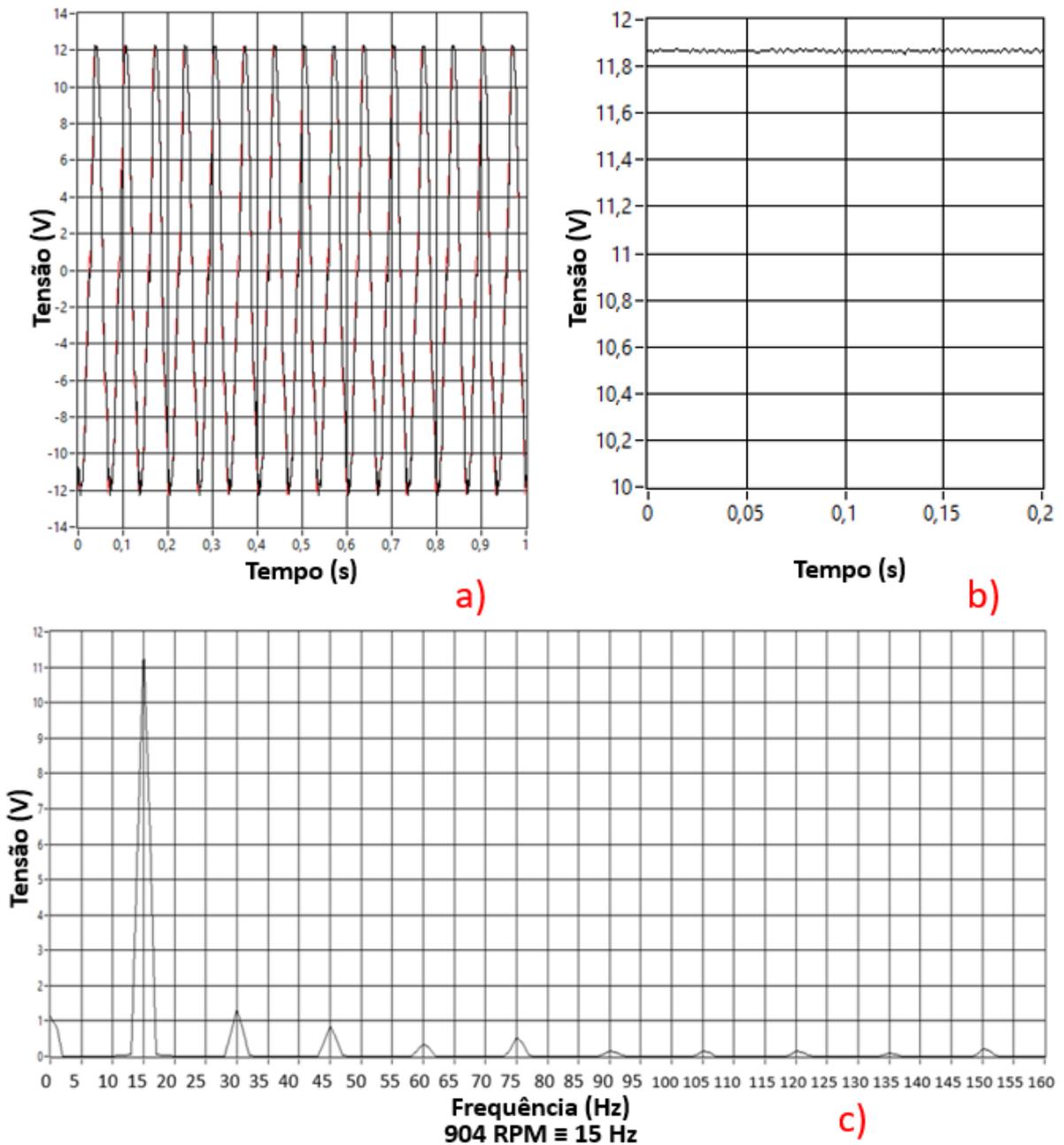


Figura 35: Oscilação forçada a uma frequência de 15 Hz.  
 Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A figura 35 (a) evidencia que a tensão alternada tem valor máximo em 12,1 V e que o sinal tem um formato semelhante ao de uma senoide. A figura 35 (b) mostra que a tensão contínua é de 11,86 V. A partir da figura 35 (c) percebe-se que a excitação ocorre a uma frequência bem próxima a frequência natural, o que justifica o valor de amplitude elevado em 15 Hz e há picos menores para valores múltiplos dessa frequência, que são os harmônicos.

Os resultados da medição para o motor a 2172 RPM (36 RPS) estão indicados na figura 36.

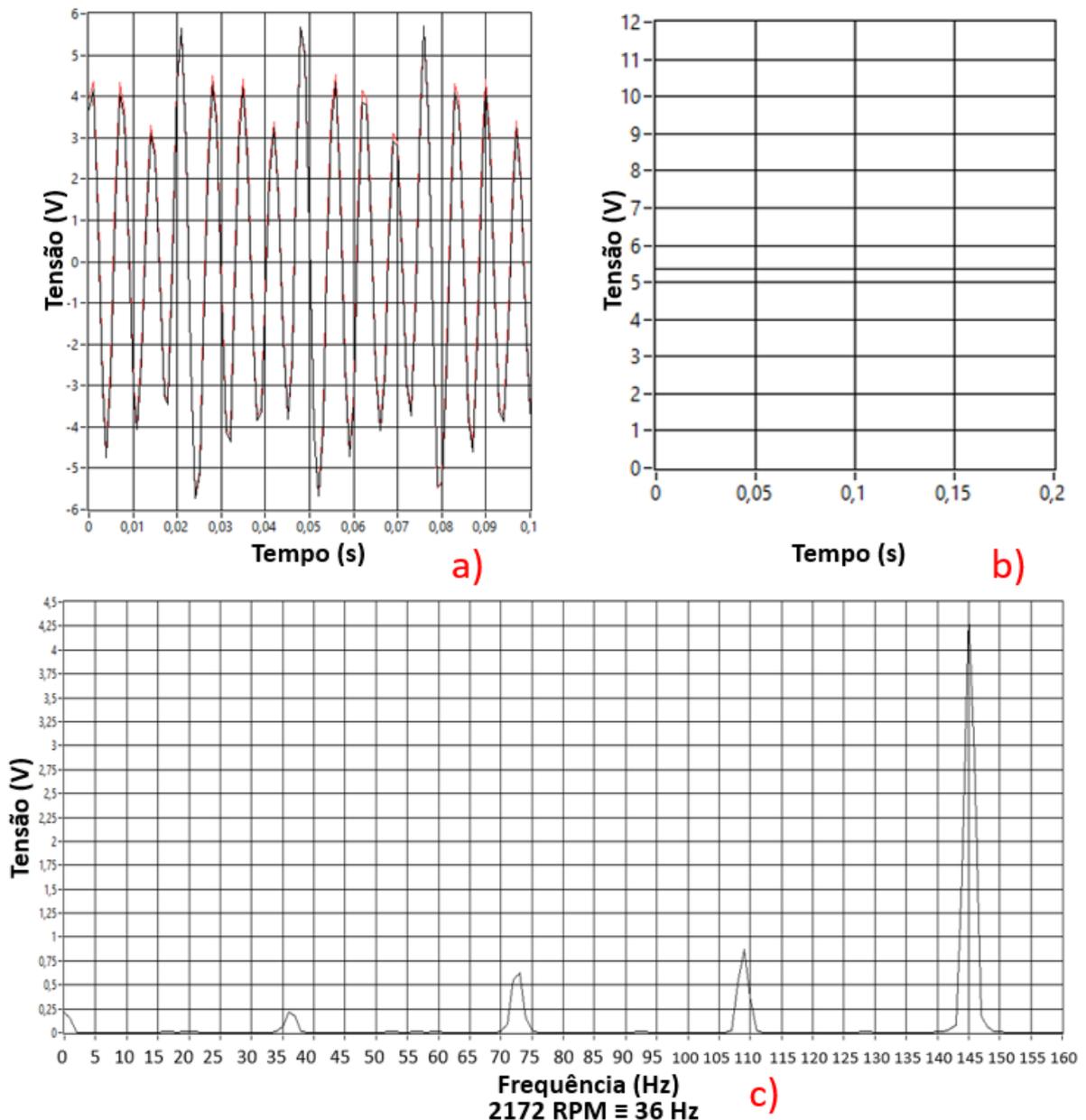


Figura 36: Oscilação forçada a uma frequência de 36 Hz.  
 Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A figura 36 (a) evidencia que o sinal obtido não possui um formato semelhante ao de uma senoide, o que indica que a oscilação é não-linear. A figura 36 (b) mostra que a tensão contínua é de 5,42 V. A partir da figura 36 (c) observa-se que há a presença de um pico acentuado em aproximadamente 145 Hz. Este comportamento não é previsto pela teoria de vibrações para um sistema discreto com um grau de liberdade, a qual indica que haveria uma oscilação de frequência em um valor próximo ao da frequência natural. Percebe-se que os picos de valor menor são divisores do pico de maior valor. Esses valores são subharmônicos de  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$

e  $\frac{3}{4}$  da frequência de maior amplitude. Não foram detectadas oscilações em uma frequência de 15 Hz ou em múltiplos desse valor e nem para valores superiores ao pico de maior amplitude (145 Hz).

Os resultados da medição para o motor a 2852 RPM (47,5 RPS) estão indicados na figura 37.

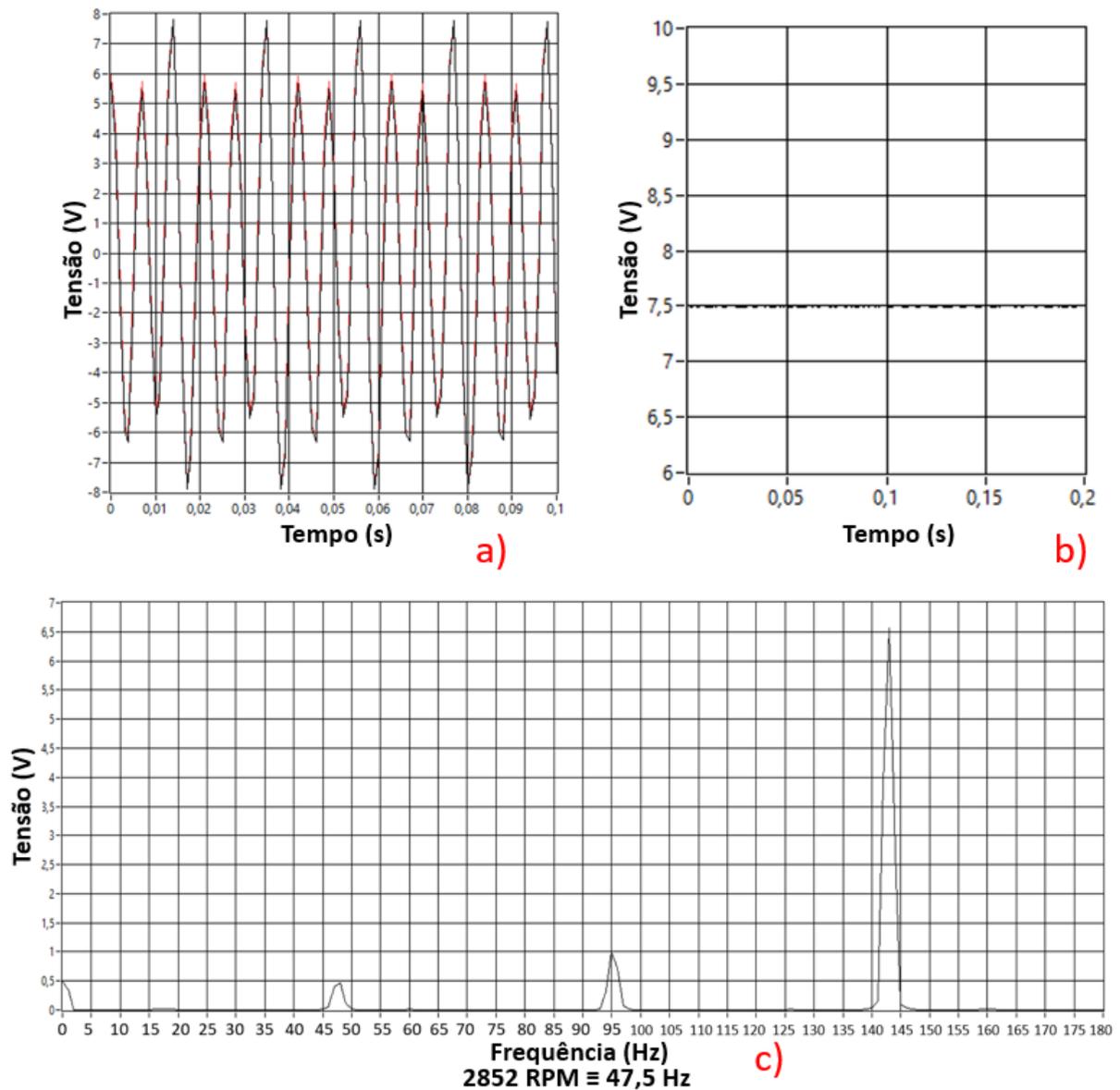


Figura 37: Oscilação forçada a uma frequência de 47,5 Hz.

Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A figura 37 (a) evidencia que o sinal obtido não possui um formato semelhante ao de uma senoide. Este comportamento é semelhante ao da figura 36 (a), indicando que é uma oscilação não-linear. A figura 37 (b) mostra que a tensão contínua é de 7,50 V. A partir da figura 37 (c) observa-se que o espectro possui um pico de valor maior em uma posição semelhante ao que é mostrado na figura 36 (c). Percebe-se que os dois picos de valor menor

são divisores do pico de maior valor, sendo que esses são subharmônicos de  $\frac{1}{3}$  e  $\frac{2}{3}$  da frequência de maior amplitude. Não foi detectado sinal em uma frequência de 15 Hz ou em múltiplos desse valor e nem para valores superiores ao pico de maior amplitude (145 Hz).

Os resultados da medição para o motor a 4225 RPM (70,4 RPS) estão indicados na figura 38.

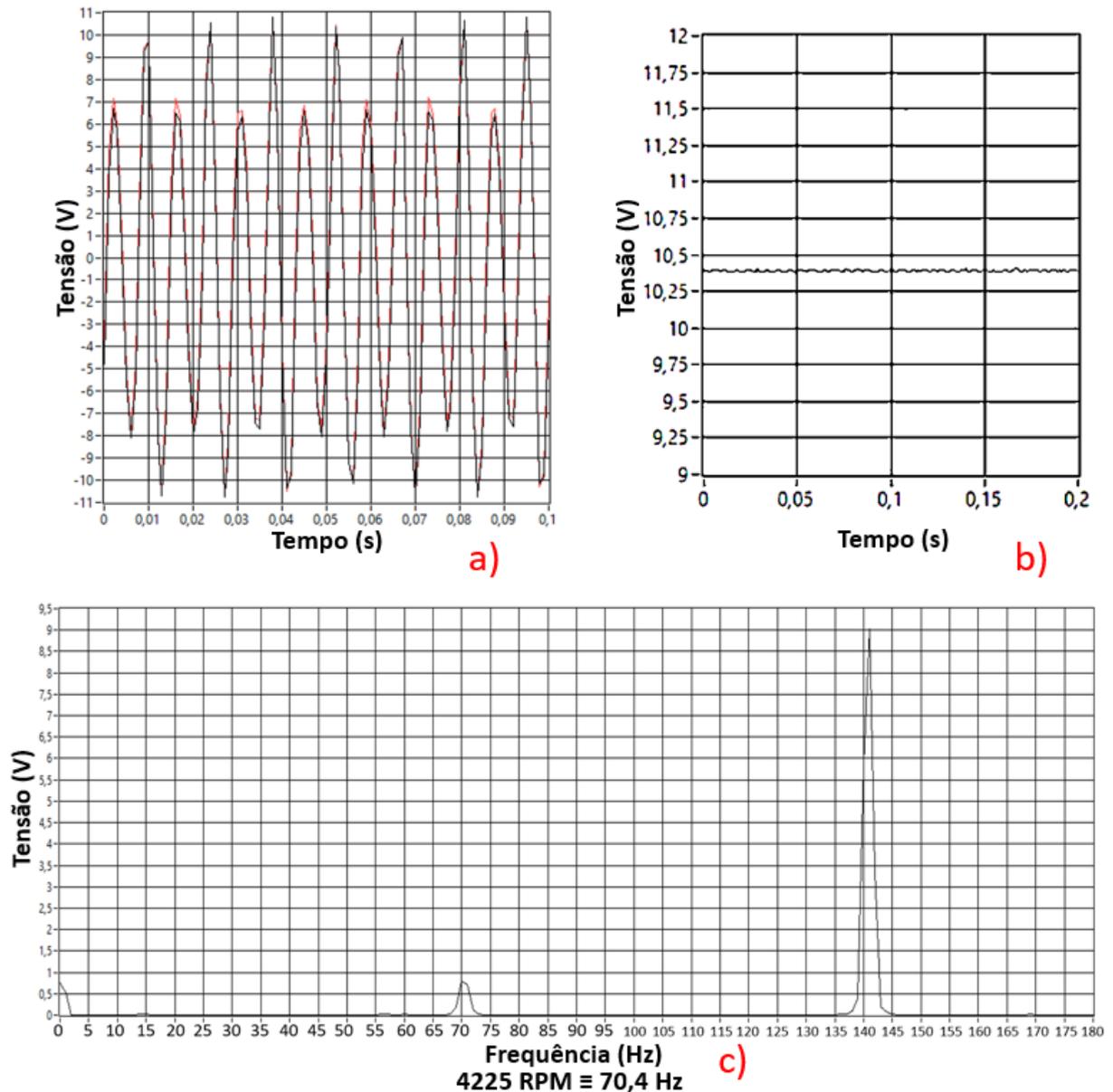


Figura 38: Oscilação forçada a uma frequência de 70,4 Hz.  
 Fonte: Pesquisa direta, 2023.

A figura 38 (a) evidencia que o sinal obtido não possui um formato semelhante ao de uma senoide. Este comportamento é semelhante ao das figuras 36 (a) e 37 (a), indicando que a oscilação é não-linear. A figura 38 (b) mostra que a tensão contínua é de 10,41 V. A partir da figura 38 (c) observa-se que o espectro possui um pico de valor maior em uma posição

semelhante ao que é mostrado nas figuras 36 (c) e 37 (c). Porém, na figura 38 (c) só há um pico de valor menor, sendo que este ocorre em uma frequência é metade daquela para o pico de maior valor. Não foi detectado sinal em uma frequência de 15 Hz ou em múltiplos desse valor e nem para valores superiores ao pico de maior amplitude (145 Hz).

A figura 39 mostra o resultado de tensão contínua para uma rotação do motor de 4225 RPM (70,4 RPS) utilizando o resistor de 3,10 k $\Omega$  (a) no primeiro momento e o resistor de 2,15 k $\Omega$  (b) no segundo momento.

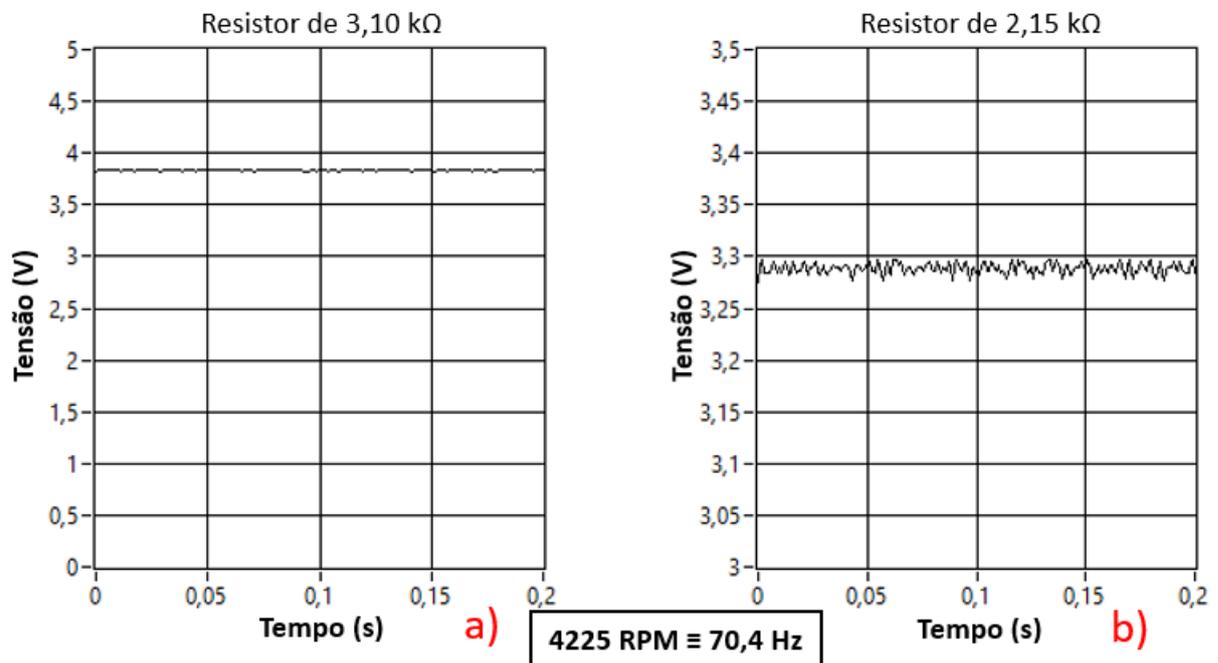


Figura 39: Valores de tensão contínua com presença de um resistor.  
Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Os resultados para esta configuração são: uma tensão contínua de 3,83 V quando é ligado o resistor de 3,10 k $\Omega$ , evidenciado na figura 39 (a). E uma tensão contínua de 3,29 V quando é ligado o resistor de 2,15 k $\Omega$ , evidenciado na figura 39 (b).

## 4.2 Discussões

A partir da observação das curvas geradas pelo *software* LabVIEW são realizadas algumas discussões para interpretar os resultados dos experimentos.

Percebe-se que para excitações em que a velocidade de rotação do motor é próxima do valor da frequência fundamental da viga (15 Hz), ocorre uma amplificação da oscilação deste, o que é entendido como o fenômeno da ressonância.

Entretanto, para uma excitação harmônica da viga quando a rotação do motor estava acima de 1800 RPM, ou seja a partir de 30 Hz (que equivale ao valor da frequência de segundo harmônico da viga), é percebido ao observar o gráfico da resposta em frequência (espectro) que há um valor - que é o mais elevado em amplitude em todo o gráfico - para uma faixa de frequência que está entre 140 e 150 Hz. Não há correspondência de um múltiplo da frequência fundamental da viga nesta faixa de valor.

É observado que nos gráficos em que há esta amplitude elevada entre 140 e 150 Hz, o valor da frequência do primeiro pico que aparece é um divisor inteiro do pico de maior valor (o que está entre 140 e 150 Hz). Além disso, observando o espectro, não há mais a presença do pico na frequência fundamental da viga, que é de aproximadamente 15 Hz.

Esses comportamentos mostram que o movimento harmônico da estrutura se trata de uma oscilação não-linear que é bem descrita utilizando modelo de Duffing para sistemas dinâmicos. Dadas as observações feitas durante o experimento, foi percebido que esse comportamento não-linear se mostra presente quando a frequência da força de excitação atinge o valor igual ao dobro da frequência natural da estrutura para uma modelagem do sistema considerando que ela é uma viga em balanço com um grau de liberdade.

Deve-se ressaltar que essa característica da transição da predominância de um regime linear para não-linear pode ocorrer em valores diferentes de múltiplos da frequência fundamental, justamente pelo fato do sistema ser não-linear. Apesar de a oscilação não-linear ser dominante para frequências de excitação maiores, ainda ocorre de haver ampliações no valor da tensão elétrica em múltiplos da frequência fundamental, ainda que em uma amplitude não tão elevada.

Outro ponto a ser destacado é que, para este experimento, a modelagem matemática mais adequada para descrevê-lo é a de um sistema contínuo de vibração, ao invés de um sistema discreto com um grau de liberdade, principalmente quando o comportamento oscilatório é não-linear. Devido a geometria e a solitação mecânica da estrutura serem semelhantes ao de uma viga em balanço existem modelos matemáticos contínuos para serem adotados. As equações diferenciais parciais de Euler-Bernoulli ou a de Timoshenko são muito adequados para avaliar os esforços, momentos, deflexões e as posições dos elementos que constituem a viga para a condição que ela foi submetida no experimento.

A queda de tensão observada entre o valor de pico da tensão alternada e o valor da tensão contínua foi de 0,3 V que ocorre devido ao emprego dos diodos Schottky.

O elemento piezoelétrico que foi empregado mostrou ser adequado para realização dos ensaios devido a suas propriedades e aos resultados obtidos. Para um trabalho futuro, é válido avaliar e selecionar outros materiais e outras formas de fixação do piezoelétrico, levando em conta o efeito da vibração não-linear produzida no ensaio. Isso pode ser feito visando um melhor aproveitamento do efeito piezoelétrico, o que levaria a uma maior eficiência energética do recuperador de energia.

O resultado em que houve maior recuperação de energia foi para o experimento com o motor em uma velocidade de rotação de aproximadamente 4225 RPM. Ao ligar o resistor de 2,15 k $\Omega$  foi possível calcular a potência recuperada a partir da equação 11 ( $P = V^2/R$ ), e o valor de potência elétrica obtido foi de 5 mW em uma tensão elétrica contínua igual a 3,29 V. Logo, nessas condições é possível alimentar um dispositivo eletrônico, como uma carga elétrica para o monitoramento contínuo de uma máquina.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusão

A partir da problemática do estudo: “Como alimentar uma carga elétrica com um dispositivo de recuperação de energia do tipo piezoelétrico acoplado a um mecanismo de rotação?”, tem-se as seguintes conclusões:

A revisão bibliográfica abordou os conteúdos necessários para o entendimento do trabalho, como sistemas mecânicos, piezoeletricidade, fundamentos de conversão de energia elétrica e recuperação de energia baseada em vibrações mecânicas.

O procedimento metodológico elaborado possibilitou a concepção da bancada a partir da revisão bibliográfica e do projeto descritivo. Assim, foi aplicada a metodologia para que fosse montado o dispositivo recuperador de energia, e o elemento piezoelétrico que foi empregado era o único disponível, e mostrou ser adequado devido as suas propriedades piezoelétricas e aos resultados obtidos a partir dos ensaios. Portanto, é adequado que sejam instalados outros dispositivos ao circuito eletrônico, para garantir maior autonomia e estabilidade para a alimentação das cargas elétricas.

Dessa forma, o resultado em que houve mais energia recuperada foi para o valor de potência elétrica de 5 mW em uma tensão elétrica contínua igual a 3,29 V. Por fim, verifica-se que a pergunta problema foi respondida e que é possível alimentar uma carga elétrica com o experimento empregado no estudo.

### 5.2 Recomendações

A partir do estudo realizado, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Avaliação da montagem experimental utilizando outros materiais piezoelétricos e aplicando diferentes condições de contorno, como a forma de fixação da viga e a frequência de excitação;
- Estudo da resposta harmônica do elemento piezoelétrico utilizando o método dos elementos finitos;
- Avaliação da sollicitação mecânica do elemento piezoelétrico em frequências de excitação mais elevadas embasada na teoria de viga de Timoshenko.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SPIES, Peter; MATEU, Loreto; POLLAK, Markus. **Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications**. 2013. Taylor & Francis Group.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. Pearson. 2008.

LÓPEZ, Maria. **Powering Autonomous Sensors**. Springer. 2014.

ERTURK, A.; INMAN, D.J. **Piezoelectric Energy Harvesting**. John Wiley & Sons Ltd. 2011

XENOS, H. **Gerenciando a manutenção produtiva**. Editora de Desenvolvimento Gerencial. 1998.

PINTO, A. K; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. Qualitymark. 2001.

CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. LTC. 2008

EMPRESAS ganham em produtividade com a indústria 4.0. [S. l.], 17 mar. 2020. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/empresas-ganham-em-produtividade-com-a-industria-40/>. Acesso em: 16 dez. 2022.

HIBBELER, R. **Resistência dos Materiais**. Prentice Hall. 2004

HIBBELER, R. **Dinâmica**. Prentice Hall. 2005

POSIÇÃO. [S. l.], 2 nov. 2022. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Posi%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 20 jan. 2023.

VETORES e escalares em física. [S. l.], 9 jan. 2023. Disponível em: <https://br.neurochispas.com/fisica/vetores-e-escalares-em-fisica/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

FU, H; YEATMAN, E. M. **Broadband Rotational Energy Harvesting with Non-linear Oscillator and Piezoelectric Transduction**. J. Phys.: Conf. Ser. 773 012008. 2016.

WETSBY, E. **Design and Modeling of a Patterned-Electret-Based Energy Harvester for Tire Pressure Monitoring Systems**. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Volume 17. 2012. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2011.2151203>

HAMLEHDAR, M; KASAEIAN, A; SAFAEI, M. **Energy Harvesting from Fluid Flow using Piezoelectrics: A Critical Review**. Renewable Energy 143. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.078>

KOUMOTO, K. et. al. **Thermoelectric Ceramics for Energy Harvesting**. Journal of the American Ceramic Society. Volume 96. 2012.

TIPLER, Paul; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. 6ª ed. LTC. 2009.

GANS, Roger. **Mechanical Systems: A Unified Approach to Vibrations and Controls**. 2014. Springer.

BEER, F; JOHNSTON, E. **Mecânica Vetorial para Engenheiros: Dinâmica**. McGraw Hill. 2006.

BALACHANDRAN, B; MAGRAB, E. **Vibrações Mecânicas**. CENGAGE. 2010.

SHIGLEY, Joseph. **Dinâmica das Máquinas**. 1969. Blücher. 1 ed.

HEWITT, Paul. **Física conceitual**. Bookman, 2015.

NORTON, Robert. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. Mc-Graw Hill. 2010.

HALLIDAY, David, et al. **Fundamentos de Física - Eletromagnetismo - Volume 3**. 12ª edição. Grupo GEN, 2023.

COTTONE, F. **Introduction to Vibration Energy Harvesting**. NiPS Energy Harvesting Summer School, 2011.

MARKUS, O. **Circuitos Elétricos – Corrente Contínua e Corrente Alternada**. Erica. 2002.

NUSSENZVEIG, H. Moisés. **Curso de Física Básica: Eletromagnetismo**. Blucher. 2015.

BOYLESTAD, R; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. Pearson. 2012.

HOROWITZ, Paul. **A Arte da Eletrônica**. Bookman. 2017.

HAYT, W. **Eletromagnetismo**. Mc-Graw Hill. 2013.

CADY, W. **Piezoelectricity: Volume One**. Dover Books on Electrical. 2018.

PROTOBOARD 830 Pontos. [S. l.], 14 jan. 2023. Disponível em: [https://www.robocore.net/protoboard/protoboard-830-pontos?gclid=CjwKCAjw2K6lBhBXEiwA5RjtCd34hoH0IBbmjDQ26vg63PcIp8MoylL8mfi3V\\_7YQ41\\_lbMSxClfzhoCF84QAvD\\_BwE](https://www.robocore.net/protoboard/protoboard-830-pontos?gclid=CjwKCAjw2K6lBhBXEiwA5RjtCd34hoH0IBbmjDQ26vg63PcIp8MoylL8mfi3V_7YQ41_lbMSxClfzhoCF84QAvD_BwE). Acesso em: 7 mar. 2023.

792 Brass (UNS C79200) – Composition, Properties, and Uses. [S. l.], 20 jan. 2023. Disponível em: <https://blog.thepipingmart.com/grades/brass-792-composition-uses-properties/>. Acesso em: 18 maio 2023.

GOMES, Pedro. **CARACTERIZAÇÃO DE CANAL ACÚSTICO BASEADO EM TRANSDUTORES PIEZOELETRICOS**. [S. l.], 26 set. 2017. Disponível em: [https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio\\_resumo2017/relatorios\\_pdf/ctc/MEC/MEC-Pedro\\_Gomes.pdf](https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2017/relatorios_pdf/ctc/MEC/MEC-Pedro_Gomes.pdf). Acesso em: 5 abr. 2023.

AJITSARIA, J. et. al. - 2007 - Smart Mater. Struct. (16) 447. [dx.doi.org/10.1088/0964-1726/16/2/024](https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/2/024).

JEONG, S. et. al. Sensors and Actuators A: Physical. Volume 148, 4 Novembro 2008, Páginas 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.07.007>

HOOKER, M. Properties of PZT-Based Piezoelectric Ceramics Between -150 and 250 C. Setembro 1998.NASA. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19980236888>

What is energy harvesting?. [S. l.], 23 ago. 2021. Disponível em: <https://www.onio.com/article/what-is-energy-harvesting.html>. Acesso em: 8 maio 2023.

INMAN, Daniel. **Vibrações Mecânicas**. Grupo GEN, 2018.

LEET, Kenneth M. **Fundamentos da análise estrutural**. 3. ed. AMGH, 2009.

Radican, D. **Energy Harvesting**. Lulu.com, 2017.

MEI, Xutao. Joule 5, 1074–1118, Maio 2021.

CRAIG, R. R.; KURDILA, A. J. **Fundamentals of Structural Dynamics**. John Wiley & Sons. 2<sup>a</sup> ed. 2006

MARTHA, Luiz. **Análise de Estruturas: conceitos e métodos básicos**. Elsevier. 2010.

BERGER, J. E.; NUNES, G. **A mechanical Duffing oscillator for the undergraduate laboratory**. Am. J. Phys. 65 (9), September 1997.

CHOPRA, Inderjit. **Smart Structures Theory**. Cambridge University Press. 1ª ed. 2013.

LEO, Donald. **Engineering Analysis of Smart Material Systems**. John Wiley & Sons. 1ª ed. 2007.

KHALID, Mohammad. **Solar Energy Harvesting, Conversion, and Storage. Materials, Technologies, and Applications**. Elsevier. 1ª ed. 2023.

MOHANTY, Anwesa. **Vibration Energy Harvesting: A Review**. Journal of Advanced Dielectrics. 2019.

ROUNDY, S. et al; **Improving power output for vibration-based energy scavengers**. 2005.

BELINCOURT, D. **Piezoelectric ceramics: characteristics and applications**. Journal of Acoustical Society of America. 1981

FU, Hailing. **Rotational Energy Harvesting for Low-Power Electronics**. Tese de Doutorado. Imperial College London. 2018.

FU, Hailing; YEATMAN, Eric. **A methodology for low-speed broadband rotational energy harvesting using piezoelectric transduction and frequency up-conversion**. Energy Volume 125, Páginas 152-161. Abril de 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.115>

MINAYO, M.C. de S. (Org.) **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Ed. Atlas, 2002.

Gerhardt, TE; Silveira, DT. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A.C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. GEN - Atlas, 2022.

FONSECA, João José Saraiva da. **Metodologia da pesquisa científica**. Ceará: Universidade. Estadual do Ceará, 2002.

YIN, Robert; trad. Daniel Grassi. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. Bookman. 2001.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia Científica**. 8ª ed. Atlas, 2022.

Diodo retificador! O que é? Pra que serve?. [S. l.], 18 nov. 2019. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/diodo-retificador-o-que-e-pra-que-serve/>. Acesso em: 4 abr. 2023.

Módulo Ponte Retificadora Onda Completa AC DC. [S. l.], 8 fev. 2023. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/modulo-ponte-retificadora-onda-completa-ac-dc>. Acesso em: 19 abr. 2023.