



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



LUCAS DE ALMEIDA PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA PARA RECUPERAÇÃO DE
ENERGIA POR VIBRAÇÃO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA**

**OURO PRETO - MG
2022**

LUCAS DE ALMEIDA PEREIRA
Lucas.pereira2@aluno.ufop.edu.br

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA PARA RECUPERAÇÃO DE
ENERGIA POR VIBRAÇÃO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA**

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: Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães

OURO PRETO – MG
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P436d Pereira, Lucas de Almeida.

Desenvolvimento de estrutura para recuperação de energia por vibração utilizando manufatura aditiva. [manuscrito] / Lucas de Almeida Pereira. - 2022.

51 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães.

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

1. Energia - Recuperação de energia. 2. Deformações (Mecânica) - Piezeletricidade. 3. Titanato zirconato de Chumbo (PZT). 4. Impressão - Impressão 3D. 5. Projeto e Desenho Auxiliados por Computador (CADD).
I. Guimarães, Gustavo Paulinelli. II. Universidade Federal de Ouro Preto.
III. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas de Almeida Pereira

Desenvolvimento de estrutura para recuperação de energia por vibração utilizando manufatura aditiva

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 11 de outubro de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Diogo Antônio de Sousa - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. Ian Eiras Versiani Passos - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. 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 19/10/2022



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Paulinelli Guimaraes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/10/2022, às 06:37, 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, informando o código verificador **0414117** e o código CRC **9CFB9F09**.

A Deus dedico mais esta etapa vencida,
Meus pais e família por todo o apoio,
Aos meus amigos, pelo companheirismo.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador dr. Gustavo Paulinelli Guimarães, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

Aos meus pais por me apoiarem e me motivarem durante toda o período da faculdade.

A minha república que foi casa e aos moradores e ex-alunos pelo companheirismo nesta jornada em Ouro Preto.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

O objetivo do trabalho é o desenvolvimento de um recuperador de energia baseado em vibrações (*Vibration-based Energy Harvesting*), constituído de uma estrutura cujo movimento permita o acoplamento de elementos piezoelétricos para a recuperação/geração de energia elétrica, com objetivo final de alimentar sensores e outros sistemas de medição de pequeno porte. Tal estrutura é composta por material polímero de impressão 3D, denominado PETG e por um elemento piezoelétrico. Foram realizados diversos modelos numéricos no *software* ANSYS com sistemas modelados em CAD baseados em uma viga central com pastilhas de material piezoelétrico fixadas em sua superfície. Esta viga é engastada em uma de suas extremidades por meio de uma estrutura de encapsulamento e possui um eixo de massa variável, de acordo com o material, na outra extremidade para variar a frequência natural do conjunto. Em seguida, se deu o cálculo dos valores de tensão elétrica gerada pelo piezoelétrico, a partir do movimento da estrutura. Os modelos numéricos desenvolvidos no mesmo software permitiram avaliar em qual faixa de frequência o fenômeno ocorre com melhores resultados. Assim, foi possível otimizar as dimensões da estrutura para permitir a sintonização de frequências específicas. Ao final do estudo, foram obtidos resultados computacionais que indicam maior geração de energia elétrica próximo às frequências naturais do mecanismo devido à maior amplitude de movimento e maiores deformações dos elementos piezoelétricos.

Palavras-chave: recuperação de energia, piezeletricidade, PZT, impressão 3D, CAD.

ABSTRACT

The objective of this research is the development of a vibration-based energy harvester (Vibration-based Energy Harvesting), consisting of a structure which the movement allows the coupling of piezoelectric elements for the recovery/generation of electrical energy, with the final objective of feeding sensors. and other small measurement systems. This structure is composed of a 3D printing polymer material, known as PETG, and a piezoelectric element. Several numerical models were performed in ANSYS software with CAD modeled systems based on a central beam with piezoelectric material inserts fixed on its surface. This beam is fixed at one of its ends by means of an encapsulation structure and has a variable mass axis, according to the material, at the other end to vary the natural frequency of the set. Then the electric voltage values generated by the piezoelectric were calculated from the movement of the structure. Numerical models developed in the same software allowed to assess in which frequency range the phenomenon occurs with better results. Therefore, it was possible to optimize the dimensions of the structure to allow the tuning of specific frequencies. At the end of the study computational results were obtained that indicate greater generation of electrical energy close to the natural frequencies of the mechanism due to the greater amplitude of movement and greater deformations of the piezoelectric elements.

Key-words: *energy harvesting, piezoelectricity, PZT, 3D printing, CAD.*

LISTA DE SIMBOLOS

d -	Constante de tensão PZT
D -	Deslocamento elétrico;
E -	Campo elétrico;
ϵ^S -	Matriz de constantes dielétricas;
Hz -	Hertz;
m -	Metros;
N -	Newtons;
PZT -	Piezoelétrico;
Q -	Carga elétrica;
S -	Deformação mecânica;
T -	Tensão mecânica;
V -	Volts;
ω_n -	Frequência Natural;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama esquemático do gerador de inércia linear	5
Figura 2: Exemplo de Estrutura Utilizada	5
Figura 3: Resposta de Sistema Livre Sub Amortecido.....	7
Figura 4: Estrutura atômica do quartzo. (a) Estado natural; (b) Efeito da compressão; (c) Efeito da tração.....	12
Figura 5: Estrutura atômica do PZT: (a) Estado tetragonal distorcido; (b) Estado cúbico.	12
Figura 6: Efeito Piezoelétrico Direto.....	13
Figura 7: Efeito Piezoelétrico Indireto.	13
Figura 8: Instalação de PZT na lâmina de turbina.....	15
Figura 9: Nós e Elementos presentes em uma malha.....	17
Figura 10: Refinamento de Malha.....	17
Figura 11: Inversão de Linhas Ansys.....	18
Figura 12: Inversão de Linhas Ansys.....	19
Figura 13: Diagrama do processo de modelagem por fusão e deposição (FDM).....	20
Figura 14: Impressão 3D SLA.....	20
Figura 15: Sistema com PZT.....	23
Figura 16: Montagem de capsula com estrutura PZT.....	24
Figura 17: Malha do modelo numérico.....	26
Figura 18: Malha do estrutura.....	26
Figura 19 - Força Aplicada.....	27
Figura 20: Análise modal da viga.....	30
Figura 21: Resultado de análise modal –Aço.....	31
Figura 22: Resultado de análise modal – Alumínio.....	31
Figura 23: Gráfico de resposta de frequência gerada - Aço.....	32
Figura 24: Gráfico de resposta de frequência gerada - Alumínio.....	32
Figura 25: Gráfico de resposta de tensão elétrica gerada - Aço.....	33
Figura 26: Gráfico de resposta de tensão elétrica gerada - Alumínio.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de Contorno.	6
Tabela 2 - Modos de Vibração.	14
Tabela 3 - Parâmetros da Pastilha PZT.	23
Tabela 4 - Dimensões.	23
Tabela 5 - Variáveis e Indicadores.	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Recuperação de energia	4
2.2	Dinâmica de Estruturas.....	6
2.3	Calculo analítico dos modos Vibrantes da Viga.....	7
2.4	Materiais Piezelétricos.....	10
2.5	Aplicações dos Materiais Piezelétricos	13
2.6	Método de Elementos Finitos	16
2.7	Manufatura Aditiva.....	19
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	Tipos de Pesquisa	21
3.2	Materiais e Métodos	22
3.2.1	Modelagem do sistema Viga - PZT no Fusion 360.....	22
3.2.2	Preparação do Modelo CAD no ANSYS	25
3.2.3	Análise Modal	27
3.2.4	Análise da tensão gerada	27
3.2.5	Desenvolvimento e Modelagem da Estrutura Para Impressão 3D	28
3.3	Variáveis e Indicadores	28
3.4	Instrumentos de Coletas de Dados.....	28
3.5	Tabulação de Dados.....	28
3.6	Considerações Finais	29
4	RESULTADOS	30
4.1	Simulação Modal da Pastilha PZT	30
4.2	Simulação Modal da Estrutura	30
4.3	Análise Harmônica	32
4.4	Análise da Tensão Elétrica Gerada.....	33

5	CONCLUSÃO.....	35
5.1	Trabalhos Futuros	35
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	36

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A busca por sustentabilidade e redução na emissão de poluentes gerou um interesse por reutilizar formas de energia que antes eram desperdiçadas em máquinas no geral. Esta busca deu início ao desenvolvimento de equipamentos eletrônicos de grande escala, tais como as máquinas industriais, automóveis e até aeronaves elétricas, que requerem uma disponibilidade energética elevada para seu funcionamento adequado. Diante disso, diversas fontes de energia, como baterias, foram estudadas e desenvolvidas para suprir tal necessidade de maneira contínua e duradoura. No entanto, ainda assim se encontram muitas limitações em relação à duração e à vida útil desses elementos, o que torna os estudos relacionados à recuperação de energia ainda mais necessários (DIENGER, 2010).

Diante disso, um dos métodos de recuperação energética mais estudado atualmente é por meio da vibração de elementos. Isto se dá ao fato de que, segundo Rao (2008, p.5):

Naturalmente, as estruturas projetadas para apoiar máquinas centrífugas pesadas como motores e turbinas, ou máquinas alternativas como motores a vapor e a gás e bombas, também estão sujeitas a vibrações. Tal fenômeno é descrito por qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo.

A recuperação de energia de vibração pode ser realizada por meio de dispositivos eletromagnéticos, os quais possuem uma grande variação de configurações atingindo altos valores de corrente, porém a montagem é complexa podendo gerar alguns problemas no seu funcionamento, eletrostáticos, os quais necessitam de uma carga inicial de polarização, além da impedância de saída dos dispositivos serem altas, tornando-os menos adequados como fonte de alimentação, e piezoelétricos, que tem uma abordagem mais simples e não necessitando de uma geometria complexa e componentes adicionais, porém o seu desempenho e vida útil é limitada pelas características mecânicas. Desta forma, algumas vantagens de se utilizar o piezoelétrico são que, não é necessária uma fonte de tensão externa, possui uma configuração compacta, grande ligação em monocristais e altas tensões variando de 2 a 10V (BEEBY, *et al* 2006).

Para se obter uma melhor eficiência na recuperação de energia, pode-se utilizar elementos finitos para modelagem do piezoelétrico, o qual também proporciona uma solução satisfatória, quer em termos econômicos ou na verificação de pré-requisitos de projeto, por meio de sucessivas análises e modificações do modelo. Sendo que, para obter-se um modelo, deve-se atentar a simplificação da geometria da estrutura em estudo, o refinamento da malha e qual tipo de elemento utilizar (AZEVEDO, 2003).

Por fim, a pergunta problema que motivou o estudo é:

Como desenvolver, a partir de elementos finitos, uma estrutura para recuperação de energia por meio de vibração?

1.2 Justificativa

Os elementos atualmente estudados e os já utilizados para recuperação de energia fornecem baixa potência de alimentação, grande parte dos sensores e componentes presentes em máquinas e veículos para identificação e sinalização, como painéis, botões e luzes interiores requerem baixa tensão para seu funcionamento (TANG, *et al* 2010).

Com o crescimento das análises preditivas se gera um interesse por equipamentos autônomos de sensoriamento para levantar dados em ambientes de difícil acesso e de alimentação elétrica restrita. Dentre os nichos possíveis, o sensoriamento de máquinas com motores elétricos que trabalham na faixa de 60Hz. Diante disso, as pastilhas piezoelétricas tem grande potencial para automatizar sensores de setores mecânicos e prediais (BERNARDO, 2002).

Outro setor de aplicação do sensoriamento alimentado por pastilhas PZT é o de análise preditiva de queimadas no bioma amazônico, que em grande parte está em ambientes remotos de difícil acesso (MASULLO, 2018).

Além disso, já foram realizados estudos para recuperação de energia com sensores piezoelétricos no corpo humano por meio da variação da pressão arterial. Por meio de elementos finitos pode-se observar que um diafragma circular de 5,56mm de raio e 9 μ m de espessura produziria 0,61 μ W (BEEBY, *et al* 2006).

Ademais, a confiabilidade desenvolvida nas últimas pesquisas sobre os materiais piezoelétricos tem permitido a aplicação em áreas mais complexas como a aviação, diante disso, a abordagem de colocação apresentada em um projeto da General Motors é especialmente adequada para investigar a integração estrutural de atuadores piezoelétricos monolíticos em estruturas compostas complexas. O procedimento acima mencionado foi testado em uma lâmina de turbo máquina para futuros motores de aeronaves de alto desempenho. Uma geometria aerodinâmica de forma fria original foi fornecida por um parceiro de projeto industrial como linha de base para as simulações (BACHMANN, 2012).

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver, em elementos finitos, e simular um recuperador de energia, produzido com polímeros de impressão 3D, com sensor piezoelétrico vibrante próximo à sua faixa de ressonância para encontrar as dimensões que proporcionam maior aproveitamento na geração de energia.

1.3.2 Específicos

- Apresentar um estudo teórico sobre a recuperação de energia, sobre os materiais piezoelétricos e polímeros de impressão 3D;
- Elaborar uma revisão bibliográfica a respeito da metodologia de trabalho e definir os tipos de pesquisa presentes neste estudo.
- Realizar uma simulação com condições de contorno iniciais em vibração forçada e adaptar a rigidez da estrutura.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho apresenta uma estrutura dividida em 5 Capítulos e suas respectivas subdivisões. Primeiramente, no Capítulo 1, foi descrito o problema a ser estudado, assim como a justificativa para tal estudo e seus objetivos gerais e específicos.

No Capítulo 2 realizou-se um estudo teórico mais aprofundado sobre o tema, no qual definiu-se os principais conceitos abordados e explicitou-se informações relevantes para a sequência do trabalho.

No Capítulo 3 abordou-se a metodologia utilizada, como, a definição da malha utilizada, o tipo de elemento que melhor se aplica ao caso e sua quantidade, e como aplicou-se as propriedades do piezoelétrico no *software* ANSYS.

No Capítulo 4 foram demonstrados e discutidos os resultados obtidos a partir de cada condição estudada, de acordo com o capítulo anterior.

Por fim, no Capítulo 5 finalizou-se o trabalho com as devidas conclusões, baseadas nos resultados e suas discussões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Recuperação de energia

A recuperação de energia pode ser feita por meio de diversas fontes renováveis, tal como energia eólica, energia solar e energia cinética que, nestes casos são conhecidas como macro processos. Para estes métodos a potência gerada é maior, chegando à casa de KW e MW, com a capacidade de alimentar equipamentos de escala industrial (MAHESH *et al*, sd). 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 surge o conceito de geração ou colheita de energia (*Energy Harvesting*), baseado na 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, denominada *Energy Harvesting*, existem quatro aplicações principais para captação de energia, o piezoeletrico (SODANO *et al*, 2005; SWALLOW *et al*, 2008), a eletromagnética (REID *et al*, 2007; TORAH *et al*, 2007), a termoelétrica (ROWE, 2005) e a fotovoltaica (LEE *et al*, 1994).

Existem três principais métodos mais comuns para recuperação de energia por vibração, sendo baseados em transduções piezoeletricas, eletromagnéticas e eletrostáticas. Deste modo, analisando um modelo linear para a conversão de energia e partindo do pressuposto que é necessário um mecanismo de transdução que converta vibrações em energia elétrica, pode-se utilizar um sistema massa mola baseado em gerador de inércia linear, como visto na figura 1, para modelar um sistema de recuperação de energia por vibração. Porém, este modelo só é válido quando o amortecimento e a rigidez são lineares, ou seja, quando o amortecimento é proporcional à velocidade e a rigidez é proporcional ao deslocamento (WEI *et al*, 2017).

Uma das configurações mais simples para este tipo de dispositivos são as vigas engastadas-livres, conhecidas na literatura como vigas *cantiléver*, recobertas superior e/ou inferiormente por um material piezoeletrico e excitadas através de sua base. Devido a fácil deformação e estrutura simples, o gerador piezoeletrico é um dos mais estudados, sendo analisados vários tipos de modelos, no qual um deles é representado na figura 2, cujo modelo possui uma viga de duas camadas de piezoeletrico com uma massa na extremidade livre, de modo que a frequência de ressonância seja reduzida para que fique próxima a frequência de excitação externa (WEI *et al*, 2017).

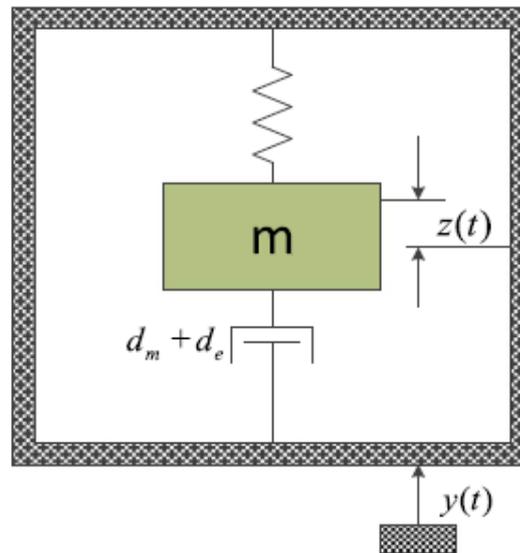


Figura 1: Diagrama esquemático do gerador de inércia linear
Fonte: WEI, (2017).

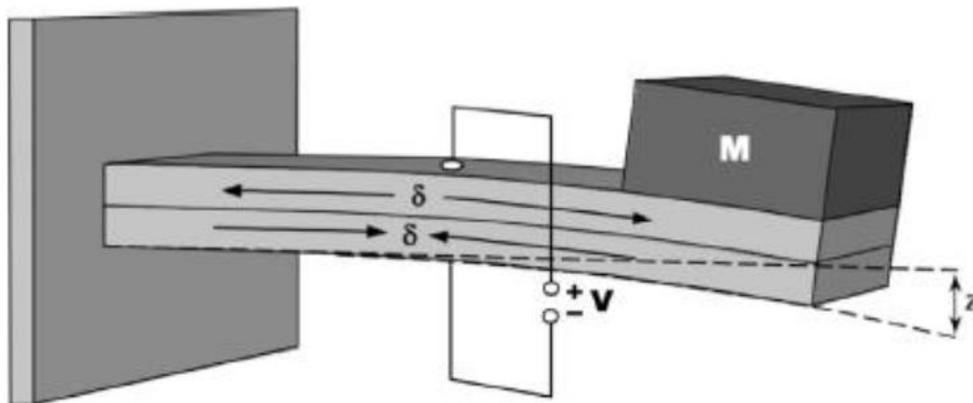


Figura 2: Exemplo de Estrutura Utilizada
Fonte: WEI, (2017).

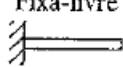
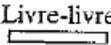
O modelo visto na figura 2 é capaz de gerar $250\mu\text{W}/\text{cm}^3$ quando excitado a uma aceleração de $2,5\text{m}/\text{s}^2$ a 120Hz . Porém, a massa da viga foi desconsiderada, assumindo que na extremidade é muito maior que distribuída, gerando assim, uma imprecisão na derivação da conversão de energia (WEI *et al*, 2017).

2.2 Dinâmica de Estruturas

A principal análise baseia-se em simulações de estruturas dinâmicas e, uma das características que distingue uma análise dinâmica para uma análise estática é a complexidade gerada pela variação das condições no tempo do problema dinâmico, no qual o carregamento e a resposta variam com o tempo. Outro ponto é o deslocamento resultante na estrutura, sendo que esse depende não só do carregamento, mas das forças inerciais que se opõem às acelerações que as produzem. Porém, se as forças inerciais tiverem pouca influência no carregamento total, pode-se considerar um caráter estático para o problema, mesmo com o carregamento e a resposta variando no tempo (MONIZ, sd).

Para a estrutura dessa pesquisa foi definida a condição de fixa-livre para a viga que suporta as pastilhas piezoelétricas, a qual segue as definições da tabela 1.

Tabela 1 - Condições de Contorno.

Condições das extremidades da barra	Condições de contorno	Equação de frequência	Forma modal (função normal)	Frequências naturais
 Fixa-livre	$u(0, t) = 0$ $\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0$	$\cos \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_n(x) = C_n \operatorname{sen} \frac{(2n + 1) \pi x}{2l}$	$\omega_n = \frac{(2n + 1) \pi c}{2l}$ $n = 0, 1, 2, \dots$
 Livre-livre	$\frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = 0$ $\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0$	$\operatorname{sen} \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_n(x) = C_n \cos \frac{n\pi x}{l}$	$\omega_n = \frac{n\pi c}{l}$, $n = 0, 1, 2, \dots$
 Fixa-fixa	$u(0, t) = 0$ $u(l, t) = 0$	$\operatorname{sen} \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_n(x) = C_n \cos \frac{n\pi x}{l}$	$\omega_n = \frac{n\pi c}{l}$, $n = 1, 2, 3, \dots$

Fonte: RAO, (2008).

A tabela 1 indica as equações que orientam cada uma das condições de contorno, desde a frequência natural até as formas modais.

Com a condição de contorno definida e a forma de vibração harmônica, tem-se a figura 3 com o gráfico de oscilação de movimento da viga no tempo.

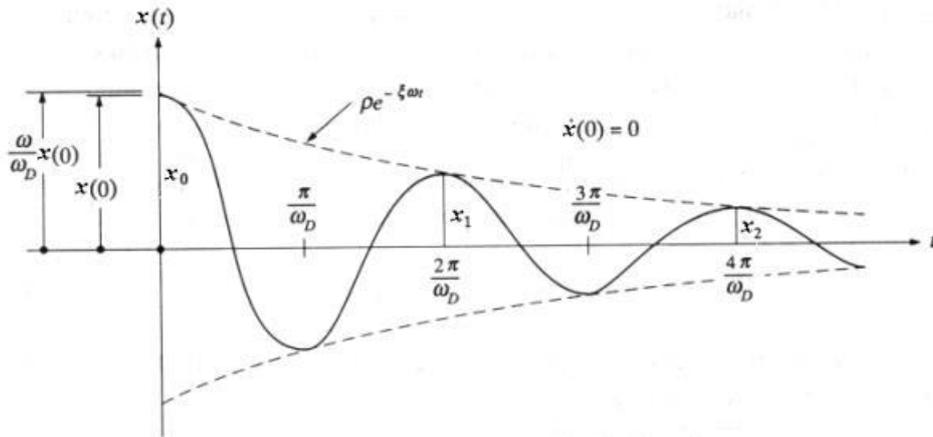


Figura 3: Resposta de Sistema Livre Sub Amortecido
Fonte: RAO, (2008).

A figura 3 identifica o decaimento exponencial da amplitude de vibração da viga engastada.

2.3 Cálculo analítico dos modos Vibrantes da Viga

Com base na equação de Euler-Bernoulli a equação do movimento governante de uma viga é dada em termos do movimento transversal absoluto por (MINETO,2013):

$$m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = f(x, t) \quad (1)$$

O primeiro termo na equação do movimento está relacionado com a força de inércia; o segundo termo está relacionado ao efeito de amortecimento e o terceiro está relacionado ao momento fletor interno. O termo do lado direito da equação é a força de excitação. O parâmetro m é a massa total do sistema por unidade de comprimento (MINETO,2013).

A solução da equação (1) pelo método de separação de variáveis é (MINETO,2013):

$$w(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) u_r(t) \quad (2)$$

Onde $\phi_r(x)$ é a autofunção (normalizada pela massa) do r -ésimo modo de vibrar e $u_r(t)$ é a expressão da resposta mecânica modal. Para calcular as formas modais e as frequências naturais, é necessário considerar o caso de vibração livre não amortecida (MINETO,2013):

$$m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

Substituindo a equação (2) na equação (3), para o primeiro modo de vibrar, tem-se (MINETO,2013):

$$m\phi \frac{\partial^2}{\partial t} + (YI)u \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} = 0 \quad (4)$$

Rearranjando os termos a equação (4) torna-se (MINETO,2013):

$$-m\phi \frac{\partial^2 u}{\partial t} = (YI)u \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} = \omega^2 \quad (5)$$

Onde ω é a frequência natural não amortecida. A equação (4) pode ser reescrita utilizando a notação (.) para a derivada temporal (MINETO,2013):

$$-\frac{\ddot{u}}{u} = \frac{(YI)}{m} \frac{1}{\phi} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} = \omega^2 \quad (6)$$

Assim, da equação (6) origina-se o seguinte sistema de equações (MINETO,2013):

$$\begin{cases} -\frac{\ddot{u}}{u} = \omega^2 \\ \frac{(YI)}{m} \frac{1}{\phi} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} = \omega^2 \end{cases} \quad (7)$$

Reescrevendo, o sistema linear (7) torna-se (MINETO,2013):

$$\begin{cases} \ddot{u} + u\omega^2 = 0 \\ \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} - \beta^4 \phi = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Onde:

$$\beta^4 = \frac{m\omega^2}{(YI)} \quad (9)$$

As soluções para as equações (8) são (MINETO,2013):

$$u(t) = B_1 \cos(\omega t) + B_2 \sin(\omega t) \quad (10)$$

$$\phi(x) = A_1 \cos(\beta_x) + A_2 \sin(\beta_x) + A_3 \cosh(\beta_x) + A_4 \sinh(\beta_x) \quad (11)$$

Onde $\phi(x)$ representa as formas modais para cada autovalor de β , chamado modo de vibrar. As constantes B1 e B2 são encontradas através das condições iniciais e as constantes A1 a A4 são encontradas através das condições de contorno para a viga “*cantilever bimorph*” com

massa na extremidade livre. As condições de contorno na extremidade engastada da viga são (MINETO,2013):

$$w(0, t) = 0 \quad (12)$$

que representa deslocamento nulo, e (MINETO,2013):

$$\frac{dw(0, t)}{dt} = 0 \quad (13)$$

que representa flexão nula.

As condições de contorno na extremidade livre da viga são (MINETO,2013):

$$(YI) \frac{\partial^3 w(L, t)}{\partial x^3} = m_m \frac{\partial^2 w(L, t)}{\partial t^2} \quad (14)$$

Isto é, a força de cisalhamento na extremidade livre é igual a força de inércia da massa concentrada, m_m , e (MINETO,2013):

$$(YI) \frac{\partial^2 w(L, t)}{\partial x^2} = I_m \frac{\partial^3 w(L, t)}{\partial x \partial t^2} \quad (15)$$

Isto é, o momento fletor na extremidade livre é igual a inércia de rotação, I_m , da massa concentrada. Utilizando as equações (10) e (11) e as condições iniciais e de contorno, chegam às autofunções $\phi_r(x)$ (MINETO,2013):

$$\phi_r(x) = C_r \left\{ \cos\left(\frac{\lambda_r}{L} x\right) - \cosh\left(\frac{\lambda_r}{L} x\right) + a_r \left[\sin\left(\frac{\lambda_r}{L} x\right) - \sinh\left(\frac{\lambda_r}{L} x\right) \right] \right\} \quad (16)$$

$$a_r = \frac{\sin(\lambda_r) - \sinh(\lambda_r) + \frac{\lambda_r m_m}{mL} [\cos(\lambda_r) - \cosh(\lambda_r)]}{\cos(\lambda_r) - \cosh(\lambda_r) - \frac{\lambda_r m_m}{mL} [\sin(\lambda_r) - \sinh(\lambda_r)]} \quad (17)$$

Onde $\lambda_r = \beta_r L$. C_r é a constante modal de amplitude que deve ser analisada através da normalização das autofunções de acordo com as condições de ortogonalidade. Os autovalores β_r são então λ_r/L . Substituindo essa expressão na equação (9), a frequência natural não amortecida do r -ésimo modo de vibrar, ω_r , é dada por (MINETO,2013):

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{(YI)}{mL^4}} \quad (18)$$

Os autovalores λ_r podem ser obtidos através da equação característica da frequência, dada por (MINETO,2013):

$$1 + \cos(\lambda) \cosh(\lambda) + \frac{\lambda m_m}{mL} [\cos(\lambda) \sinh(\lambda) - \sin(\lambda) \cosh(\lambda)] - \quad (19)$$

$$\frac{\lambda^3 l_t}{mL^3} [\cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda)] + \frac{\lambda^4 m_m I_m}{m^2 L^4} [1 - \cos(\lambda) \cosh(\lambda)] = 0$$

2.4 Materiais Piezelétricos

O efeito piezoelétrico direto consiste da habilidade que certos materiais possuem para gerar uma carga elétrica proporcionalmente à força externa aplicada. Este efeito foi inicialmente mencionado pelo mineralogista francês René Just Haiiy por volta de 1817, observando a presença de cargas elétricas na superfície de um cristal de turmalina tensionado. Mas somente em 1880 os irmãos Curie publicaram o primeiro trabalho descrevendo o efeito piezoelétrico direto, ou seja, a conversão da energia mecânica em energia elétrica em cristais. No ano seguinte, confirmaram experimentalmente as previsões de Lippmann, que utilizou considerações termodinâmicas para a previsão do efeito piezoelétrico inverso, no qual um campo elétrico externo induz uma deformação no material piezoelétrico, havendo a conversão da energia elétrica em energia mecânica.

Em 1880 os irmãos Curie descobriram o fenômeno de geração de cargas elétricas pela aplicação de pressão ou tensão mecânica em alguns materiais e denotaram de *efeito piezoelétrico*. Eles demonstraram esse resultado medindo a carga induzida através de eletrodos colocados sobre o material quando este sofreu uma deformação imposta. Além disso, alguns anos depois, descobriram que o efeito era reverso, visto que quando um sinal elétrico era aplicado ao elemento, uma tensão mecânica era induzida. Tal descoberta foi interessante, mas pouco útil para a época, levando em consideração que a tensão elétrica gerada e a deformação mecânica eram baixas para os padrões contemporâneos. A primeira aplicação fora dos laboratórios apareceu somente durante a Primeira Guerra Mundial em 1917 e foi realizada por Langevin, um ex-aluno de Pierre Curie. Langevin utilizou o quartzo para a produção de ondas ultrassônicas e foi o precursor do primeiro sonar (*Sound Navigation Ranging*). Porém, nos últimos anos os estudos a respeito destes materiais têm ganhado maior relevância devido à

redução de consumo de grande parte dos equipamentos e da busca por sustentabilidade (COTTONE, 2011).

Ajitsaria *et al.* (2007) desenvolveram um modelo de viga *cantilever* tipo “*bimorph*” para geração de energia usando uma aproximação analítica baseada na teoria de Euler Bernoulli e nas equações de Timoshenko, o qual é comparado com dois modelos previamente descritos na literatura: circuito elétrico equivalente e método da energia. Com este mesmo tipo de viga Huang, Lin e Tang (2004) desenvolveram um modelo com múltiplas camadas de material piezolétrico de onde obtiveram expressões analíticas para curvatura, deslocamento e deflexão da viga. Os resultados de deflexão da viga “*bimorph*” para conexões em série e paralelo são comparados.

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 piezolétricas. O dispositivo consiste de camadas com diferentes espessuras, para a qual cada camada apresenta uma frequência de ressonância.

Recentemente, Kim *et al.* (2011) propuseram vários modelos matemáticos de vigas para analisar a eficiência de vigas *cantilever* utilizadas como conversores piezolétricos de energia. Nestes modelos, o efeito da razão largura/comprimento e também o efeito da distribuição da massa da extremidade foram considerados na determinação das respostas elétricas. A validação e precisão dos modelos propostos foram verificadas através da comparação dos resultados para tais modelos, com modelos convencionais de vigas e com modelos de elementos finitos tridimensionais. As comparações mostraram que o modelo desenvolvido forneceu melhorias na determinação das respostas elétricas, mostrando ser útil para o projeto de sistemas piezolétricos de conversão de energia compostos por vigas *cantiléver*.

De acordo com Mohanty *et al* (2019), cada cristal do material piezolétrico é constituído por um pequeno íon metálico tetravalente colocado dentro de uma rede de íons metálicos divalentes maiores e O₂. Alguns exemplos desses materiais são Zirconato Titanato de Chumbo (PZT) e Nitreto de Alumínio 62. Além disso, os Cristais de quartzo, turmalina, sal de Rochelle e topázio, exibem efeito piezoelétrico em seu estado natural. A estrutura atômica do quartzo, por exemplo, é constituída por uma hélice que se estende ao longo do eixo Z conforme esquematizado na Figura 4, com dois átomos de oxigênio (cargas negativas) e um de silício (carga positiva).

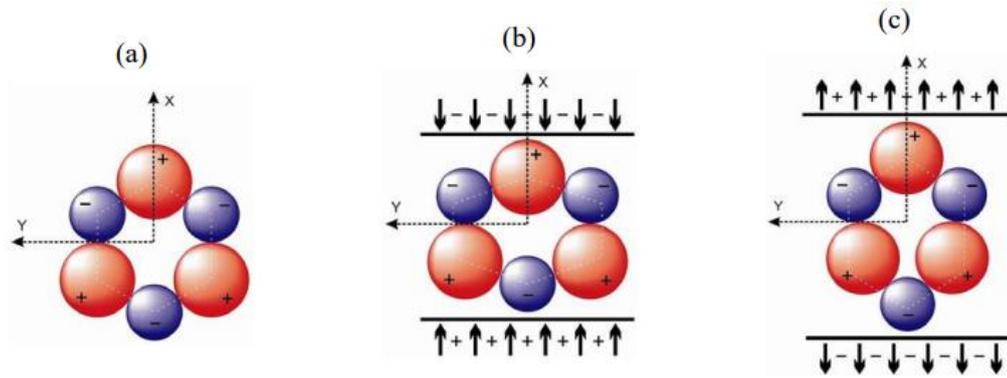


Figura 4: Estrutura atômica do quartzo. (a) Estado natural; (b) Efeito da compressão; (c) Efeito da tração.
Fonte: SIQUEIRA, (2015).

Além disso, o PZT, por exemplo, é formado por blocos microscópicos chamados domínios que, por sua vez, são formados por células unitárias tetragonais distorcidas quando se encontram abaixo da temperatura Curie (Figura 4(a)). A célula unitária forma um dipolo elétrico devido à posição deslocada do íon de titânio ou zircônio e, dentro de um domínio, as células apresentam polarização e orientação na mesma direção. Como os domínios encontram-se distribuídos aleatoriamente, o PZT não apresenta propriedades piezoelétricas macroscópicas (PERLINGEIRO *et al* 2016).

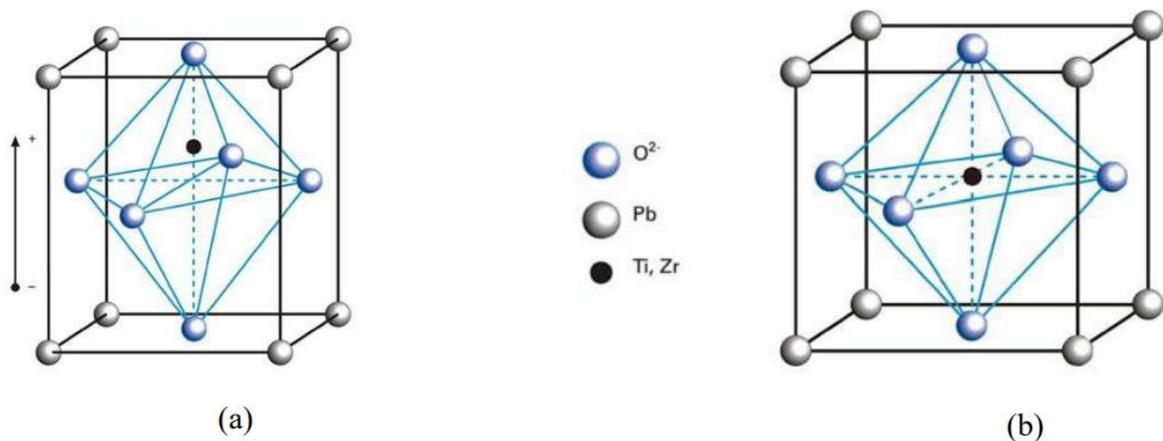


Figura 5: Estrutura atômica do PZT: (a) Estado tetragonal distorcido; (b) Estado cúbico.
Fonte: SIQUEIRA, (2015).

Existem algumas variações dentre os materiais PZT que se adequam para determinadas aplicações e condições de contorno, como: PZT-5A, que possui característica intrínsecas para suportar maiores temperaturas de trabalho e, também maiores variações de temperatura. Por outro lado, existe o PZT-5H, que é um material mais susceptível a mudanças de propriedades quando exposto a maiores temperaturas ou a grandes variações. Ademais, outros materiais PZT

foram desenvolvidos para atender às demais aplicação que intermediam as duas anteriores mais utilizadas (PIEZO, 2020).

2.5 Aplicações dos Materiais Piezelétricos

A palavra Piezeletricidade tem origem do grego com o significado de “Eletricidade por pressão”. A primeira aplicação possível tem como objetivo a obtenção de carga ou tensão elétrica a partir de aplicação de tensão mecânica no sensor em questão, efeito nomeado direto e ilustrado pela figura 6. Algumas utilizações deste modelo podem ser exemplificadas por recuperação de energia em pisos de espaços de eventos, em rodovias, em estruturas de automóveis e até de aeronaves. Outrossim, pode-se aplicar os piezos materiais para obter certa deformação mecânica do elemento submetendo-o a determinada carga ou campo elétrico constante, efeito denominado indireto, ilustrado na figura 7 (ERTURK, 2011). As Equação 1 representa, de forma simplificada, o efeito piezoelétrico desconsiderando a simetria do material. Pode-se notar que, há uma dependência linear entre a deformação (S) e o campo elétrico (E). Além disso, geralmente estas equações utilizam notação matricial (EIRAS, 2004).

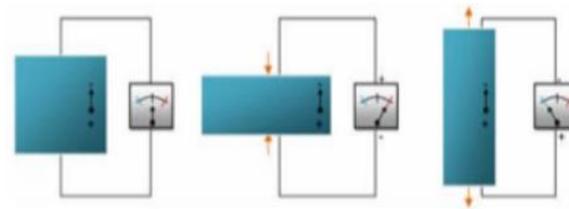


Figura 6: Efeito Piezoelétrico Direto.
Fonte: CASIMIRO, (2009).

Na figura 6 são aplicadas forças de compressão e tração contra a pastilha e feita a leitura de tensão elétrica gerada em seguida.

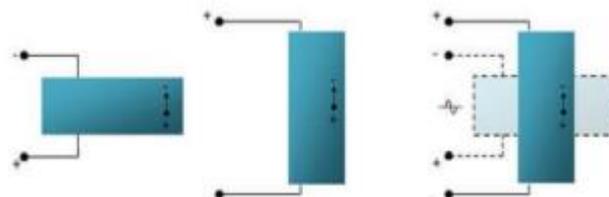


Figura 7: Efeito Piezoelétrico Indireto.
Fonte: CASIMIRO, (2009).

Na figura 7 é aplicada uma tensão elétrica sobre a pastilha e observado posteriormente o efeito de mudança morfológica logo em seguida. A equação piezoelétrica fundamental (1) na forma carga-tensão correlaciona o deslocamento elétrico D e a tensão mecânica T com o campo elétrico E e a deformação mecânica S . ε^S é a matriz de constantes dielétricas em deformação constante, e representa os coeficientes de acoplamento piezoelétrico e c^E é a matriz de rigidez mecânica em campo elétrico constante.

Tabela 2 - Modos de Vibração.

Strain-Charge Form	Strain-Voltage Form	Stress-Charge Form	Stress-Voltage Form
$S = s^E \cdot T + d^t \cdot E$ $D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E$	$S = s^D \cdot T + g^t \cdot D$ $E = -g \cdot T + \varepsilon^{T^{-1}} \cdot D$	$T = c^E \cdot S - e^t \cdot E$ $D = e \cdot S + \varepsilon^S \cdot E$	$T = c^D \cdot S - q^t \cdot D$ $E = -q \cdot S + \varepsilon^S \cdot E$

Fonte: CHEN, (2006).

$$\begin{bmatrix} D \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^S & e \\ -e_t & c^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ S \end{bmatrix} \quad (20)$$

A parte superior da equação (20) lê-se como apresentado na equação (21)

$$D = e * S + \varepsilon^S * E \quad (21)$$

Como nos concentramos no amortecimento passivo de vibração, os dispositivos piezoelétricos são operados no modo sensor. Isso significa que nenhum campo elétrico externo é aplicado aos terminais do material piezo cerâmico; portanto, o campo elétrico na equação (21) se torna zero e obtemos a equação (22).

$$D = e * S \quad (22)$$

Que mais detalhadamente lê-se:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ S_{23} \\ S_{13} \\ S_{12} \end{bmatrix} \quad (23)$$

- D: Deslocamento elétrico;
- A: Área;
- Q: Carga;
- d: Constante de tensão PZT;
- T: Tensão mecânica;
- S: Deformação mecânica;
- E: Campo elétrico.

Foram desenvolvidos outros métodos de utilização dos materiais piezoelétricos obtidos por meio da utilização de campo elétrico constante e por meio de tensão mecânica. As equações que regem alguns desses modos são exemplificadas na Tabela 2.

Um das aplicações que vem sendo estudadas, segundo pesquisa de Bachmann *et al* (2012), é a instalação de pastilhas PZT na área da aviação, como nas pás de turbinas para utilizar a vibração e deformação das lâminas para gerar energia elétrica, o que está ilustrado na figura 8.



Figura 8: Instalação de PZT na lâmina de turbina.
Fonte: BACHMANN, (2012).

A figura 8 ilustra a pesquisa feita com a instalação de uma pastilha piezoelétrica no interior de uma lâmina de turbina aeronáutica, colada na parede interna do componente para otimizar a recuperação de energia, absorvendo qualquer mínima variação da forma (BACHMANN, 2012).

Outra aplicação possível para aplicação dos sensores alimentados por pastilhas PZT é a análise preditiva de edificações e pontes, que estão expostas a vibrações propagadas por tráfego de veículos, para prevenção de falhas estruturais, que muitas vezes estão em áreas remotas e de difícil acesso. Em casos como estes, a alimentação elétrica externa pode ser de grande dificuldade para os operadores (HUNAIDI,2000).

Tornincasa *et al.* (2011) apresentam um dispositivo de geração de energia para pneus de veículos. O dispositivo explora uma mola assimétrica magnética para ser adaptável e eficaz em várias velocidades do veículo. São realizadas simulações numéricas através do SIMULINK que levam em conta o comportamento dinâmico não linear e ressonância adaptativa da massa sísmica, eletromagnética e acoplamento entre a massa magnética e bobinas, bem como a transferência da potência gerada a uma carga externa, por meio de uma interface de circuito não-linear. Uma análise de diferentes não linearidades do sistema para diferentes velocidades do veículo e um estudo combinado dos efeitos amolecimento e endurecimento do dispositivo são realizados e discutidos.

2.6 Método de Elementos Finitos

A principal maneira utilizada para analisar o problema é o Método de Elemento Finitos (MEF), que é um método computacional baseado na solução de questões matemáticas por meio da solução de equações diferenciais. Estas questões possuem condições de contorno conhecidas como variáveis de campo e, dependendo do tipo de problema físico envolvido, as variáveis de campo pode incluir deslocamento físico, temperatura, fluxo de calor e velocidade do fluido para citar apenas alguns (HUTTON, 2004).

Segundo Mirlisenna (2016), na primeira etapa do processo a geometria é subdividida em partes menores, denominadas elementos e normalmente triangulares, que são a representação continua do problema. Isso aumenta a eficiência do computador para solucionar a tarefa em parcelas mais simples. Ainda segundo Mirlisenna. (2016, p.2), “os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos esses elementos e nós dá-se o nome de malha.” Este conceito pode ser observado na Figura 9.

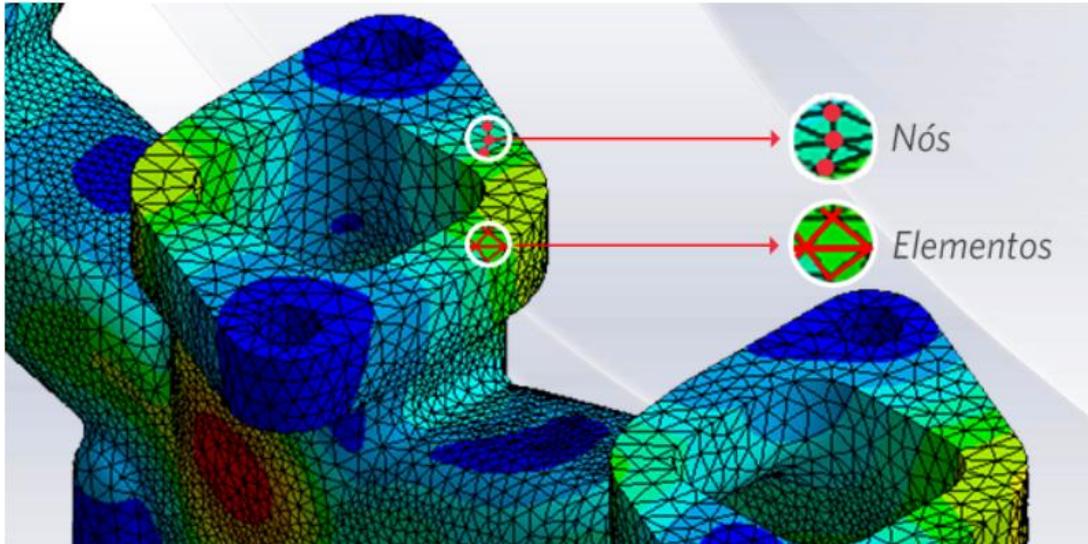


Figura 9: Nós e Elementos presentes em uma malha.
Fonte: MIRLISENNA, (2016).

A precisão da análise está relacionada ao número de nós e elementos, como indicado na Figura 9, ou seja, quanto menor o tamanho e maior o número, melhor o resultado final, mas também maior é o gasto computacional MIRLISENNA, (2016).

Grande parte das geometrias de elementos possuem lados retos e por isso é impossível abranger todo o domínio físico na malha do elemento se este inclui limites curvos. Por este motivo a malha mais refinada fornece um resultado mais próximo do valor exato, como ilustrado na Figura 10 (HUTTON, 2004).

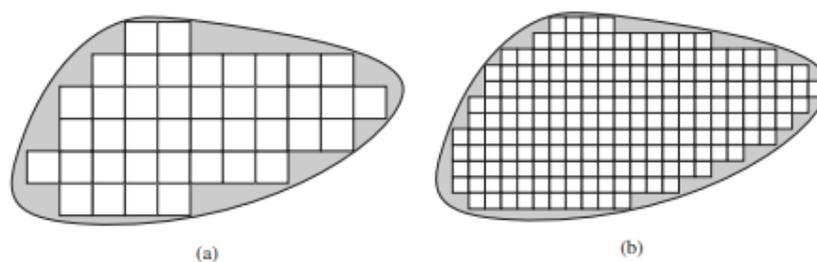


Figura 10: Refinamento de Malha.
Fonte: HUTTON, (2004).

De acordo com Mirlisenna (2016), variações do Método dos Elementos Finitos viabilizam a análise térmica, acústica, dinâmica, eletromagnética e de fluídos para casos mais simples de comportamento linear ou outros não lineares, como quando há grandes deslocamentos ou contato entre partes de uma montagem.

$$[c] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z & xy & yz & xz \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & & & & & \\ c_{21} & c_{22} & & & & \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & & & \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & & \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z & xy \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & & & \\ c_{21} & c_{22} & & \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(3-D) (2-D)

$$\text{ANSYS}[c]^E = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z & xy & yz & xz \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & & & & & \\ c_{21} & c_{22} & & & & \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & & & \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{66} & & \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{46} & c_{44} & \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{56} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figura 12: Inversão de Linhas Ansys.
Fonte: CHEN, (2006).

Assim como na Figura 11, a figura 12 ilustra troca da linha xz com xz e da coluna xy com xz, com os mesmos deslocamentos das duas anteriores.

Segundo Chen (2006), para atender os parâmetros do Software é necessário substituir os valores da linha 4 pela linha 6, ou seja, ordenar os dados como X, Y, Z, XY, YZ, XZ.

2.7 Manufatura Aditiva

Segundo Santana, (2018) a Impressão 3D pode ser definida como um processo utilizado para fabricar objetos tridimensionais baseado em uma deposição, controlada digitalmente, de sucessivas camadas de material até a criação de uma estrutura final. Também conhecida como Manufatura Aditiva, a tecnologia se opõe aos princípios da manufatura subtrativa, em que componentes são construídos através da remoção de material por processos como furação, fresamento, corte por serragem, entre outros. A manufatura aditiva é um sistema de produção que utiliza o desenho assistido por computador, CAD em suas siglas em inglês, e scanners 3D. (MECALUX, 2021).

Os principais métodos existentes são: Modelagem por deposição fundida (FDM), baseada na sobreposição de camadas de polímero fundido, ilustrada pela figura 13. Esta é a variação que tem melhores características e custo-benefício para o estudo em questão (HOTZA, 2009).

As vantagens apresentadas pelos procedimentos a base de sólidos são: a fabricação de componentes com alta resistência; ser prescindível o uso do forno ou outro equipamento para a realização de cura; não utilização de laser, que, por consequência, possui menor gasto energético em comparação aos demais processos; e utilização de equipamentos compactos, tornando possível o uso em escritórios. Por outro lado, existem desvantagens deste processo: precisão não muito alta; e velocidade do processo lenta e limitada (VOLPATO, 2017).

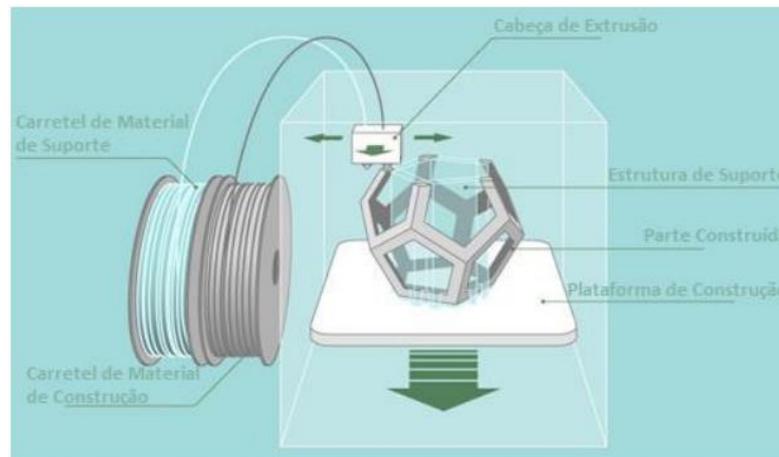


Figura 13: Diagrama do processo de modelagem por fusão e deposição (FDM).
Fonte: Adaptado de Boa Impressão3D (2017).

Por outro lado, os processos de prototipagem a base de líquidos possuem o mesmo princípio de funcionamento, apresentando pequenas peculiaridades entre eles. De acordo com Nascimento (2013), os procedimentos que utilizam como fonte os líquidos, apresentam as seguintes vantagens: boa precisão e bom acabamento superficial, além de serem mundialmente difundidos. Os materiais utilizados na Impressão 3D SLA são resinas fotossensíveis que se solidificam em pontos de exposição com a luz UV.

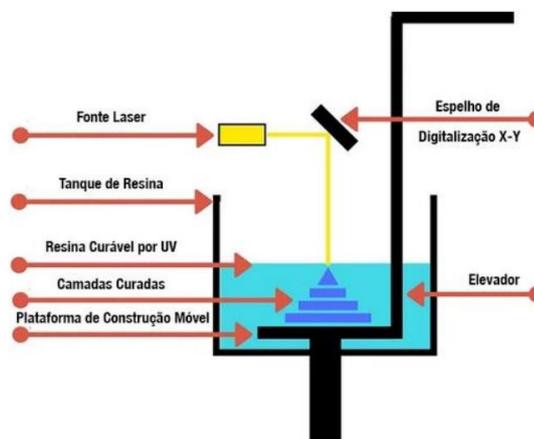


Figura 14: Impressão 3D SLA.
Fonte: ENGIPRINTERS, (2019).

3 METODOLOGIA

3.1 Tipos de Pesquisa

Considera-se a pesquisa científica, segundo Lakatos e Marconi (2007, p. 43) como: “um procedimento formal com método de pensamento reflexivo que requer um tratamento científico e se constitui no caminho para se conhecer a realidade ou para descobrir verdades parciais”.

Para classificar a pesquisa discute-se a abordagem a ser utilizada, o objetivo definido e procedimento para realizar o estudo. Diante disso, em relação à abordagem, existem dois vieses, o qualitativo e o quantitativo. No primeiro caso mantém-se o foco em avaliar os motivos e as explicações de determinadas situações ou acontecimentos, sem valores experimentais ou numéricos. Para Silveira *apud* Minayo (2009, p.33) “a pesquisa qualitativa trabalha com o universo de significados, motivos, aspirações, valores e atitudes, o que corresponde a um espaço mais profundo das relações, dos processos e dos fenômenos que não podem ser reduzidos à operacionalização de variáveis”. Em contrapartida, o viés quantitativo leva em consideração o levantamento de dados numéricos, resultados de experimentos e cálculos matemáticos.

Segundo Gil (2022), quanto ao objetivo, as pesquisas podem ser explicativas, descritivas e exploratórias. A pesquisa explicativa tem como foco identificar os fatores que contribuem ou determinam a ocorrência dos fenômenos, sendo o tipo que mais aprofunda o conhecimento da realidade, devido a explicação e razão das coisas.

Ademais, a pesquisa descritiva visa descrever características de uma certa população ou fenômeno, ou então uma relação entre variáveis. Algumas pesquisas descritivas vão além da simples identificação da existência de relações entre variáveis, e pretendem determinar a natureza dessa relação. Algumas pesquisas descritivas vão além da simples identificação da existência de relações entre variáveis, e pretendem determinar a natureza dessa relação GIL (2022).

Por fim, a pesquisa exploratória tem como propósito proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. Tem-se que o planejamento neste caso é mais flexível para levar em consideração um maior número de aspectos relativos ao fenômeno estudado. Segundo Gil (2022, p.42):

Pode-se afirmar que a maioria das pesquisas realizadas com propósitos acadêmicos, pelo menos num primeiro momento, assume o caráter de pesquisa exploratória, pois nesse momento é pouco provável que o pesquisador tenha uma definição clara do que irá investigar.

Outro fator de classificação da pesquisa é o procedimento, que para Gil (2022), varia entre experimental, bibliográfico e estudo de caso. No caso experimental: “consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.” Já a pesquisa bibliográfica baseia-se em um material já publicado e permite a cobertura mais ampla de fenômenos a serem avaliados do que poderia pesquisar diretamente. Esta forma de pesquisa é mais presentes nas áreas de Direito, Filosofia e Literatura. Finalmente, o estudo de caso foca na explicação de determinada situação ou acontecimento e definir quais são as características específicas.

Diante da explicação anterior, pode-se concluir que o estudo em questão é considerado uma pesquisa quantitativa, baseada em dados e resultados encontrados por simulações em Elementos Finitos. Além disso, é uma pesquisa exploratória, já que objetiva tornar mais explícito o assunto e avaliar as situações mais vantajosas. Por fim, esta também é considerada uma pesquisa experimental, visto que os resultados são obtidos por simulações computacionais e validações experimentais.

3.2 Materiais e Métodos

Para dar início ao estudo, foram realizadas uma revisão bibliográfica mais profunda e uma intensa pesquisa a respeito dos materiais PZT para maior entendimento dos parâmetros e resultados. Ademais, também foi feito um estudo a respeito do funcionamento e dos padrões do *software* ANSYS para que as simulações permitam encontrar resultados reais.

3.2.1 Modelagem do sistema Viga - PZT no Fusion 360

A modelagem foi feita no *software* Fusion 360 Autodesk e as dimensões dos materiais foram obtidas em laboratório devido às necessidades de equipamentos de precisão. A Figura 14 demonstra a montagem do conjunto Viga – PZT. Tal modelagem se fez necessária para transmitir de maneira fidedigna todas as dimensões das pastilhas para o modelo CAD, que permite a execução de análises computacionais. Além disso, os materiais presentes são liga de cobre na lâmina central estrutural e PZT-5H nas pastilhas, no entanto as propriedades destes são apenas aplicadas no ANSYS durante as simulações. As tabelas 3 e 4 organizam os dados de maneira a facilitar a montagem das matrizes utilizadas no *software*.

Tabela 3 - Parâmetros da Pastilha PZT.

PZT - 5H	Unidade	Valor
S_{11}	m ² /N	1,65E-11
S_{12}	m ² /N	-4,78E-12
S_{13}	m ² /N	-8,45E-12
S_{33}	m ² /N	2,07E-11
S_{44}	m ² /N	4,35E-11
S_{66}	m ² /N	4,06E-11
d_{15}	C/N	7,41E-10
d_{31}	C/N	-2,74E-10
d_{33}	C/N	5,93E-10
K_{11}		3,13E+03
K_{33}		3,40E+03
ρ	kg/m ³	7500
ν		0,3

Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

A tabela 3 possui os parâmetros individuais do material PZT-5H que são utilizados para montagem das matrizes após adequação com o *software*.

Tabela 4 - Dimensões.

Chapa		Pastilha	
Comprimento	70 mm	Comprimento	59 mm
Largura	32 mm	Largura	29 mm
Espessura	0,21 mm	Espessura 1	0,205 mm

Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

A tabela 4 possui, de maneira organizada, as dimensões da Viga/Chapa central que serve como estrutura para as pastilhas e, as dimensões da própria pastilha PZT.

A Figura 15 ilustra a montagem com a pastilha PZT sem as fixações e condições de contorno que foram aplicadas na estrutura final, com os materiais separados por cores para facilitar a diferenciação ilustrativa.

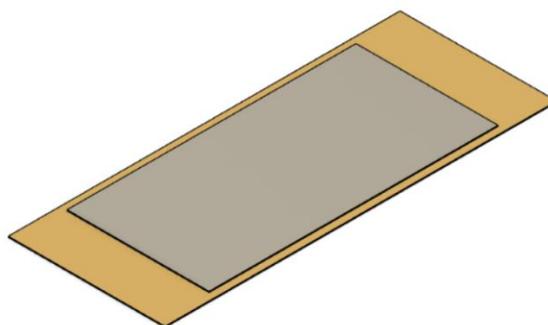


Figura 15: Sistema com PZT.

Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

Para otimizar a geração de tensão elétrica é necessário aumentar a amplitude de vibração da pastilha PZT e, para isso foi desenvolvida uma estrutura fechada para isolar a montagem do ambiente. Nesta estrutura foi desenvolvida uma mola espiral na tampa superior para guiar a movimentação de uma massa aplicada na extremidade oposta ao engaste da viga. A rigidez desse componente é variada com a espessura do fio espiral para assim levar a frequência natural do conjunto ao valor objetivado, que deve ser próxima da frequência natural do conjunto a ser analisado. A estrutura em questão é ilustrada pela figura 16.

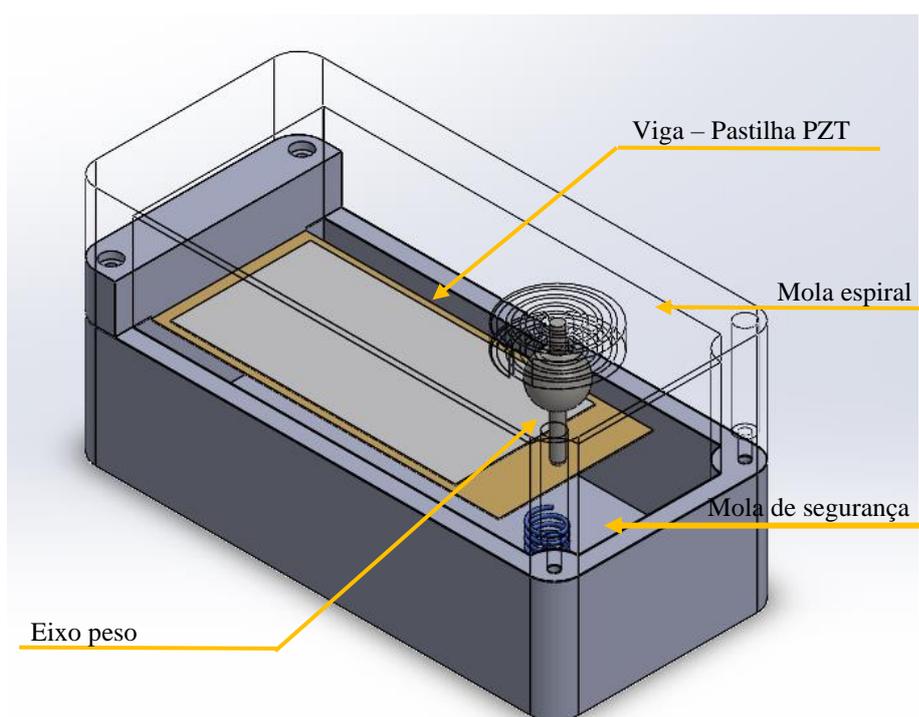


Figura 16: Montagem de capsula com estrutura PZT.
Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

Na figura 16, a estrutura externa é fabricada por impressão 3D pelo método de extrusão de filamento de polímero PETG. A viga que contém a pastilha PZT é fixada por pressão, promovendo a condição de engaste de uma das extremidades. Além disso, para aumentar a amplitude de movimento da extremidade da viga, foi colocado um eixo com volume de 596 mm^3 fixado na mola espiral fabricada na tampa da estrutura, que pode ter o material alterado para variar a massa. Para peso fabricado em Liga de Alumínio, com densidade de $2,77 \text{ g/cm}^3$, a massa alcançada é de $1,43 \text{ g}$ e, para o material aço estrutural, com densidade de $7,85 \text{ g/cm}^3$, a massa alcançada é de $4,68 \text{ g}$. Por fim, foi adicionada uma mola, também de polímero impresso, na parte inferior da capsula para amortecer a viga central em caso de amplitudes elevadas e evita a colisão entre ambas as partes.

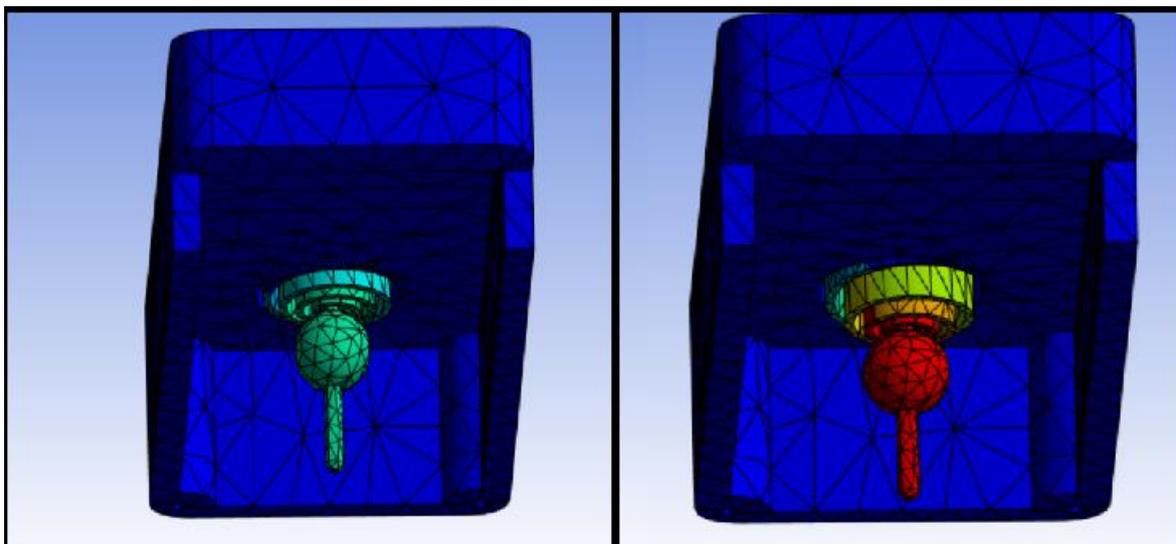


Figura 17: Funcionamento da Mola Espiral

Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

A figura 17 ilustra o funcionamento da mola espiral presente na tampa superior da estrutura que, serve como fixação flexível para o eixo-peso que fica em contato com a extremidade da viga com o objetivo de aumentar a amplitude de vibração.

3.2.2 Preparação do Modelo CAD no ANSYS

Para prosseguir com o estudo é necessário converter o modelo CAD para o formato STEP e importa-lo para o ANSYS e, em seguida inserir as propriedades de cada material que compõe o conjunto. Outra etapa importante é a definição das características desejadas para a malha de elementos, com tamanho de elementos de 0,070686 mm, dez vezes menor que a o menor comprimento da estrutura, chegando ao resultado de 2415 elementos ilustrado nas Figuras 18 e 19.

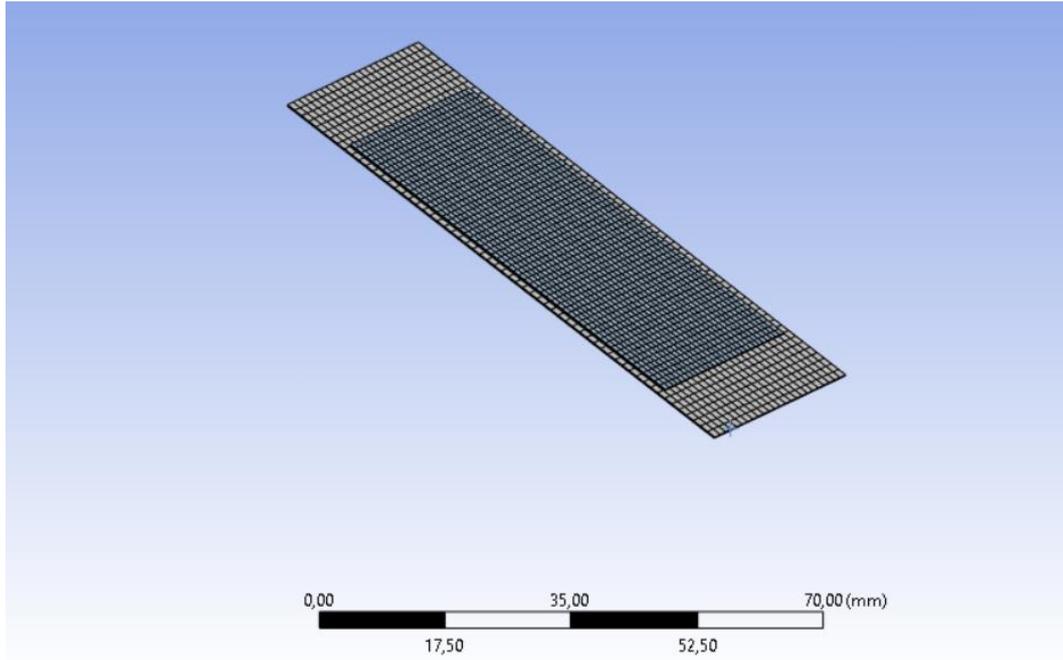


Figura 18: Malha do modelo numérico.

Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

A Figura 18 permite melhor entendimento da distribuição dos elementos e dos nós ao longo da geometria utilizada, o que possibilita as simulações computacionais e as de análises.

Além disso, a estrutura geral do recuperador também deve ser convertida para o formato de malha de elementos finitos para possibilitar a simulação de todo o conjunto de maneira simultânea, o que pode ser observado na figura 19.

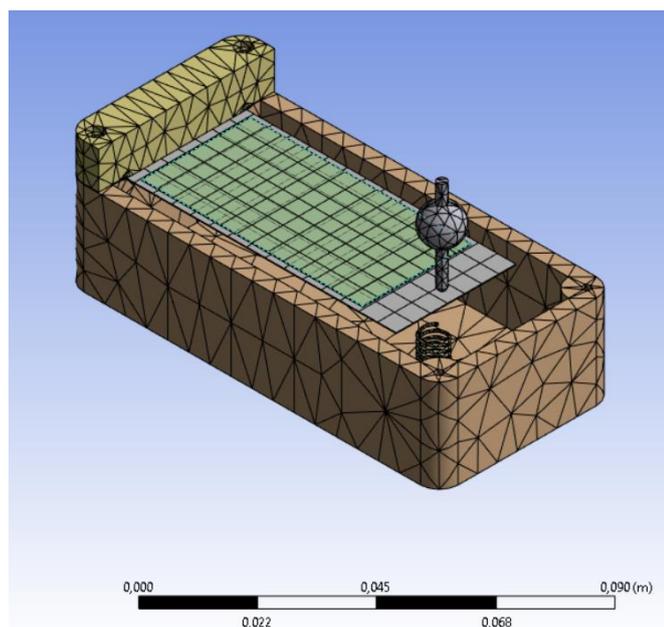


Figura 19: Malha do estrutura.

Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

Na figura 19 a parte inferior completa da estrutura esta com a malha definida de forma grosseira para a fase inicial das simulações e posterior refinamento para obter resultados reais.

3.2.3 Análise Modal

Inicialmente é feita uma análise modal para encontrar as frequências naturais do conjunto para os primeiros 3 modos. A viga é engastada em um suporte de rigidez elevada e, por isso é assumido no software um suporte fixo. Com isso, pode-se observar a influência das rigidezes do conjunto nas frequências naturais encontradas.

Esta análise é fundamental para avaliar a aplicação do equipamento PZT, já que é necessário que o maquinário ou estrutura a ser analisada por este deve vibrar próximo à sua frequência natural para proporcionar o efeito da ressonância na pastilha piezelétrica.

3.2.4 Análise da tensão gerada

Após encontrar os resultados de frequência natural é feita uma simulação com aplicação de uma força de 3N em determinado ponto para encontrar a resposta harmônica do sistema e assim iniciar o estudo de geração de tensão elétrica, como ilustrado na Figura 20. Nesta etapa é possível obter o valor da potência e da tensão total gerada para determinadas frequências de vibração e, assim definir a possibilidade de uso do equipamento para específicas aplicações.

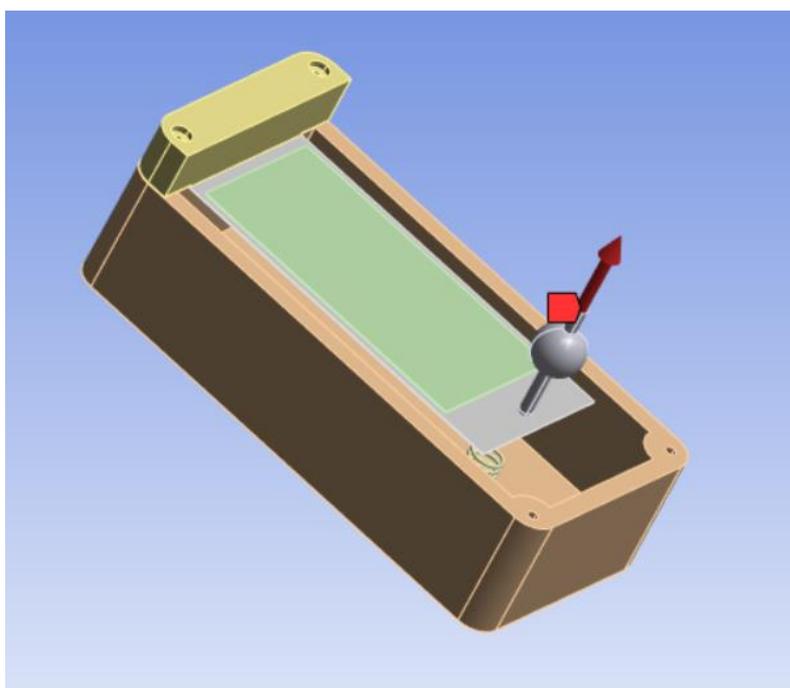


Figura 20 - Força Aplicada
Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

3.2.5 Desenvolvimento e Modelagem da Estrutura Para Impressão 3D

Com todos os dados de projeto em mãos é possível determinar as propriedades desejadas para a estrutura suporte do sistema PZT e também o polímero de fabricação para otimizar a geração de energia elétrica. Assim, é utilizado o Software Fusion 360 para modelagem do equipamento e, posteriormente a montagem final da estrutura.

3.3 Variáveis e Indicadores

De acordo com Lakatos et al (2003, p.137) “variável é um conceito operacional, sendo que a recíproca não é verdadeira: nem todo conceito operacional constitui-se em variável. Para ser definida, a variável precisa conter valores”. Desta forma, as variáveis deste estudo podem ser vistas na Tabela 5, sendo que, cada variável possui seus indicadores, os quais são necessários para análise de cada variável.

Tabela 5 - Variáveis e Indicadores.

Variáveis	Indicadores
	Características estruturais
Pastilha PZT	Características eletrostáticas
	Dimensões
	Geométrica
	Condições de Contorno
Modelo MEF	Características da Malha
Frequência Natural	Amplitude

Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

3.4 Instrumentos de Coletas de Dados

Quanto ao levantamento de dados, Gil (2002, p.104) diz que “pode valer-se da observação, de questionários, de entrevistas e mesmo de registros documentais, quando estes são disponíveis”. Assim, o levantamento de dados será feito por meio de ferramentas de medição, registros documentais e também serão utilizados os softwares ANSYS, Fusion 360 e Excel.

3.5 Tabulação de Dados

A tabulação dos dados será feita utilizando o software ANSYS, no qual será realizada a modelagem e análise dos dados obtidos. Além disso, será utilizado o Autodesk Fusion360 para

elaboração modelo 3D. Também será utilizado o Excel para planilhar os dados obtidos e os parâmetros utilizados e o Word, para descrever e explicar os resultados e documentar todas as conclusões obtidas nas análises

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordados os tipos de pesquisas e definidos em quais este trabalho se enquadra, além de explicitar a metodologia que será utilizada ao longo do trabalho e os softwares que auxiliarão na coleta e tabulação dos dados.

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados obtidos com as análises realizadas no ANSYS e gráficos obtidos, assim será feita uma discussão a respeito do que foi observado e assim, as devidas conclusões.

4 RESULTADOS

4.1 Simulação Modal da Pastilha PZT

Nesta primeira fase de análises modais, foram encontradas as frequências naturais da montagem Viga-Pastilha PZT, sendo considerados os primeiros seis modos de vibração. A primeira frequência natural encontrada foi de 20,161Hz, o que pode ser observado na figura 21.

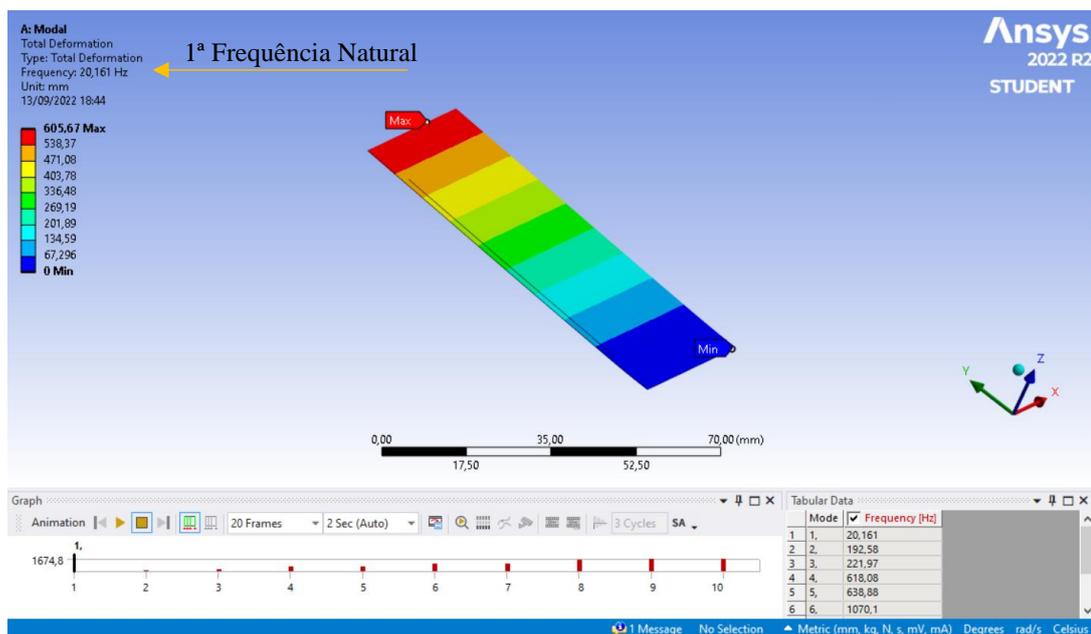


Figura 21: Análise modal da viga.
Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

Na figura 20, pode-se identificar a deformação gerada na viga e os valores das 6 primeiras frequências naturais do conjunto isolado da estrutura.

4.2 Simulação Modal da Estrutura

Para avaliar a possibilidade de ressonância e otimizar a relação entre as características da viga e da capsula, foi realizada uma simulação modal da estrutura de encapsulamento da pastilha para encontrar as frequências naturais e definir o material do eixo para chegar à frequência natural do sistema próxima à da estrutura a ser estudada, o que pode ser observado na figura 22 para o eixo de aço estrutural e na figura 23 para o de alumínio.

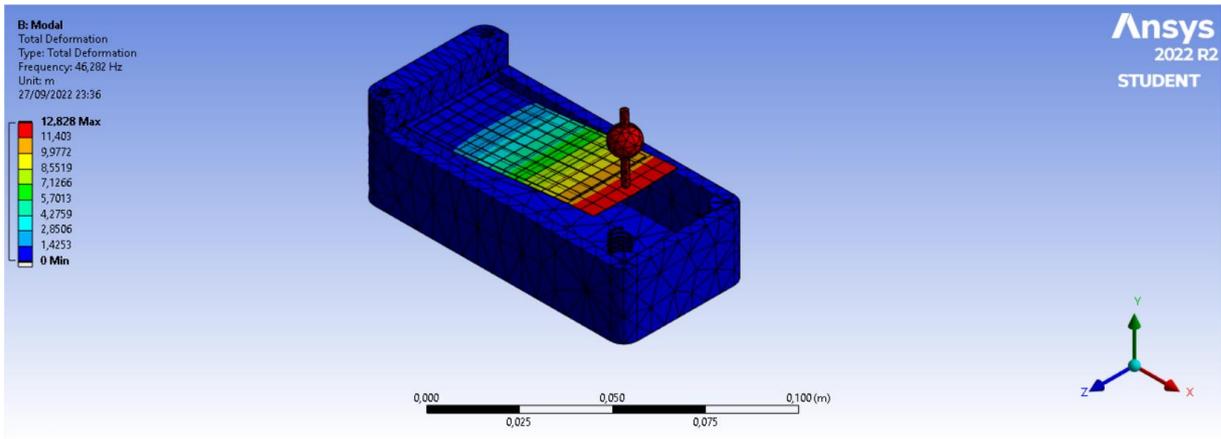


Figura 22: Resultado de análise modal – Aço.
Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

A partir dos resultados ilustrados pela figura 22, pode-se identificar que a primeira frequência natural da estrutura geral para o alumínio, de 46,28 Hz.

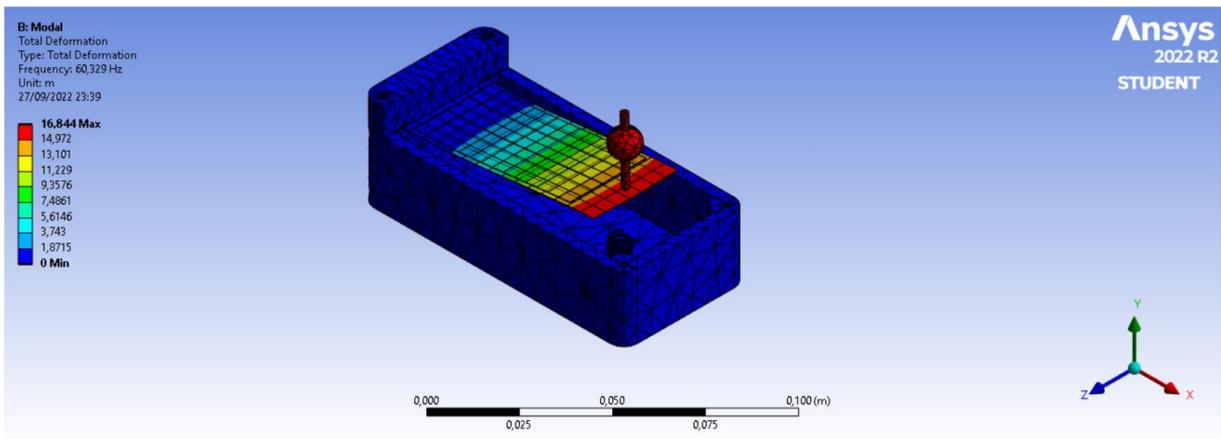


Figura 23: Resultado de análise modal – Alumínio.
Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

Na figura 23, a frequência natural do primeiro modo encontrada foi de 60,33Hz para o eixo de alumínio, o qual é mais viável para utilização em análise de edificações (*Structural Health Monitoring*).

4.3 Análise Harmônica

Na etapa da simulação harmônica, com aplicação de força de 3N no eixo, foi encontrada a resposta em frequência para as duas variáveis estudadas. Para o primeiro caso, com material de aço com massa de 4,68g, o gráfico é ilustrado na Figura 24, em que o primeiro pico de amplitude fica próximo dos 46Hz.

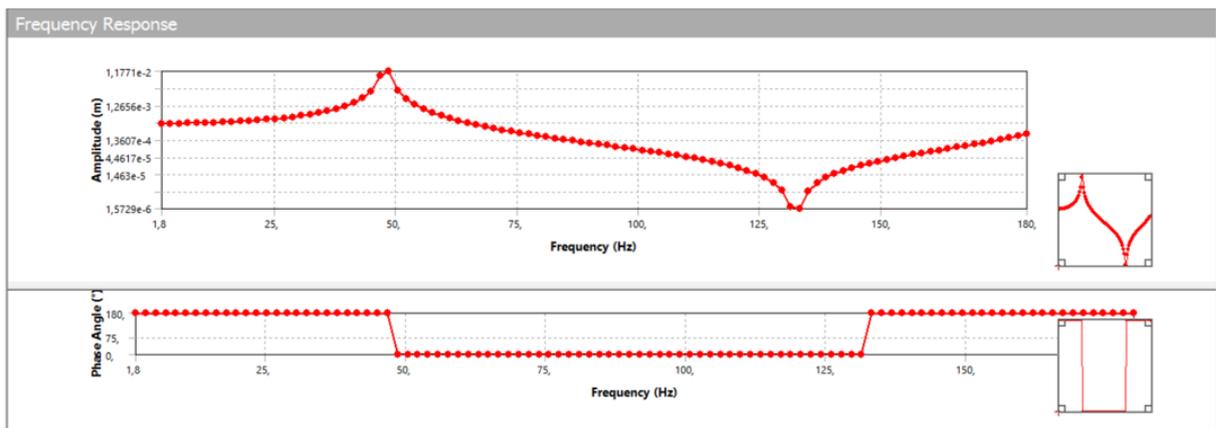


Figura 24: Gráfico de resposta de frequência gerada - Aço.
Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

Por outro lado, no segundo caso, com material de alumínio e massa de 1,43g, o gráfico é ilustrado pela figura 25, em que o primeiro pico de amplitude fica próximo dos 60Hz.

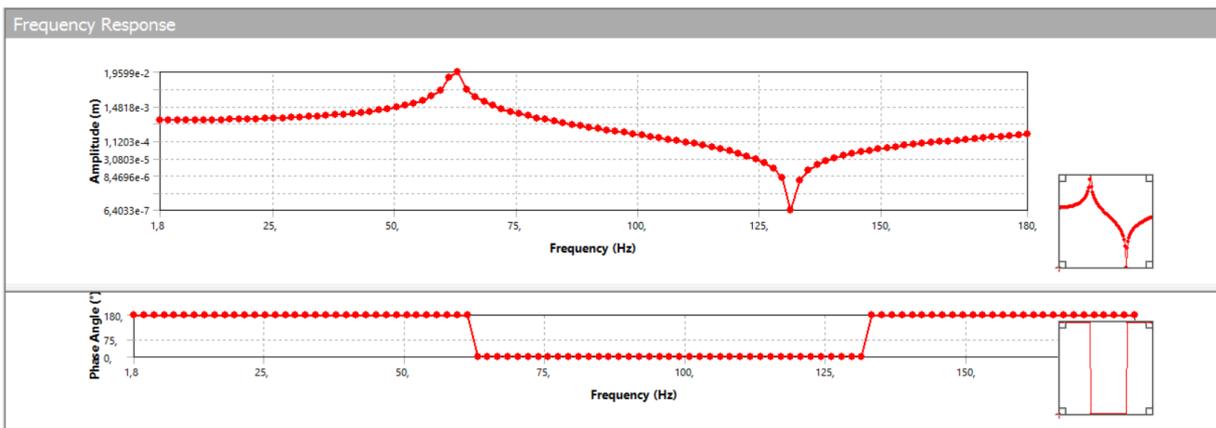


Figura 25: Gráfico de resposta de frequência gerada - Alumínio.
Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

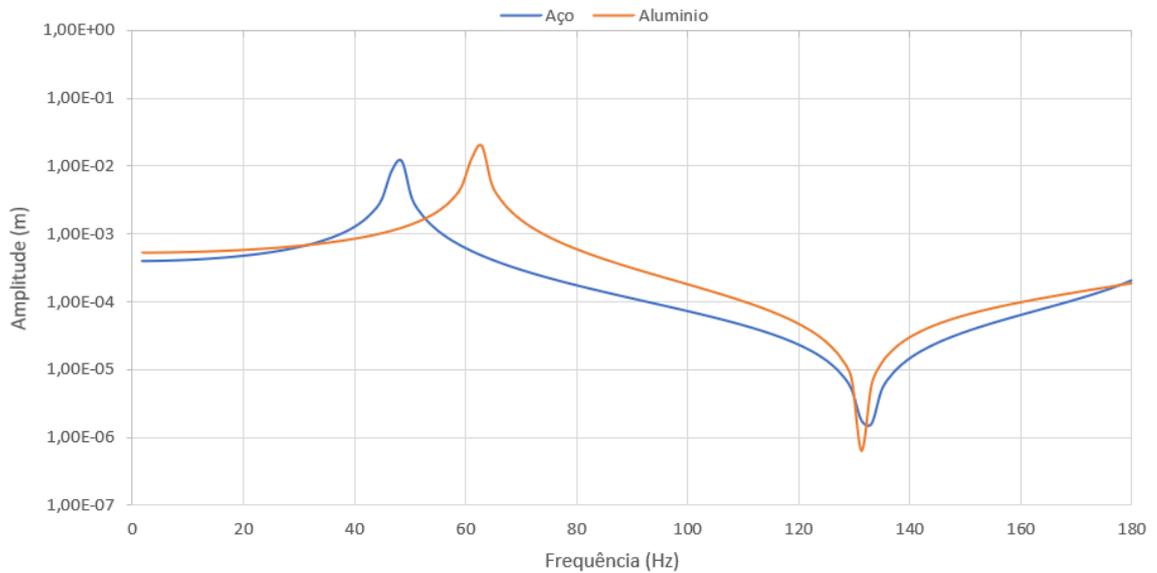


Figura 26: Sobreposição dos Gráficos de Frequência
Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

A figura 26 permite melhor comparação entre os dois gráficos de frequência para analisar as variações na amplitude e na frequência natural em cada caso.

4.4 Análise da Tensão Elétrica Gerada

Nesta terceira fase é feita a análise de tensão elétrica máxima gerada pelo conjunto de pastilhas PZT para estudar a viabilidade de alimentação de sensores disponíveis no mercado. O primeiro caso está ilustrado na figura 27.

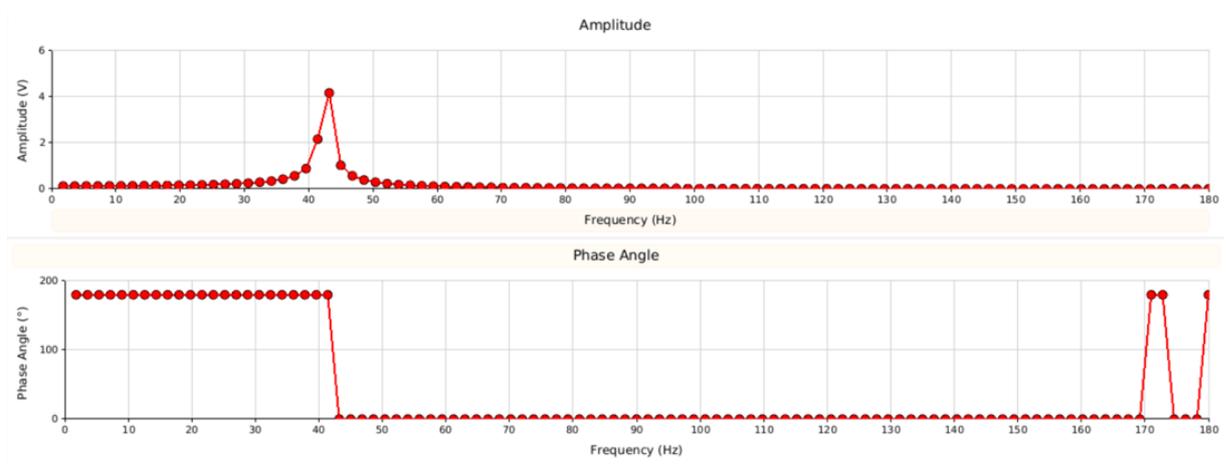


Figura 27: Gráfico de resposta de tensão elétrica gerada - Aço.
Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

Na Figura 27, pode-se observar um pico de tensão de aproximadamente 4V para vibrações próximas de 46Hz, que tem potencial para alimentação da grande maioria dos sensores do mercado que trabalham na faixa de 3V a 5V. Além disso, para o segundo caso o gráfico de tensão está apresentado na figura 28.

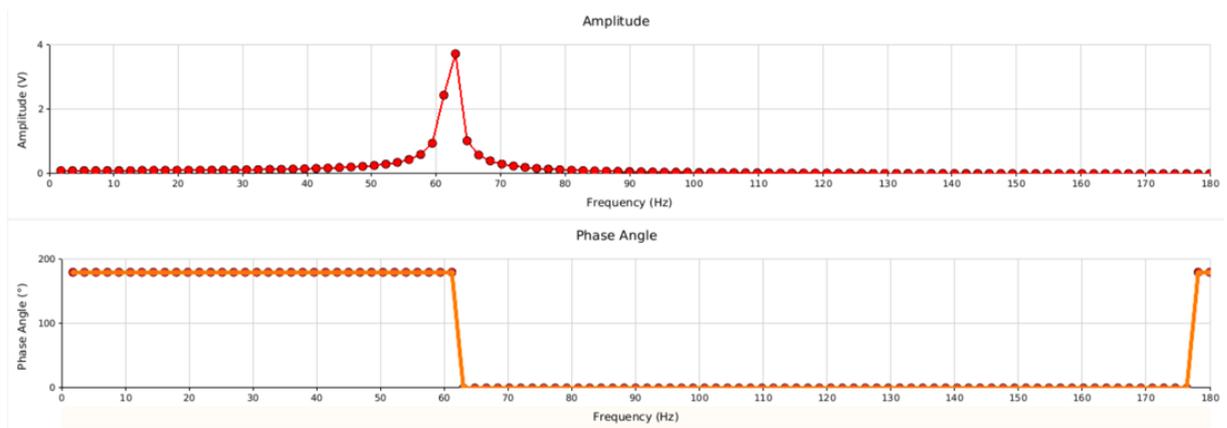


Figura 28: Gráfico de resposta de tensão elétrica gerada - Alumínio.
Fonte: Pesquisa Direta, (2022).

Para o segundo caso também foi possível observar um pico de tensão de 4V em vibrações próximos do seu primeiro modo de frequência natural, de 60Hz. Isto permite que o conjunto PZT também possa alimentar equipamentos de sensoriamento e outros elementos nesta faixa de frequência.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo em elementos finitos para desenvolver uma estrutura em conjunto com elementos piezoelétricos ligados a uma viga com o objetivo de gerar tensão elétrica para alimentar equipamentos e sensores que trabalham em ambientes remotos e de difícil acesso. Concluiu-se que é possível adequar o equipamento para operar em ressonância com variados maquinários variando o material do eixo peso que fica em contato com a viga. Os principais materiais utilizados foram Aço estrutural com densidade de $7,85\text{g/cm}^3$ e liga de Alumínio com densidade de $2,77\text{g/cm}^3$.

O sistema foi modelado com as pastilhas piezoelétricas acopladas mecanicamente à viga e, esta engastada por pressão à estrutura. A malha utilizada inicialmente para realização das análises do método MEF foi refinada e permitiu encontrar resultados coerentes.

A modelagem da estrutura de encapsulamento realizada com materiais de impressão 3D funcionou adequadamente devido à facilidade de materializar elementos complexos com baixo custo de fabricação. Após as simulações, conclui-se que o PETG é o mais adequado para a aplicação baseado na sua capacidade de trabalhar em regiões de temperatura ambiente pouco mais elevada e, também em constante contato com raios solares sem se deformar.

5.1 Trabalhos Futuros

Com o objetivo de aprimorar e validar os resultados obtidos neste trabalho, alguns pontos de melhoria foram identificados, sendo possível, assim, sugerir como propostas de futuros trabalhos:

- Fabricação das estruturas e validação experimental dos resultados em laboratório;
- Investigação do comportamento da corrente elétrica nas faixas de trabalho do equipamento;
- Avaliação de pastilhas de outros materiais piezoelétricos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MINETO, Andreza Tangerino. **Geração de energia através da vibração estrutural de dispositivos piezelétricos não lineares**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ANSYS® *Academic Research, Release 17.2, Help System, Modal Structural Analysis*, ANSYS, Inc. 2021.

Bachmann F, Bergamini AE, Ermanni P. *Optimum piezoelectric patch positioning: A strain energy-based finite element approach. Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2012;23(14):1575-1591.

BEEBY, S. P., TUDOR M. J., et al. *Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. Measurement Science and Technology* 17(12): R175-R195, (2006).

BERNARDO, JOSÉ DANIEL SOARES. **ANÁLISE PREDITIVA DE DEFEITOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS UTILIZANDO A CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO**. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHEN, Po-Shiun. *Analysis and design of a piezoelectric micro-actuator. The University of Texas at Arlington*, 2006.

COTTONE, F; CURIE, M. *Introduction to Vibracion Energy Harvesting. NiPS Energy Harvesting Summer School*, 2011.

DE SIQUEIRA, Isadora Coffani dos Santos et al. **MATERIAIS PIEZELÉTRICOS: UMA ANÁLISE DE SEU POTENCIAL COMO ENERGY HARVESTING**.

EIRAS, J.A. **Apostila de Materiais piezoelétrico. Grupo de Cerâmicas Ferroelétricas**, Departamento de Física. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2004. 34p.

ERTURK, Alper; INMAN, Daniel J. *Piezoelectric energy harvesting*. John Wiley & Sons, 2011.

HOTZA, D. **Prototipagem rápida de pilhas a combustível de óxido sólido**. Matéria (Rio de Janeiro), v.14, n.4, 2009. Disponível em: Acesso em: 06 de nov. 2020.

HUNAIDI, Osama. *Traffic vibrations in buildings. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada*, 2000.

HUTTON, D. V. *Fundamentals of Finite Element Analysis. Higher Education*; 1ed.

KIM, Heung Soo; KIM, Joo-Hyong; KIM, Jaehwan. *A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. International journal of precision engineering and manufacturing*, v. 12, n. 6, p. 1129-1141, 2011.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas. 2003. 310 p.

MASULLO, Yata Anderson Gonzaga. Análise preditiva de ocorrências de incêndios no bioma amazônico do Maranhão. **GeoTextos**, 2018.

MIRLISENNA, Giuseppe. **Método dos Elementos finitos: O que é? ESSS**, 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 01, JULHO e 2022.

MOHANTY, S.; DWIVEDY, S. K. *Nonlinear dynamics of piezoelectric-based active nonlinear vibration absorber using time delay acceleration feedback. Nonlinear Dynamics*, v. 98, n. 2, p. 1465-1490, 2019.

RAO, Singireseu. **Vibrações Mecânicas**. Tradução de Arlete Simille Marques. 2008.

SANTANA, Leonardo et al. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.

Wei, C., & Jing, X. **A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 74, 1-18. 2017.