



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



SAMUEL GOIS CORRADI

**ESTUDO DE UM RECUPERADOR DE ENERGIA BASEADO EM
VIBRAÇÃO COM FREQUÊNCIA NATURAL VARIÁVEL**

OURO PRETO - MG
2022

SAMUEL GOIS CORRADI
samuel.corradi@aluno.ufop.edu.br

**ESTUDO DE UM RECUPERADOR DE ENERGIA BASEADO EM
VIBRAÇÃO COM FREQUÊNCIA NATURAL VARIÁVEL**

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

C823e Corradi, Samuel Gois.

Estudo de um recuperador de energia baseado em vibração com frequência natural variável. [manuscrito] / Samuel Gois Corradi. - 2022. 48 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. Mecânica - Vibração. 2. Ondas ultrassônicas - Elemento Piezoelétrico. 3. Energia - Fontes alternativas. 4. Simulação (Computadores). 5. Método dos elementos finitos. 6. Conversores de frequência. 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

Samuel Gois Corradi

Estudo de um recuperador de energia baseado em vibração com frequência natural variável

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. Edson Alves Figueira Júnior - (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 17/10/2022



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Paulinelli Guimaraes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/10/2022, às 07:54, 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 **0412743** e o código CRC **B6351D2A**.

À minha família, Duda, amigos e professores, dedico mais esta etapa vencida.

AGRADECIMENTO

À Deus, agradeço a oportunidade de concluir essa caminhada com saúde.

Aos meus pais, Ana e Luiz, agradeço por todo apoio incondicional durante toda essa jornada, tornando com que fosse possível chegar até aqui, OBRIGADO! Às minhas irmãs, Luiza e Lorena, agradeço por servirem de exemplo, e por estarem sempre ao meu lado.

À minha companheira, Duda, por estar ao meu lado durante toda essa caminhada, pelo amor, carinho e suporte ilimitado por todos esses anos.

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

Aos amigos que Ouro Preto me proporcionou, em especial, Carlos, Caiaffa, Guilherme, Luiz, Rodrigo, Tadeu, Túlio, e Uriel agradeço pela convivência e irmandade durante esse ciclo.

Aos irmãos de apartamento Mateus Gois e Bernardo, por todas as experiências compartilhadas.

À Embraer e aos colegas de trabalho, agradeço pela oportunidade e aprendizado.

“If you want to find the secrets of the universe, think in terms of energy, frequency and vibration.”

Nikola Tesla

RESUMO

Com o avanço da demanda energética de modo global, a busca por fontes de energia sustentáveis tem ganhado, a cada dia, mais força. Sensores de monitoramento de estruturas, muitas vezes apresentam uma elevada dificuldade no abastecimento energético devido à constante necessidade de substituição das fontes de energia, por não serem, em sua grande parte, auto recarregáveis. O presente trabalho utiliza a metodologia de simulação mecânica em *software* de Engenharia pelo método dos elementos finitos para aquisição de dados modais e harmônicos de dois sistemas de recuperação de energia baseado em vibração com frequência natural variável, com suas respectivas cinco variações de massa e rigidez, através de um elemento piezoelétrico do tipo PZT-5A. Os resultados obtidos, de forma experimental, evidenciaram que o modo de variação da frequência natural tem influência direta nos coeficientes de energia recuperados, bem como o fato de os maiores valores absolutos estarem ligados aos modos de vibração naturais dos modelos desenvolvidos.

Palavras-chave: Energia. Simulação. Elementos Finitos. Vibração. Frequência. Elemento piezoelétrico.

ABSTRACT

As the global demand for energy increases, the search for sustainable energy sources is growing stronger every day. Sensors for structure monitoring often have a very difficult energy supply due to the constant need of replacing power sources, as most of them are not self-rechargeable. The present work uses the methodology of mechanical simulation in Engineering software by the finite elements method to acquire modal and harmonic data of two energy recovery systems based on vibration with variable natural frequency, with their respective five variations of mass and stiffness, through a piezoelectric element type PZT-5A. The experimental results obtained showed that the natural frequency variation mode has a direct influence on the recovered energy coefficients, as well as the fact that the largest absolute values are linked to the natural vibration modes of the developed models.

Key-words: Energy. Simulation. Finite Elements. Vibration. Frequency. Piezoelectric element.

LISTA DE SIMBOLOS

m	Massa (kg)
k	Rigidez (N/m)
Q	Qualidade do sistema
ϕ	Amplitude (m)
ω	Frequência de vibração (Hz)
ω_r	Frequência de Ressonância (Hz)
ω_n	Frequência natural (Hz)
M	Matriz global de massa
K	Matriz global de rigidez
C	Matriz global de amortecimento
$f(t)$	Força externa aplicada (N)
x	Deslocamento (m)
\dot{x} ponto	Velocidade (m/s)
\ddot{x} dois pontos	Aceleração (m/s ²)
σ_j	Tensão mecânica (Pa)
S_j	Deformação mecânica (m)
c_{ij}	Coefficiente de rigidez elástica
s_{ij}	Coefficiente de conformidade elástica
ϵ_{ij}	Permissividade
d_{ij} e e_{ij}	Coefficientes piezoelétricos
V	Tensão elétrica (V)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rigidez Equivalente	6
Figura 2 - Viga em Balanço.....	9
Figura 3 – Processo de recuperação de energia	10
Figura 4 – Diagramas esquemáticos do efeito piezoelétrico	10
Figura 5 - Fluxo de energia de um gerador piezoelétrico	11
Figura 6 - Fluxograma de trabalho	16
Figura 7 - Elemento de material Piezoelétrico	18
Figura 8 - Sistema de massa variável	18
Figura 9 - Sistema de rigidez variável	19
Figura 10 - Massa de posição variável	20
Figura 11 - Localização do engaste fixo.....	21
Figura 12 - Ponto de Aplicação da Força nos modelos de massa variável.....	21
Figura 13 - Ponto de Aplicação da Força nos modelos de rigidez variável	22
Figura 15- Segundo modo de vibração (sistema de uma massa).....	26
Figura 14 -Primeiro modo de vibração (sistema de uma massa).....	26
Figura 16 - Espectros dos sistemas com rigidez variada	27
Figura 17 - Espectros dos sistemas com massa variável	28
Figura 18 - Tensão recuperada em sistemas de massa variável	29
Figura 19 - Tensão recuperada em sistemas de rigidez variável	30
Figura 20 - Gráficos comparativos nas frequências naturais.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modos de Vibração	13
Tabela 2 - Dimensões Elemento PZT	17
Tabela 3 - Dados dos sistemas de massa variada	19
Tabela 4 - Dados dos sistemas de rigidez variada	20
Tabela 5 - Tabela de Variáveis e Indicadores.....	23
Tabela 6 - Modos de vibração modelos de massa variável	25
Tabela 7- Modos de vibração modelos de rigidez variável	25

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	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Sistema de Recuperação de Energia Vibratória	5
2.2	Sistemas discretos e contínuos	7
2.3	A Recuperação de Energia	8
2.4	Geradores Piezoelétricos	10
2.5	Elementos Finitos	14
3	METODOLOGIA.....	15
3.1	Tipos de Pesquisa	15
3.2	Materiais e Métodos	16
3.2.1	Revisão Bibliográfica	17
3.2.2	Modelagem de dois sistemas em CAD 3D.....	17
3.2.3	Análises Modal e Harmônica dos sistemas	21
3.2.4	Comparação dos sistemas.....	22
3.2.5	Conclusão de modelo mais eficiente	22
3.3	Variáveis e Indicadores	23
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	23
3.5	Tabulação de Dados.....	24
3.6	Considerações Finais	24
4	RESULTADOS	25
4.1	Análises Modal e Harmônica dos Sistemas.....	25
4.2	Comparação entre os sistemas	28
4.2.1	Sistema com massa variável.....	28
4.2.2	Sistema com rigidez variável.....	29
4.3	Pares de modelos com mesma frequência natural	30

5	CONCLUSÃO.....	32
5.1	Conclusões.....	32
5.2	Recomendações	32
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	33

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Beeby *et al* (2006) aponta que a recuperação de energia baseada em vibrações é um tema cada vez mais investigado e desenvolvido, e muito disso se dá a crescente necessidade mundial por fontes limpas de energia elétrica. Entretanto, quando o foco é equipamentos e sistemas mecânicos industriais, um problema ganha destaque: a baixa quantidade de energia envolvida. O autor ressalta que a potência recuperada em sistemas mecânicos é da ordem de μW a mW .

Rathbone (1939) estabeleceu o que são consideradas a base das modernas medições de vibração industrial, onde desenvolveu um método para avaliação da condição de equipamentos industriais com base na velocidade de vibração variando de aproximadamente 1 Hz a 120 Hz, relacionando as amplitudes de vibração e o estado das máquinas.

De acordo com Rao (2008), qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração, e que em geral, um sistema vibratório inclui um meio para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor).

Segundo Costa (2013), a análise de vibração mecânica é, basicamente, um estudo do comportamento vibratório da máquina com foco na manutenção. Os dados são adquiridos através de aceleração, velocidade e sensores de deslocamento, e processados por um equipamento de monitoramento (RATHBONE, 2019).

Beeby *et al* (2006) afirma que a recuperação de energia cinética requer um mecanismo de transdução para gerar energia elétrica a partir do movimento, e o projeto do sistema mecânico deve maximizar o acoplamento entre a fonte de energia cinética e o mecanismo de transdução, e seu dimensionamento dependerá inteiramente das características do movimento natural. Com isso, o autor afirma que a energia vibracional é uma das mais adequadas quando se trata de geradores de inércia com o componente mecânico acoplado a uma moldura inercial, que funciona como referência fixa.

De acordo com Challa *et al* (2008), uma necessidade para que os dispositivos de recuperação de energia sejam comercialmente viáveis, é que tenham a possibilidade de operar em uma ampla faixa de frequência. Segundo o autor, isso permite que a frequência do dispositivo corresponda à frequência da fonte, gerando o fenômeno de ressonância para

obtenção da máxima saída de energia em uma faixa específica. Essa característica é de suma importância, tendo em vista que a vibração ambiental, em particular a frequência, sofre alterações com o passar do tempo.

Segundo Mohanty (2019) um dos principais geradores utilizados para recuperação de energia vibratória, são os elementos piezoelétricos. O autor também afirma que os materiais piezoelétricos estão disponíveis em muitas formas, incluindo cristal simples, por exemplo, quartzo, piezocerâmica, por exemplo, zirconato de chumbo titanato ou PZT, película fina, por exemplo, óxido de zinco salpicado, telas à base de filmes espessos imprimíveis sobre pós piezocerâmicos e materiais poliméricos.

Dessa maneira, algumas áreas de aplicação se destacam, e as principais são as de rede de sensores sem fio, além dos sistemas de monitoramento de estruturas, por apresentarem baixa demanda energética.

Com isso, é apresentada a seguinte pergunta problema que motiva o desenvolvimento deste trabalho:

Qual a influência da variação de massa e rigidez na geração de tensão elétrica em um recuperador de energia piezoelétrico baseado em vibração?

1.2 Justificativa

Nos dias atuais, segundo Mohanty (2019), a utilização de fontes móveis de energia é essencial. Ele também afirma que, entre as fontes disponíveis, uma das mais eficientes é a de vibração, uma vez que não depende de elementos externos inconstantes, como é o caso da luz solar ou de elevados gradientes de temperatura.

Dispositivos auto geradores de energia, de acordo com Challa *et al* (2008), possuem grande aplicabilidade em situações aonde a substituição de fontes energéticas, como as baterias, é muito limitada. Além disso, o autor expõe que a baixa necessidade de manutenção, bem como a possibilidade de instalação em ambientes de difícil acesso, tornam a fonte estudada no presente trabalho, ainda mais atraente para alimentação de sistemas remotos.

Cálculos teóricos realizados por Priya (2007) embasam a escolha do tipo de elemento transdutor, uma vez que o autor demonstrou que a densidade de energia recuperada pelos

dispositivos piezoelétricos chega a ser de 3 a 5 vezes superior aos dispositivos eletroestáticos e eletromagnéticos.

Um recuperador de energia que possua a frequência natural variável, possibilita a abrangência de estruturas complexas, como estádios de futebol, ou mesmo pontes de transporte veicular como foco de estudo, possibilitando uma aproximação da frequência do mecanismo à frequência natural do ambiente. Estruturas complexas dependem de muitos fatores, como a quantidades de pessoas e fatores ambientais, para fornecer as frequências naturais específicas em um determinado período de tempo, e um sistema de recuperação que possua frequência adaptável, mostra-se interessante.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar o estudo de um sistema de recuperação de energia de vibração, baseado em frequência natural variável, utilizando elemento piezoelétrico.

1.3.2 Específicos

- Estabelecer uma metodologia para variação de frequência natural em sistemas mecânicos
- Elaborar um procedimento metodológico para desenvolver a modelagem do sistema
- Desenvolver projeto mecânico em CAD e análise numérica através do método dos elementos finitos
- Realizar análises comparativas entre os modelos desenvolvidos

1.4 Estrutura do Trabalho

A presente monografia é composta por 5 Capítulos e suas respectivas subdivisões. No Capítulo 1, foi abordado o problema a ser estudado, assim como a justificativa para tal estudo e seus objetivos geral e específicos.

No Capítulo 2 realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o tema, no qual definiu-se conceitos-chave sobre o assunto, importantes para o prosseguimento da monografia. Já no Capítulo 3 abordou-se a metodologia utilizada.

No quarto capítulo, descreveu-se e discutiu-se os resultados obtidos a partir das proposições do capítulo anterior. No quinto capítulo concluiu-se o trabalho, baseando-se nos resultados e suas discussões apresentadas anteriormente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico da recuperação de energia baseada em vibração e componentes relevantes para o estudo do sistema de variação da frequência natural.

2.1 Sistema de Recuperação de Energia Vibratória

Priya (2017) afirma que um sistema simples de recuperação de energia vibratória pode ser modelado como um sistema de segunda ordem, de massa e mola, e as características do recuperador podem ser descritas pela constante de amortecimento e frequência natural do sistema. O autor também destaca que um sistema estrutural que se estende horizontalmente e é engastado em apenas uma extremidade pode ser simplificado a um sistema de massa mola, e descrito através da equação 1:

$$m \cdot \frac{d^2z(t)}{dt^2} + b \cdot \frac{dz(t)}{dt} + k \cdot z(t) = -m \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} \quad (1)$$

Onde m , k , b , e t são massa, rigidez, largura, e tempo, respectivamente. Já $z(t)$ e $y(t)$ são funções de t . A equação 1 pode ser transformada usando a transformada de *Laplace*, resultando na equação 2,

$$m \cdot s^2z(s) + b \cdot s \cdot z(s) + k \cdot s \cdot z(s) = -m \cdot a(s) \quad (2)$$

Onde, $a(s)$ é a transformada de *Laplace* da aceleração $a(t)$, dada pela equação 3

$$a(t) = \frac{d^2y(t)}{dt^2} \quad (3)$$

Portanto, a função de transferência do recuperador de energia pode ser expressa como na equação 4.

$$\frac{z(s)}{a(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} = \frac{1}{s^2 + \omega r Qs + \omega r^2} \quad (4)$$

Onde $Q = \sqrt{km}/b$ é fator de qualidade do sistema e ωr é frequência de ressonância do recuperador. A frequência natural do sistema de massa-mola pode ser dada pela equação 5

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (5)$$

K e M são a rigidez transversal e massa, respectivamente. A rigidez K pode ser calculada a partir das condições de carregamento, representado na figura 1.

Molas equivalentes



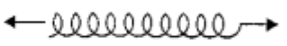


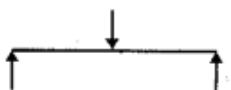
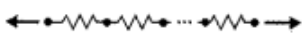
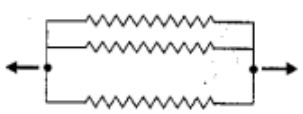
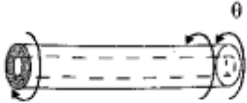
	Barra sob carga axial (l = comprimento, A = área da seção transversal)	$k_{eq} = \frac{EA}{l}$
	Barra cônica sob carga axial (D, d = diâmetros das extremidades)	$k_{eq} = \frac{\pi EDd}{4l}$
	Mola helicoidal sob carga axial (d = diâmetro do arame, D = diâmetro médio do enrolamento, n = número de espiras ativas)	$k_{eq} = \frac{Gd^4}{8nD^3}$
	Viga fixa-fixa com carga no meio	$k_{eq} = \frac{192EI}{l^3}$
	Viga em balanço com carga na extremidade	$k_{eq} = \frac{3EI}{l^3}$
	Viga simplesmente apoiada com carga no meio	$k_{eq} = \frac{48EI}{l^3}$
	Molas em série	$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$
	Molas em paralelo	$k_{eq} = k + k + \dots + k_n$
	Eixo oco sob torção (l = comprimento, D = diâmetro externo, d = diâmetro interno)	$k_{eq} = \frac{\pi G}{k} (D^4 - d^4)$

Figura 1 - Rigidez Equivalente
Fonte: Rao, 2008

A equação geral de movimento de uma estrutura é dada pela equação 6.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t) \quad (6)$$

Onde M é a matriz global de massa, C a matriz global de amortecimento, K a matriz global de rigidez, x o deslocamento e f(t) são as forças externas aplicadas. Desconsiderando o amortecimento da estrutura e considerando a estrutura livre de forças externas, por simplificação, a equação de movimento é reescrita como em equação 7.

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (7)$$

Assumindo que os deslocamentos são descritos por funções harmônicas, reescreve-se os deslocamentos e as acelerações nas equações 8 e 9.

$$x = \phi \sin(\omega t) \quad (8)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 \phi \sin(\omega t) \quad (9)$$

Sendo ϕ a amplitude, e ω a frequência de vibração. Pode-se, então, chegar à equação do problema de autovalores, equação 10.

$$(K - \omega_i^2 M)\phi_i = 0 \quad (10)$$

Para que este problema tenha soluções não-triviais, o determinante da expressão entre parênteses deve ser nulo, como dado pela equação 11.

$$\det(K - \omega_i^2 M) = 0 \quad (11)$$

Logo, para encontrar a resposta modal caracterizada por ω e ϕ , deve-se obter as matrizes da rigidez e massa da estrutura.

2.2 Sistemas discretos e contínuos

De acordo com Rao (2008), o número mínimo de coordenadas independentes requeridas para determinar completamente as posições de todas as partes de um sistema a qualquer instante define o grau de liberdade do sistema.

As coordenadas necessárias para descrever o movimento de um sistema constituem um conjunto de coordenadas generalizadas. As coordenadas generalizadas normalmente são denotadas por q_1, q_2, \dots, q_n , e podem representar coordenadas cartesianas ou não cartesianas (RAO, 2008).

Uma grande quantidade de sistemas práticos pode ser descrita usando um número finito de graus de liberdade. Alguns sistemas, em especial os que envolvem elementos elásticos contínuos, tem um número infinito de graus de liberdade. A viga em balanço mostrada na figura 2 possui um número infinito de pontos de massa e, portanto, um número infinito de coordenadas para especificar sua configuração defletida. O número infinito de coordenadas define sua curva de deflexão elástica. Assim, a viga em balanço tem um número infinito de GDL (RAO, 2008).

Para Varanis (2008, p.35):

Sistemas discretos são sistemas que possuem um número finito de graus de liberdade, tem suas propriedades físicas concentradas e são modelados por equações diferenciais ordinárias. Sistemas contínuos são sistemas que possuem um número infinito de graus de liberdade, suas propriedades físicas estão dispostas ao longo da massa e são modelados por equações diferenciais parciais.

A forma mais simplificada de lidar com sistemas contínuos, trata-se da aproximação como um sistema discreto, aonde a precisão da solução é proporcional à quantidade de GDL utilizados. A recuperação de energia refere-se à geração de energia a partir de fontes como temperatura ambiente, vibração, fluxo de ar, energia solar e energia eólica.

2.3 A Recuperação de Energia

Segundo Khalid (2015), conversão da energia disponível do ambiente permite um fornecimento de energia para dispositivos de Sistemas Micro eletromecânicos (MEMS). O autor também afirma que a coleta de energia requer um mecanismo de transdução para gerar energia elétrica a partir do movimento e o gerador exigirá um sistema mecânico que associe os deslocamentos ambientais ao mecanismo de transdução. Ele completa, afirmando que o projeto do sistema mecânico deve maximizar o acoplamento entre a fonte de energia e o mecanismo de transdução e dependerá inteiramente das características do movimento ambiental.

Khalid (2015) afirma que o próprio mecanismo de transdução pode gerar eletricidade, explorando a deformação mecânica ou o deslocamento relativo que ocorre dentro do sistema.

O efeito de deformação utiliza a deformação dentro do sistema mecânico e normalmente emprega materiais piezoelétricos enquanto que em caso de deslocamento relativo, ou a velocidade ou posição pode ser acoplada a um mecanismo de transdução, sendo que a velocidade está principalmente associada à transdução eletromagnética, enquanto a posição relativa está associada à transdução eletrostática (KHALID, 2015).

Os dispositivos de recuperação de energia mais utilizados, segundo Challa *et al* (2008), são os eletromagnéticos, eletrostáticos e piezoelétricos, e possibilitam o aproveitamento da energia disponível no meio que muitas vezes não é aproveitada, como exemplificado pelo movimento da viga em balanço na figura 2.

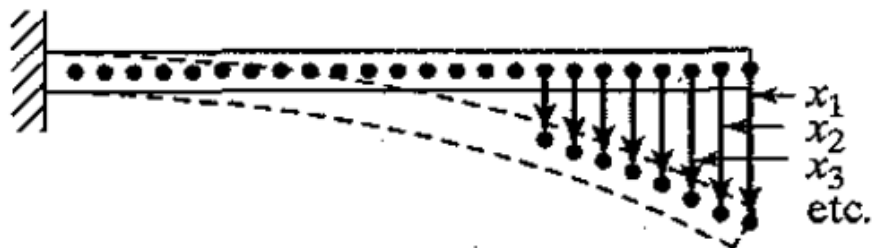


Figura 2 -
Viga em
Balanço

Fonte: RAO, 2008

Para Khalid (2015), o gerador eletromagnético é um elemento recuperador de energia que transforma energia mecânica em energia elétrica, utilizando os princípios interconectados de magnetismo e eletricidade. O mesmo autor, afirma que o processo pelo qual um gerador eletromagnético produz corrente ou eletricidade é conhecida como indução eletromagnética, o que basicamente significa que uma corrente elétrica é induzida dentro de um condutor através do uso de um ímã.

Além de modelos simples já existentes atualmente, uma nova forma de recuperação de energia foi proposta para obter maior saída de energia a partir de vibrações, usando geração de energia eletromagnética, mas Roundy (2005), demonstrou que a técnica piezoelétrica é a maneira mais eficiente de colher energia proveniente da vibração.

2.4 Geradores Piezoelétricos

Segundo Khalid (2015) materiais piezoelétricos podem se polarizar eletricamente ou sofrer uma mudança na polarização quando submetidos a uma deformação, como mostrado na figura 3, porque a leve mudança na dimensão de um material piezoelétrico resulta na variação do comprimento das ligações entre cátions e ânions causados por estresse.



Figura 3 – Processo de recuperação de energia
Fonte: Adaptado de Khalid (2015)

Por outro lado, um material piezoelétrico terá uma mudança quando é exposto a um campo elétrico, o conhecido mecanismo inverso chamado de eletro estrição, explicitado na figura 4. Esses dispositivos que utilizam o efeito piezoelétrico para converter deformações mecânicas em eletricidade são chamados geradores piezoelétricos (KHALID, 2015).

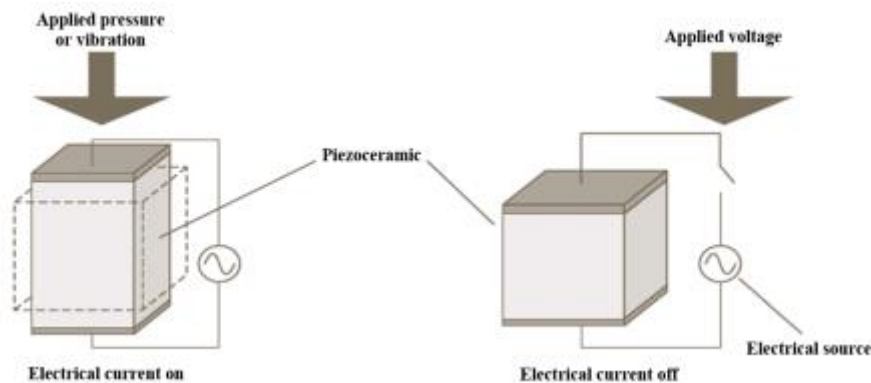


Figura 4 – Diagramas esquemáticos do efeito piezoelétrico
Fonte: (Khalid, 2015)

Segundo Mohanty (2019) tal efeito é encontrado tanto nos materiais naturais quanto nos artificiais, mas a maioria dos materiais piezoelétricos são frágeis na natureza e estão disponíveis em quatro tipos: cristais simples, cerâmicas, polímeros e películas finas.

O princípio geral para a conversão da deformação mecânica de baixa frequência em energia elétrica utilizando um transdutor piezoelétrico é mostrado esquematicamente na figura 5.

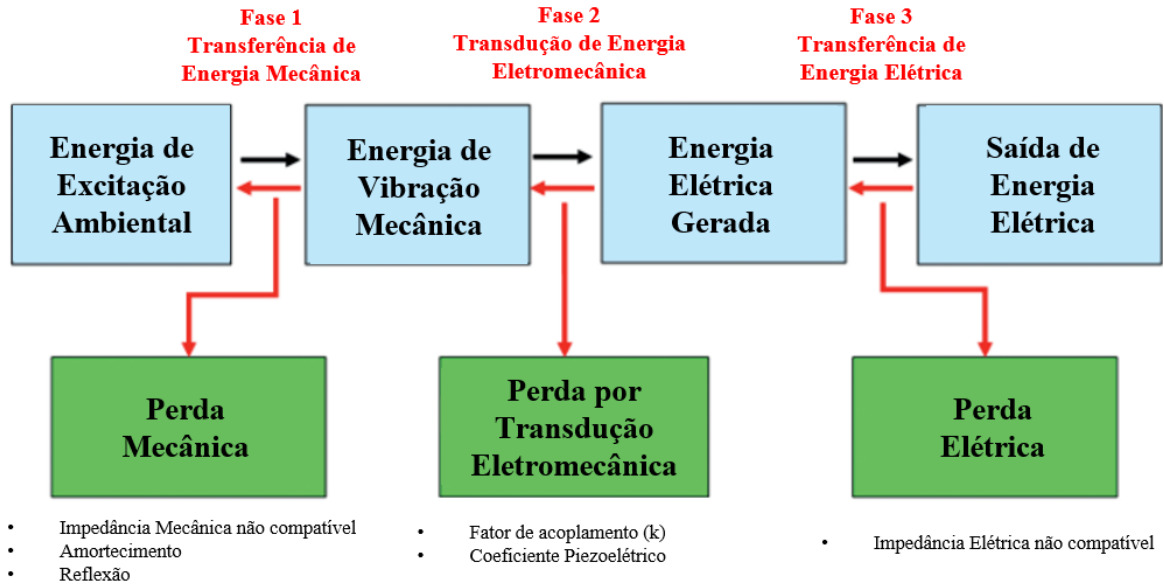


Figura 5 - Fluxo de energia de um gerador piezoelétrico
Fonte: Adaptado de KIM (2007)

Priya (2017) descreve que a piezoelectricidade é a propriedade de certos cristais para gerar um potencial elétrico em resposta ao estresse mecânico aplicado, e que existem dois tipos diferentes de fenômenos comumente observados que são denominados como diretos e os efeitos piezoelétricos inversos. Quando a deformação mecânica é aplicada a um material piezoelétrico, uma carga elétrica proporcional à tensão aplicada é produzida. Isto se refere ao efeito piezoelétrico direto. Inversamente, quando o campo elétrico é aplicado ao mesmo material, a tensão ou deslocamento é produzida proporcional à magnitude do campo elétrico, chamado como efeito piezoelétrico inverso. As equações 12 e 13 a seguir são usados para descrever o efeito piezoelétrico (PRIYA, 2017).

$$D_i = d_{ij}\sigma_j + \varepsilon_{ii}^T E_i \text{ ou } D_i = e_{ij}S_j + \varepsilon_{ii}^S E_i \quad (12)$$

$$S_j = s_{ij}^E \sigma_j + d_{ij} E_i \text{ ou } T_j = c_{ij}^E S_j + e_{ij} E_i \quad (13)$$


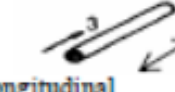
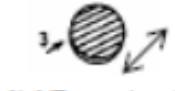

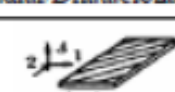
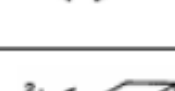

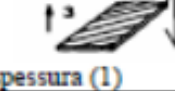
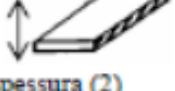

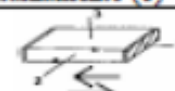
D_i é o deslocamento elétrico, S_j é a deformação mecânica, σ_j é a tensão mecânica, E_i é o campo elétrico, c_{ij} é o coeficiente de rigidez elástica, s_{ij} é o coeficiente de conformidade elástica, e ϵ_{ij} é a permissividade. O sobrescrito utilizado na equação mostra o parâmetro constante utilizado, e d_{ij} e e_{ij} são coeficientes piezoelétricos que são tensores de terceiro escalão (PRIYA, 2017).

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 e outras condições atmosféricas devido a serem quimicamente inertes;

Na tabela 1 é possível observar algumas geometrias utilizadas para se obter as propriedades piezoelétricas, bem como a direção de vibração, as condições de contorno e as constantes obtidas (EIRAS, s.d.).

Tabela 1 - Modos de Vibração

	Geometria do ressonador	Condição de contorno		Fator de Acoplamento (k^2)	Constante Elástica
		Elástica	Elétrica		
1 (T)	 Transversal	$T_1 = T_3 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial x_2} = 0$	$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \epsilon_{33}^T}$	$\frac{1}{s_{11}^E}$
2 (L)	 Longitudinal	$T_1 = T_2 \approx 0$	$\frac{\partial D_3}{\partial x_2} = 0$	$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E \epsilon_{33}^T}$	$\frac{1}{s_{33}^D}$
3 (T)	 Radial/Extensional	$T_3 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial r} = 0$	$k_p^2 = \frac{2}{(1-\sigma)} \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \epsilon_{33}^T}$ (a)	c_{ef}^E (b)
4 (T)	 Radial/Dilatacional	$S_3 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial r} = 0$	$k_p^2 = \frac{2}{(1+\sigma')} \frac{e_{31}^2}{c_{11}^E \epsilon_{33}^T}$ (c)	c_{11}^E
5 (T)	 Espessura (1)	$S_2 \approx 0$ $T_3 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial x_1} = 0$	$k_{31}^2 = \frac{e_{31}^2}{c_{ef}^E \epsilon_{ef}^T}$ (d)	c_{ef}^E (b)
6 (T)	 Espessura (2)	$S_3 \approx 0$ $T_2 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial x_1} = 0$	$k_{31}^2 = \frac{e_{31}^2}{c_{ef}^E \epsilon_{ef}^T}$ (e)	c_{ef}^E (m)
7 (L)	 Espessura (1)	$S_1 \approx 0$ $S_2 \approx 0$	$\frac{\partial D_3}{\partial x_3} = 0$	$k_t^2 = \frac{e_{33}^2}{c_{33}^D \epsilon_{33}^S}$	c_{33}^D
8 (L)	 Espessura (2)	$S_2 \approx 0$ $S_3 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial x_1} = 0$	$k_{te}^2 = \frac{e_{31}^2}{c_{11}^E \epsilon_{33}^S}$	c_{11}^E
9 (L)	 Cisalhamento (1)	$S_4 \approx 0$	$\frac{\partial D_1}{\partial x_1} = 0$	$k_{15}^2 = \frac{e_{15}^2}{c_{55}^D \epsilon_{11}^S}$	c_{55}^D
10 (T)	 Cisalhamento (2)	$S_6 \approx 0$	$\frac{\partial E_1}{\partial x_1} = 0$	$k_{15}^2 = \frac{e_{15}^2}{c_{55}^E \epsilon_{11}^S}$	c_{55}^E
11	 Hidrostático			$k_h^2 = \frac{d_h^2}{s_h^E \epsilon_{33}^T}$ (n)	

Fonte : (EIRAS, s.d.)

2.5 Elementos Finitos

De acordo com Azevedo (2003), o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo principal no âmbito da engenharia de estruturas possibilitar uma maneira de determinar tanto o estado de tensão quanto de deformação de um sólido, e são muito utilizados no estudo de edifícios, pontes e barragens. O autor também afirma que é relativamente comum realizar sucessivas análises de uma estrutura, podendo assim refinar suas características para atingir os objetivos propostos, sejam em parâmetros econômicos, ou mesmo pré-requisitos regulamentares.

A formulação do MEF pode ser baseada no método dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio, ou em métodos híbridos e mistos. De todos estes métodos, aquele que apresenta uma maior simplicidade e, conseqüentemente, uma maior versatilidade é o método dos deslocamentos (AZEVEDO, 2003).

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir a integral sobre um domínio complexo, de volume V , por um somatório de integrais estendidas a sub domínios de geometria simples, de volume V_i . Esta técnica é expressa conforme a equação 14, que corresponde a integral de volume de uma função f (AZEVEDO, 2003).

$$\int_V f \, dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f \, dV \quad (14)$$

Em (15) pressupõe-se que

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (15)$$

Se for possível calcular todos os integrais estendidos aos sub domínios V_i , basta efetuar o somatório correspondente ao segundo membro da equação 13 para se obter a integral estendida a todo o domínio. Cada sub domínio V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples (e.g., segmento de reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro, paralelepípedo). O somatório indicado na equação 13 dará origem à operação designada *assemblagem*, que apresenta semelhanças com a efetuada nas estruturas reticuladas.

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda as características da metodologia de desenvolvimento da pesquisa, classificando quanto a forma de levantamento e tratamento dos dados, além da descrição dos procedimentos técnicos adotados ao longo da elaboração do recuperador de energia com frequência natural variável.

3.1 Tipos de Pesquisa

A pesquisa pode ser considerada como a aquisição de novos conhecimentos e atividade chave da Ciência, sendo que cada tipo de pesquisa tem um objetivo específico, mas todas são caracterizadas como um processo permanentemente inacabado (GERHARDT E SILVEIRA, 2009).

Gil (2010) aponta que a pesquisa pode ser classificada com relação à forma de abordagem, sendo estas qualitativa e quantitativa. Também afirma que a pesquisa quantitativa utiliza parâmetros estatísticos para analisar os dados, sendo basicamente, uma análise numérica, e completa. Gil (2010) também descreve que uma pesquisa qualitativa usa a subjetividade e não pode ser traduzida em números, sendo, com isso, uma análise mais descritiva.

Existe também, a classificação de acordo com os objetivos, sendo esta, subdividida em exploratória, descritiva e explicativa, e Gil (2010) declara que as pesquisas exploratórias têm como principal foco, promover familiaridade do pesquisador com o problema, para que assim, sejam construídas hipóteses a cerca dele. Dessa maneira, os exemplos mais conhecidos de pesquisas exploratórias são as pesquisas bibliográficas e os estudos de caso.

Segundo Bervian (2007), a pesquisa descritiva visa identificar e descrever as características de determinada população, fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. O autor também afirma que a pesquisa descritiva analisa e correlaciona fatos e fenômenos sem manipulá-los.

Já a pesquisa explicativa busca explicar os fatores que promovem a ocorrência dos fenômenos, e aprofunda o conhecimento da realidade, e o principal exemplo é a pesquisa experimental (BERVIAN, 2007).

Além disso, Gerhardt e Silveira (2009) destacam que a pesquisa pode também, ser classificada de acordo com procedimentos técnicos utilizados, sendo subdividida em

bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de campo, estudo de caso e pesquisa ação.

Dessa maneira, pode-se considerar o presente trabalho como uma pesquisa quantitativa, com base em resultados numéricos da simulação no *software* Ansys ®. Além disso, trata-se de uma pesquisa experimental, pois leva em consideração, os resultados obtidos em uma simulação de um modelo computacional.

3.2 Materiais e Métodos

O presente trabalho foi realizado segundo o fluxograma da Figura 6.

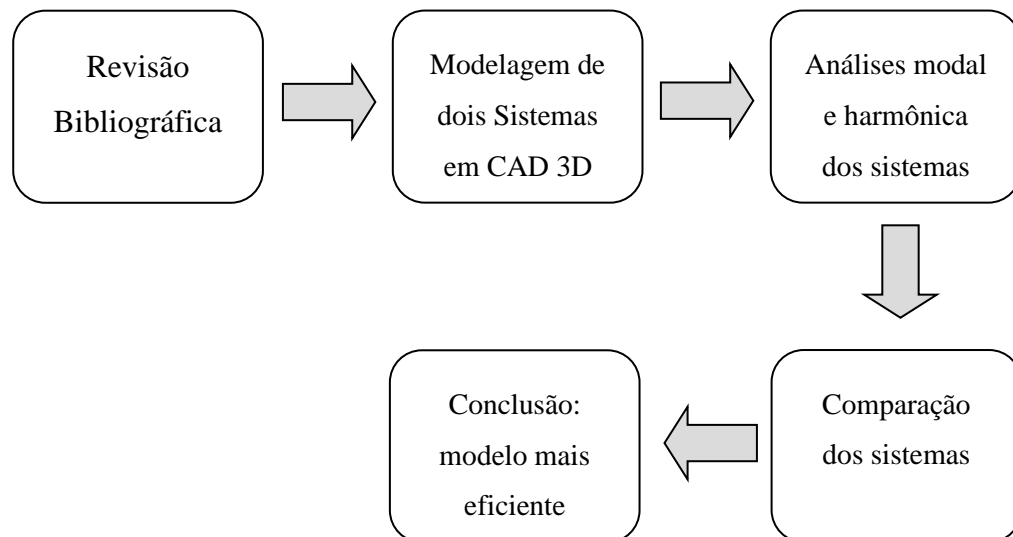


Figura 6 - Fluxograma de trabalho
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Como mostra a Figura 6, foi realizada na etapa 1, uma revisão bibliográfica detalhada para a construção de uma base teórica a respeito do tema, desde a explicação do elemento piezoelétrico, até a modelagem do sistema de recuperação de energia com frequência variável. Na etapa seguinte, uma modelagem de dois protótipos, com massa e rigidez variável, respectivamente, foram desenvolvidas com o auxílio de *softwares* de engenharia, e posteriormente as análises modais foram realizadas.

3.2.1 Revisão Bibliográfica

Na etapa de revisão bibliográfica foi possível definir duas estratégias para a variação da frequência natural, alterando a massa total do sistema, ou alterando sua rigidez resultante.

A alteração de massa foi realizada através da adição de novos elementos de tamanho padrão, enquanto a alteração da rigidez foi possível através do deslocamento de um elemento com massa considerável em um furo oblongo.

3.2.2 Modelagem de dois sistemas em CAD 3D

A modelagem de dois sistemas compostas por uma viga padrão em aço estrutural de (350 x 30 x 0,5) mm foi realizada, utilizando o *software* SolidWorks ®. Ambos os modelos possuem uma chapa de material piezoelétrico do tipo PZT-5A acoplado, com as dimensões destacadas na tabela 2:

Tabela 2 - Dimensões Elemento PZT

Elemento Piezoelétrico	
Comprimento	0,08 m
Largura	0,030 m
Espessura	0,006 m

Fonte: Pesquisa direta (2022)

Com exceção do elemento destacado na figura 7, que é composto por um material piezoelétrico, todos os outros componentes das montagens são de aço estrutural. Para cada um dos sistemas de alteração de frequência natural, foram construídas 5 variações de modelagem, com a variação de massa e de rigidez ilustradas pela figura 8 e 9, respectivamente.

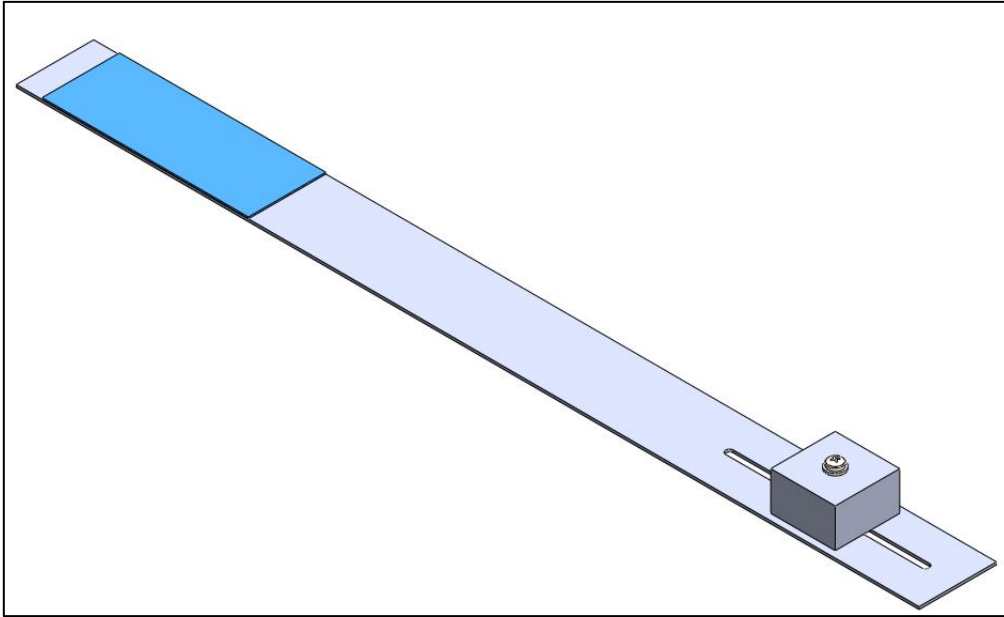


Figura 7 - Elemento de material Piezoelétrico
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Através da adição de blocos padrões de dimensões (30 x 30 x 5) mm, foram realizadas 5 variações de massa total do sistema, possibilitando posterior análise comparativa entre os submodelos.

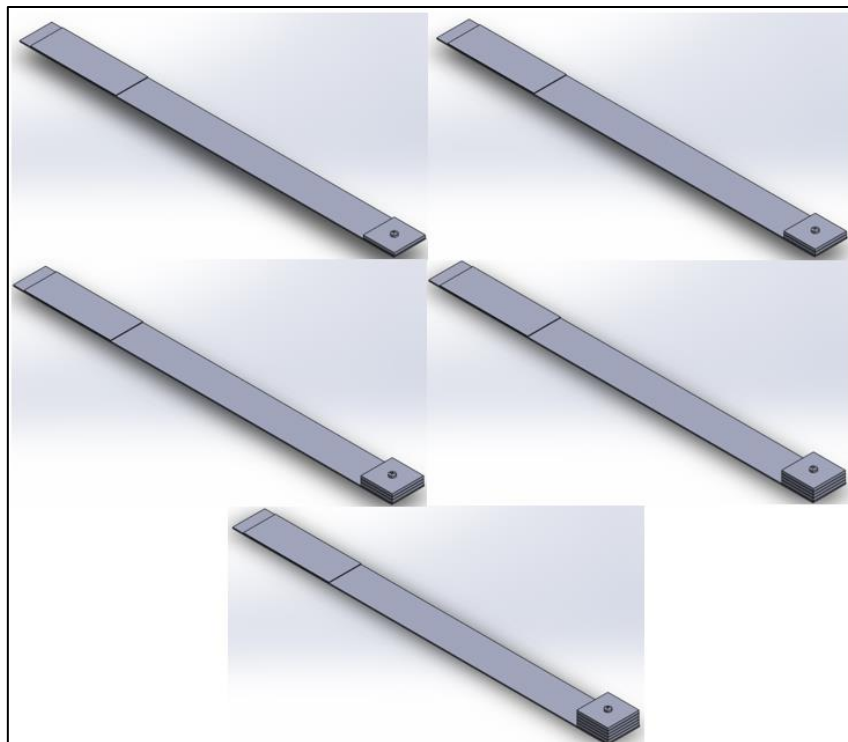


Figura 8 - Sistema de massa variável
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Na tabela 3 são apresentados os dados de massa resultante de cada um dos sistemas da figura 8. Cada bloco adicionado à montagem representa um valor de 2,09 gramas.

Tabela 3 - Dados dos sistemas de massa variada

Modelo	Massa total
Uma massa	14,23 g
Dois massas	16,32 g
Três massas	18,41 g
Quatro massas	20,50 g
Cinco massas	22,59 g

Fonte: Pesquisa Direta (2022)

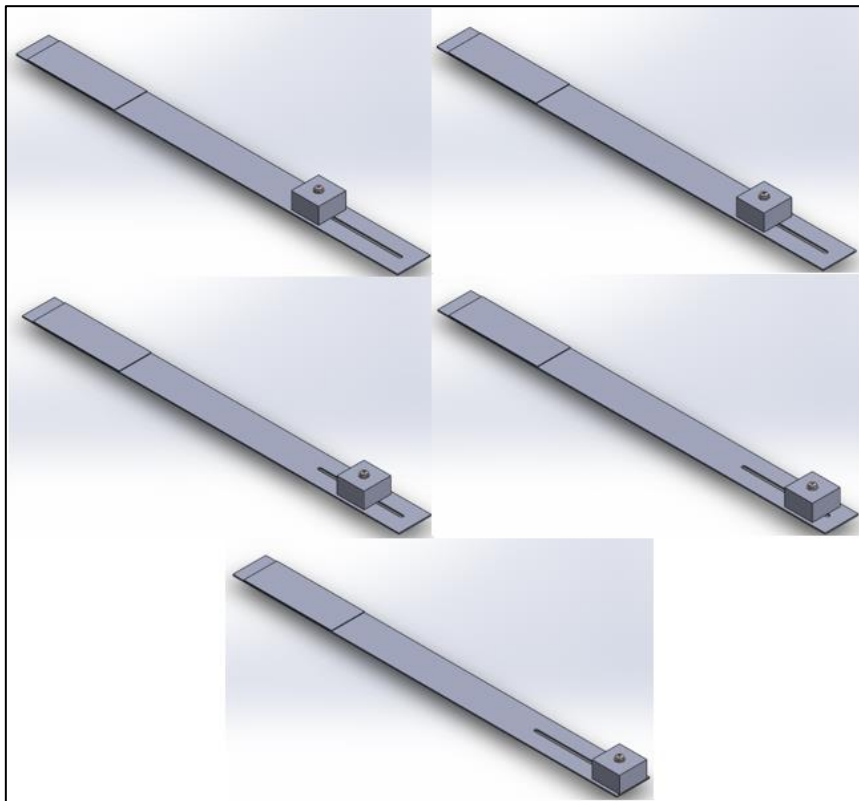


Figura 9 – Sistema de rigidez variável
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Já a alteração da rigidez equivalente do sistema foi realizada através da modificação da posição da massa acoplada à viga base, destacada na figura 10, que possui dimensões constantes de (25 x 25 x 15) mm em todos os submodelos.

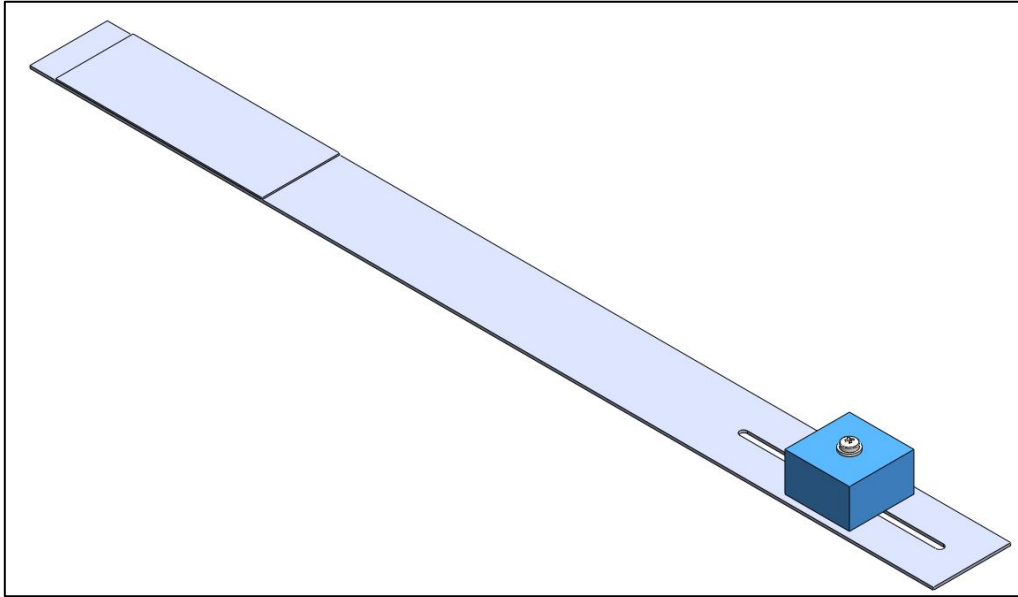


Figura 10 - Massa de posição variável

Fonte: Pesquisa Direta (2022)

As cinco posições adotadas para variação da rigidez do sistema foram relacionadas à distância entre a extremidade da massa adicional e a borda da viga base e são detalhadas na tabela 4.

Tabela 4 - Dados dos sistemas de rigidez variada

Modelo	Distância massa-borda
Posição 1	75 mm
Posição 2	56 mm
Posição 3	35 mm
Posição 4	14 mm
Posição 5	0 mm

Fonte: Pesquisa Direta (2022)

As cinco distâncias massa-borda foram meticulosamente escolhidas após iterações, para proporcionar a coincidência de primeiros modos de vibração dos sistemas de massa e rigidez variável. Dessa maneira, foi possível coincidir a primeira frequência natural do sistema na posição 1 com o sistema de uma massa, por exemplo.

3.2.3 Análises Modal e Harmônica dos sistemas

Uma análise modal foi realizada em cada um dos modelos com o intuito de explicitar os modos de vibração natural dos sistemas. Em todas as modelagens foi adicionado um engaste na mesma extremidade, conforme ilustrado na figura 11, simulando uma viga em balanço.

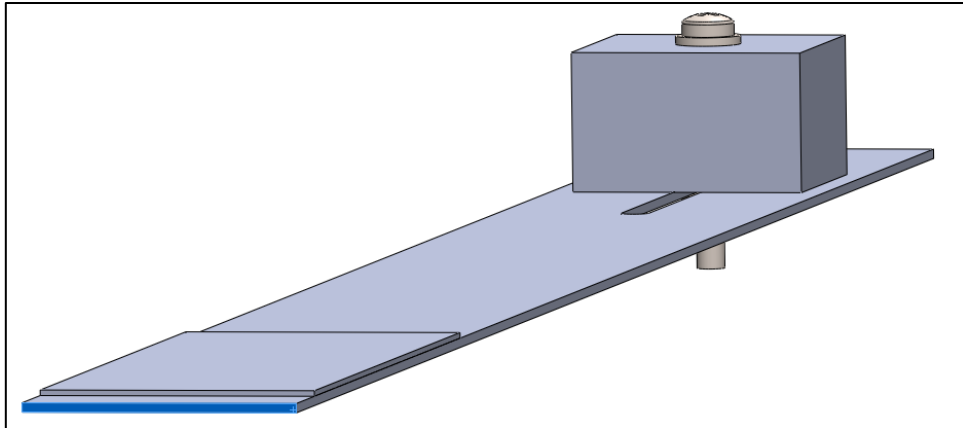


Figura 11 - Localização do engaste fixo
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Para as análises harmônicas, um carregamento constante de 6 N foi aplicado sobre o sistema, como nas figuras 12 e 13, com o intuito de analisar as respostas dos espectros de vibração, bem como a recuperação de energia gerada pelo elemento piezoelétrico em cada um dos modelos.

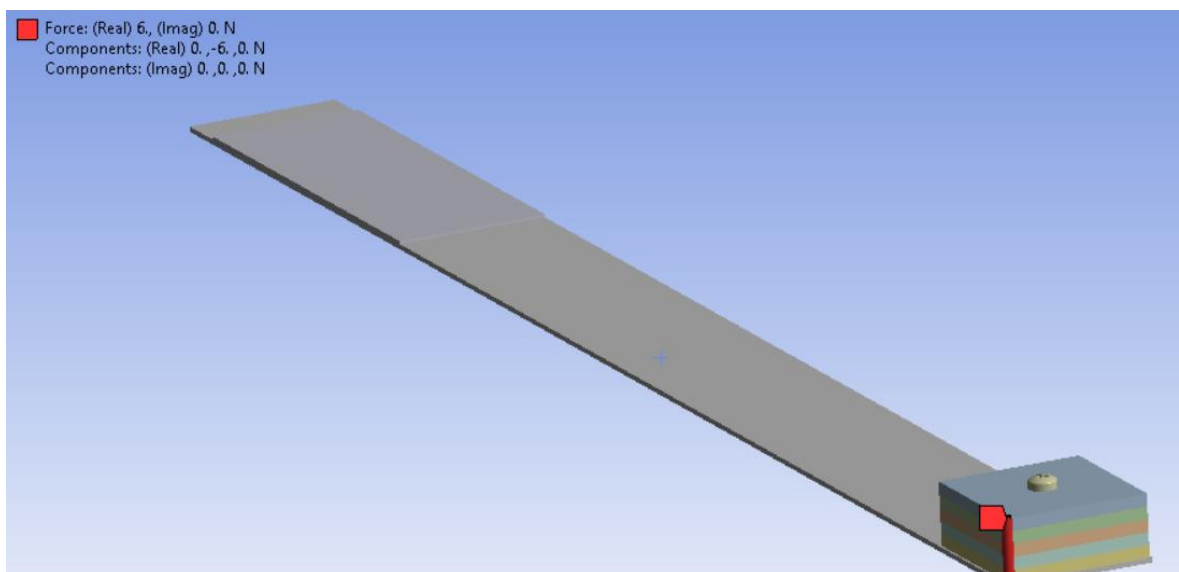


Figura 12 - Ponto de Aplicação da Força nos modelos de massa variável
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

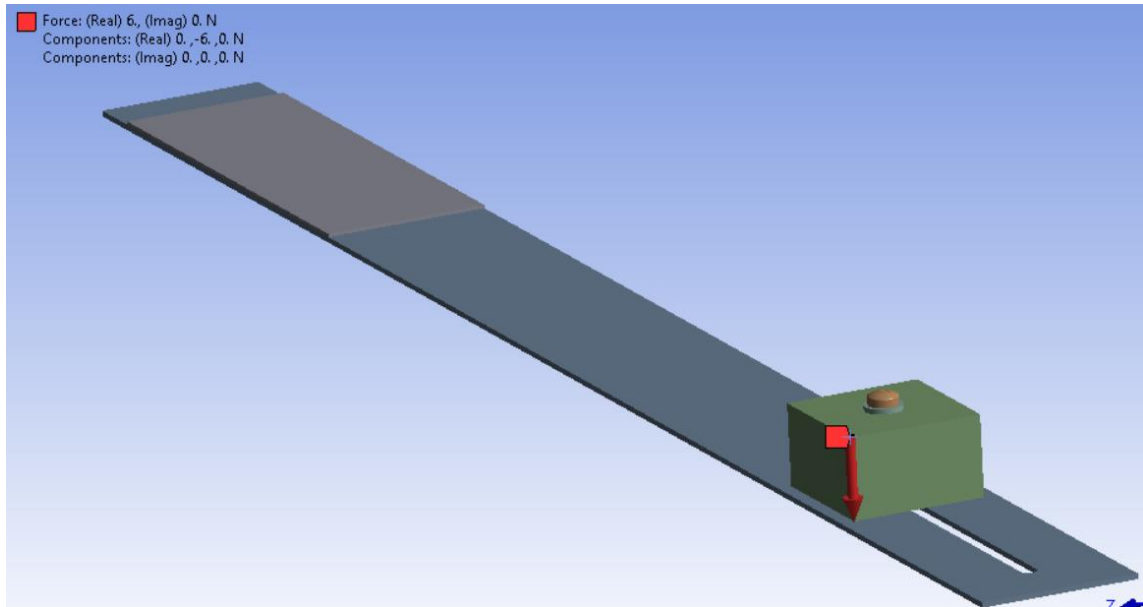


Figura 13 - Ponto de Aplicação da Força nos modelos de rigidez variável
 Fonte: Pesquisa Direta (2022)

3.2.4 Comparação dos sistemas

Nesta etapa, análises comparativas entre os sistemas foram realizadas com base nos dados provenientes das simulações, e divididas em três passos distintos, sendo eles:

- Entre os cinco modelos de massa variável
- Entre os cinco modelos de rigidez variável
- Entre pares de sistemas de massa e rigidez variável em mesma frequência natural

3.2.5 Conclusão de modelo mais eficiente

Os dados obtidos através das simulações foram armazenados em uma planilha, tratados e analisados em Excel[®]. Posteriormente, foram gerados gráficos comparativos para explicitar o modelo de sistema mais eficiente.

3.3 Variáveis e Indicadores

Lakatos (2003) define variável como um conceito operacional que precisa conter valores, que podem ser uma classificação ou uma medida que varia, e podem ser divididas em variáveis dependentes e independentes.

Lakatos (2003, p.138) afirma:

Variável independente (X) é aquela que influencia, determina ou afeta outra variável; é fator determinante, condição ou causa para determinado resultado. [...] Variável dependente (Y) consiste naqueles valores (fenômenos, fatores) a serem explicados ou descobertos, em virtude de serem influenciados, determinados ou afetados pela variável independente.

De acordo com Paladini (2005), indicadores são aqueles que atuam nas operações e produtos, e procuram aperfeiçoar o processo ou peça, possibilitando uma melhoria contínua da qualidade.

As variáveis desta presente dissertação, estão exibidas na tabela 5, sendo que, cada variável possui um ou mais indicadores que são necessários para suas respectivas análises.

Tabela 5 - Tabela de Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Modos de Vibração	Deslocamento Nodal
Frequência Natural	Amplitude
Rigidez Equivalente	Posição
Massa Equivalente	Dimensões
Modelo em MEF	Geometria do elemento Refinamento da malha Condições de contorno

Fonte: Pesquisa Direta (2022)

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

O instrumento utilizado para a coleta de dados, foi o *software* de simulação Ansys ®. Também foram utilizados materiais teóricos como base de comparação e validação dos resultados obtidos.

3.5 Tabulação de Dados

Para tabulação e análise dos dados foi utilizado o *software* Microsoft Excel ®.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi explicitado a metodologia utilizada ao longo do trabalho e os softwares que foram utilizados durante o processo, e aquisição de dados de simulação.

No próximo capítulo os resultados obtidos serão apresentados, com as análises realizadas no *software* Ansys ®, e uma discussão será realizada de acordo com os resultados de simulação atingidos.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados e discussões após simulação dos modelos através do *software* Ansys ®, e tratamento dos dados via Excel ®.

4.1 Análises Modal e Harmônica dos Sistemas

As análises modais serviram para identificar os cinco primeiros modos de vibração natural dos sistemas com metodologia de variação de frequência através da adição de massa e através da alteração da rigidez, respectivamente. As tabelas 6 e 7 apresentam os coeficientes encontrados para as dez modelagens simuladas.

Tabela 6 - Modos de vibração modelos de massa variável

Modos	Uma massa	Duas massas	Três massas	Quatro massas	Cinco massas
1	10,9 Hz	9,6 Hz	8,6 Hz	7,9 Hz	7,4 Hz
2	61,7 Hz	59,6 Hz	58,6 Hz	57,9 Hz	57,5 Hz
3	151,43 Hz	135,7 Hz	119,8 Hz	108,5 Hz	99,5 Hz
4	288,7 Hz	147,9 Hz	146,8 Hz	146,3 Hz	145,7 Hz
5	387,4 Hz	282,9 Hz	281,5 Hz	280,8 Hz	278,9 Hz

Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Tabela 7- Modos de vibração modelos de rigidez variável

Modos	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
1	10,9 Hz	9,6 Hz	8,6 Hz	7,9 Hz	7,4 Hz
2	92,3 Hz	78,3 Hz	68,1 Hz	60,6 Hz	55,8 Hz
3	145,17 Hz	132,1 Hz	122,9 Hz	114,5 Hz	120,6 Hz
4	153,04 Hz	199,9 Hz	176,6 Hz	156,1 Hz	143,5 Hz
5	253,7 Hz	258,8 Hz	341,5 Hz	306,8 Hz	282,8 Hz

Fonte: Pesquisa Direta (2022)

As figuras 14 e 15 apresentam os dois primeiros modos de vibração do sistema de massa variável, com suas respectivas amplitudes de deslocamento.

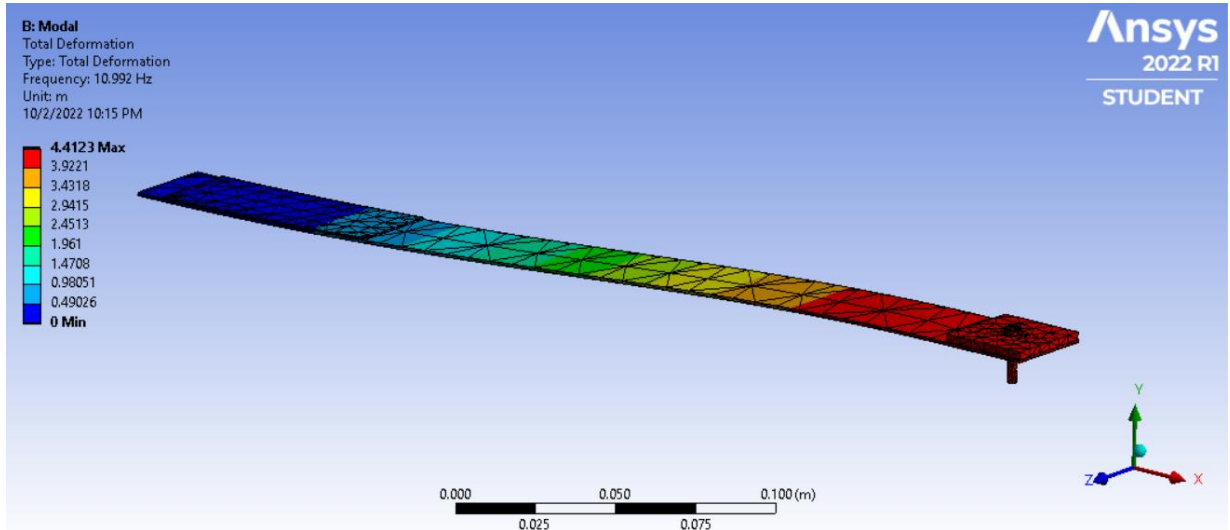


Figura 14 -Primeiro modo de vibração (sistema de uma massa)

Fonte: Pesquisa Direta (2022)

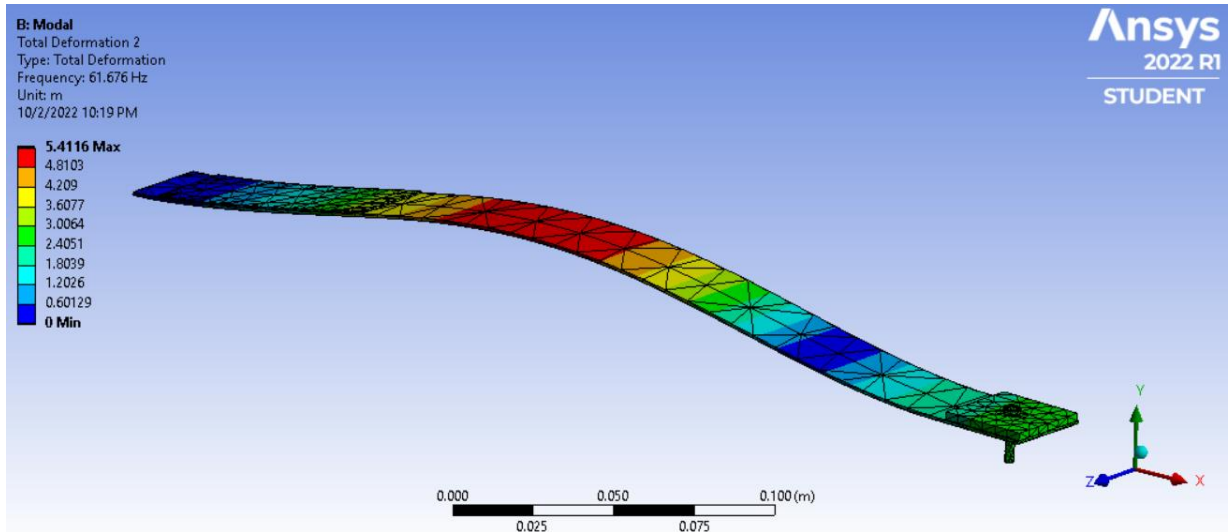


Figura 15- Segundo modo de vibração (sistema de uma massa)

Fonte: Pesquisa Direta (2022)

As primeiras frequências naturais dos sistemas de massa variável e de rigidez variável coincidem em pares, para possibilitar a comparação da eficiência da variação dos modos de vibração dos modelos desenvolvidos.

Já a análise harmônica apresenta os espectros de vibração dos dois sistemas de recuperação de energia, com suas respectivas cinco variações. A figura 16 expõem o comportamento da frequência e da amplitude dos modelos com rigidez variável.

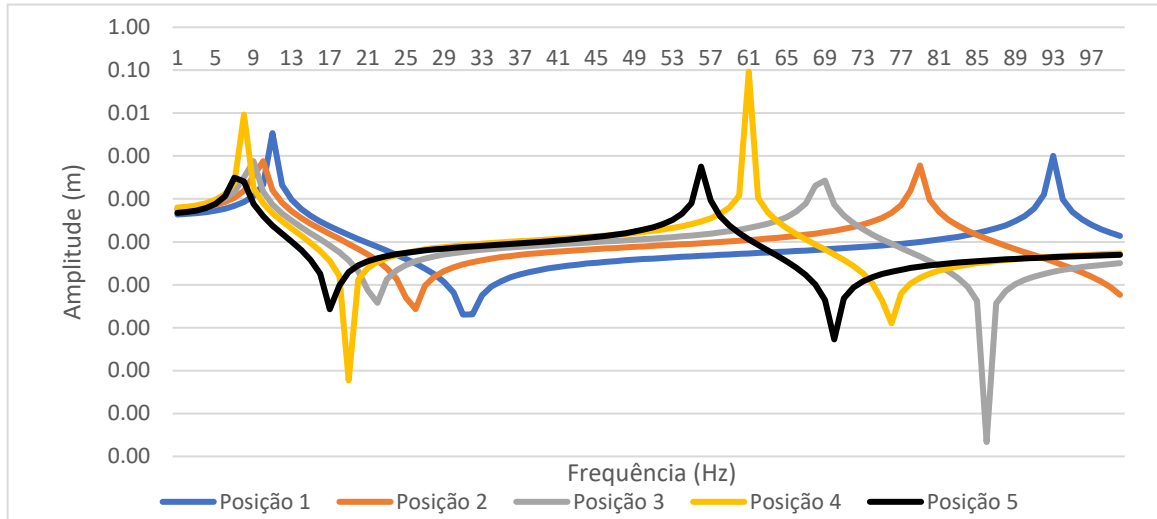


Figura 16 - Espectros dos sistemas com rigidez variada
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Os espectros de vibração evidenciam o fato de os maiores valores de amplitude do sistema estarem ligados às frequências naturais dos modelos. Nota-se que a posição 4 apresentou os maiores valores de amplitude dentre os sistemas com rigidez variável, seguido pelo sistema na posição 1. Já o sistema na posição 2, manteve uma constância nos valores de amplitude entre a primeira, e a segunda frequência natural de vibração.

A figura 17, apresenta os dados coletados a respeito dos espectros vibracionais das cinco variações de modelos com massa variada simulados. É possível compreender o comportamento de deslocamento do sistema em função da frequência.

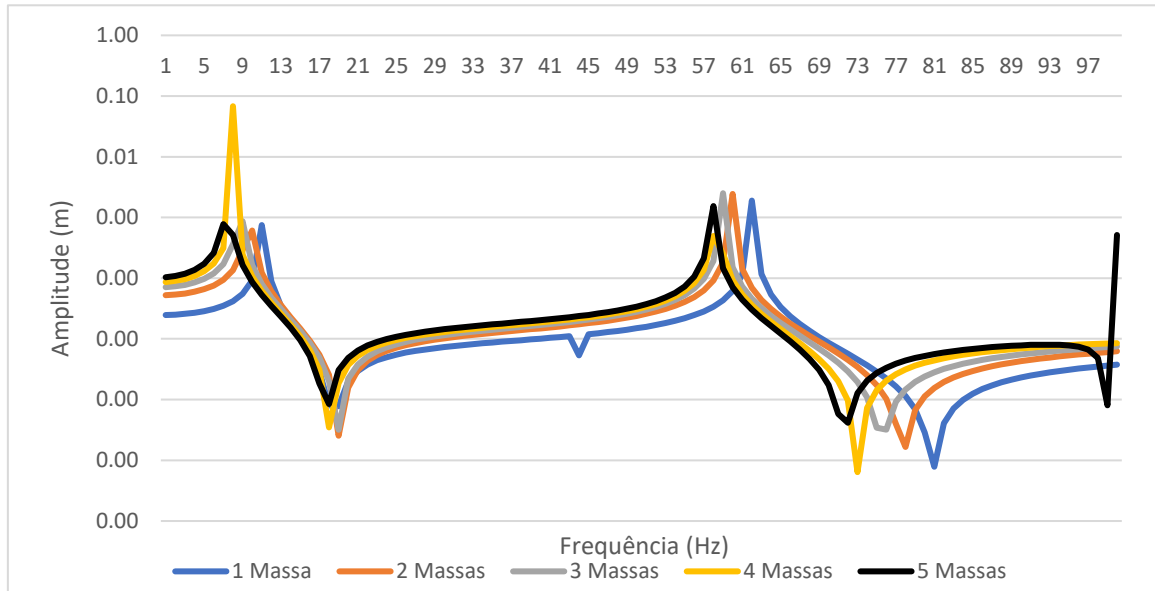


Figura 17 - Espectros dos sistemas com massa variável
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Os sistemas apresentaram diferenças de valores de amplitude entre as cinco variações. Nota-se que o modelo com quatro massas alcançou os maiores valores de amplitude próximos da primeira frequência natural, enquanto na segunda frequência natural, todos os cinco sistemas de massa atingiram valores similares.

4.2 Comparação entre os sistemas

4.2.1 Sistema com massa variável

A figura 18 apresenta os valores de tensão recuperada pelo elemento piezoelétrico nos cinco modelos com variação de massa e alcançou picos significativos de energia, especialmente nos pontos de frequência natural dos sistemas.

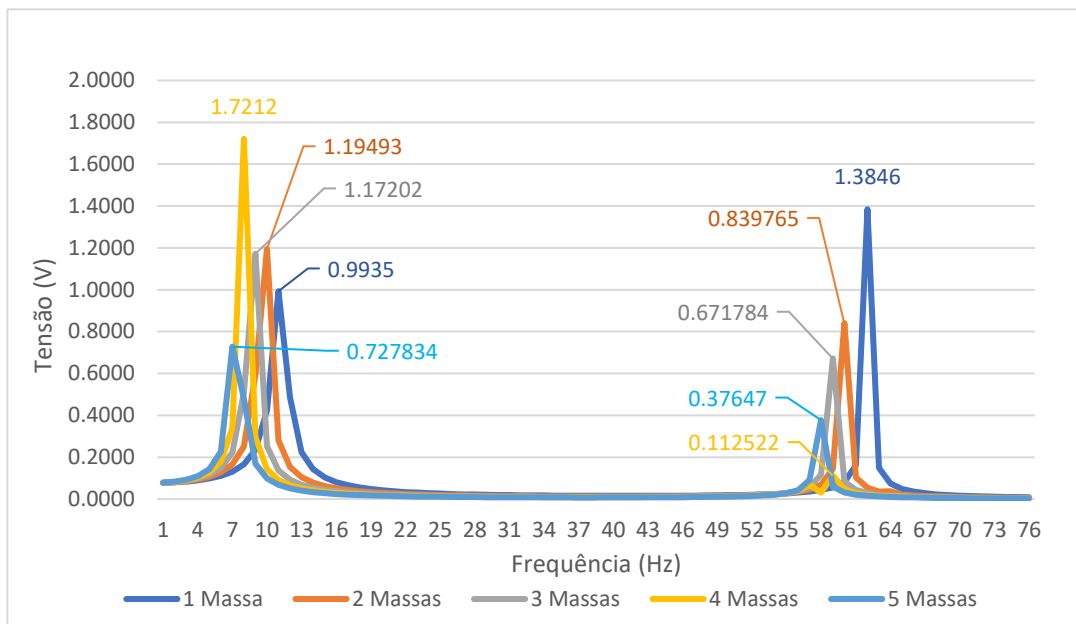


Figura 18 - Tensão recuperada em sistemas de massa variável
 Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Nota-se que os o sistema de uma, duas e três massas possuem maiores constâncias de valores em seus dois primeiros modos de vibração natural, enquanto o sistema de 4 massas apresenta maior discrepância de recuperação entre as duas primeiras frequências naturais. Já o modelo de 5 massas, gerou os menores valores dentre os protótipos.

Com o aumento da frequência, com exceção da modelagem com uma massa, os sistemas obtiveram uma redução de tensão recuperada pelo elemento piezoelétrico. Dessa forma, constata-se que o sistema de massa unitária, possui uma melhor aplicação para frequência acima de 50Hz, ao passo que os modelos de duas a cinco massas, apresentam melhores resultados em baixas frequências.

4.2.2 Sistema com rigidez variável

Já a figura 19, apresenta os valores de tensão recuperadas pelo elemento piezoelétrico nos cinco modelos com variação de rigidez, e as cinco distâncias da massa parafusada até a borda da viga já citadas foram levadas em análise.

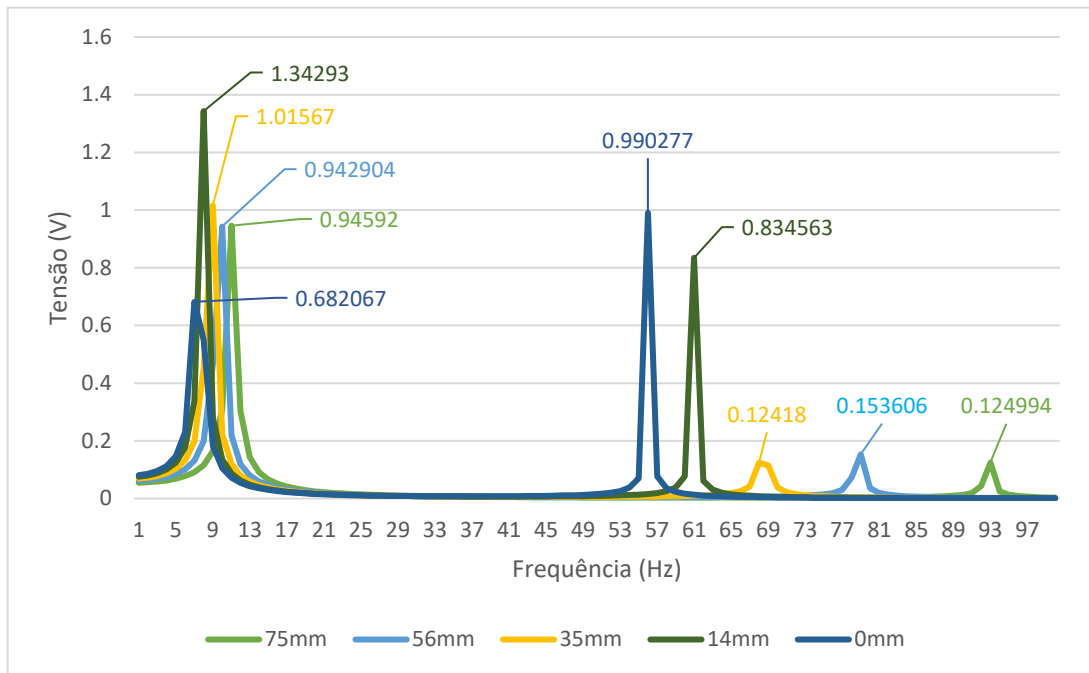


Figura 19 – Tensão recuperada em sistemas de rigidez variável
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Os modelos com a distância de 14 mm e 0 mm para a extremidade apresentaram valores consideráveis de tensão tanto no primeiro modo de vibração, quanto no segundo. Isso evidencia que uma diminuição da rigidez do sistema, contribuiu para maiores recuperações de energia em frequências acima de 50 Hz.

Nota-se, também, que as modelagens com distâncias de 75 mm, 56 mm e 35 mm, apresentam valores relevantes próximos da primeira frequência natural, ao passo que possui coeficientes proporcionalmente baixos na zona ao redor da segunda frequência natural.

4.3 Pares de modelos com mesma frequência natural

A figura 20 possui gráficos comparativos entre pares de sistema massa/rigidez variáveis em seus respectivos primeiros modos naturais de vibração. Os pares são compostos por:

- 10,9 Hz: Sistema com 1 massa e sistema com distância de 75mm
- 9,6 Hz: Sistema com 2 massas e sistema com distância de 56mm
- 8,6 Hz: Sistema com 3 massas e sistema com distância de 35mm
- 7,9 Hz: Sistema com 4 massas e sistema com distância de 14mm

- 7,4 Hz: Sistema com 5 massas e sistema com distância de 0mm

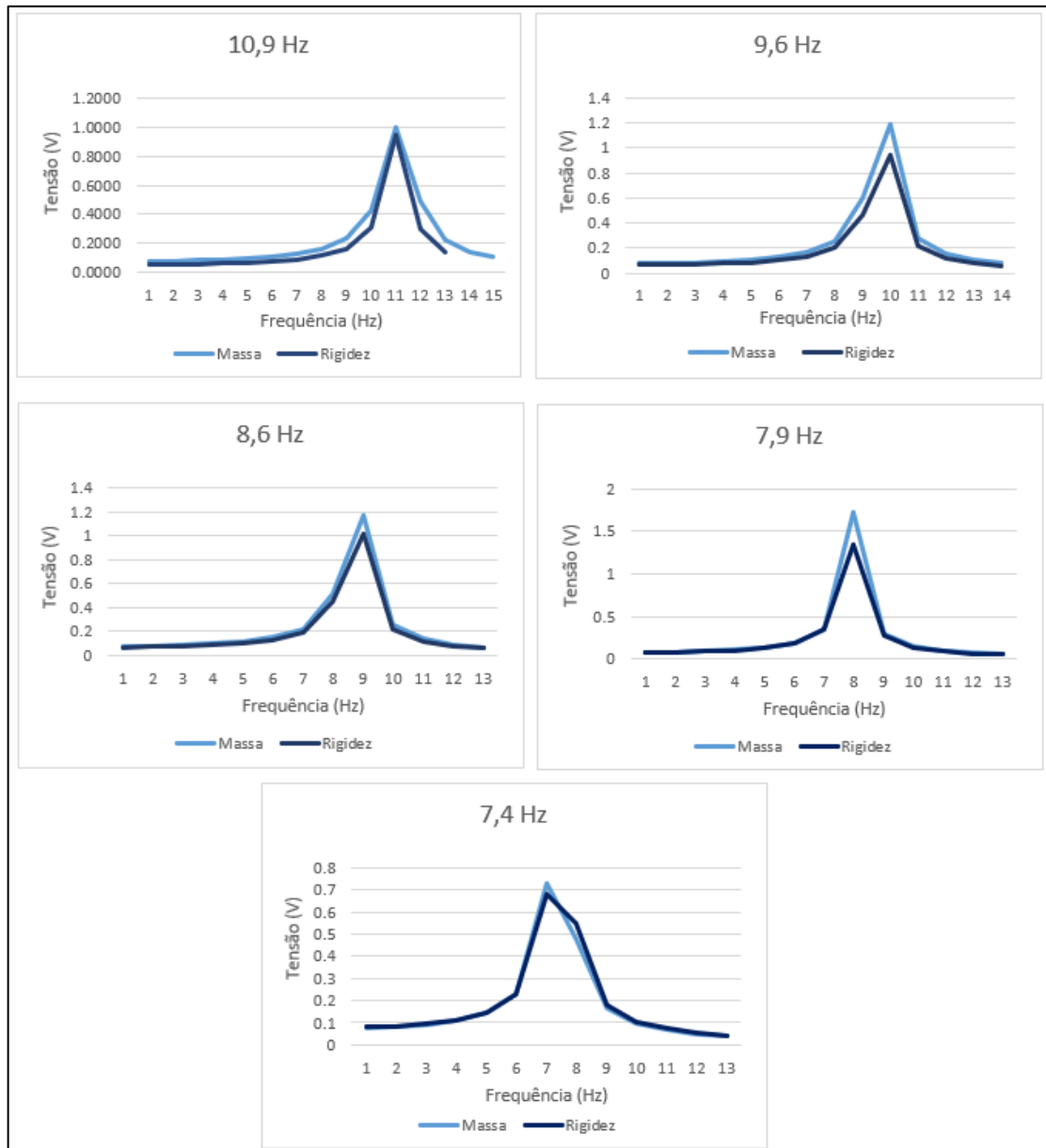


Figura 20 - Gráficos comparativos nas frequências naturais
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

Observa-se que os sistemas com variação de frequência natural através da alteração da massa resultante, apresentaram maiores valores de recuperação de energia em todos os espectros vibracionais. Na frequência natural de 7,9 Hz ocorreu a maior diferença de valores, correspondendo a uma diferença de tensão de aproximadamente 0,4 V entre as duas modelagens. Ambos apresentaram os maiores valores de recuperação de energia entre os pares analisados, atingindo os valores de 1,7 V e 1,3 V.

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho consiste em realizar o estudo de um sistema com frequência natural variável com um elemento piezoelétrico inserido via método dos elementos finitos. Com isso, foi possível realizar simulações computacionais e gerar energia elétrica a partir da vibração mecânica das modelagens. Em seguida, foi possível determinar a forma mais eficiente de variação do espectro de vibração em relação ao volume de recuperação energética dos sistemas.

A partir dos resultados obtidos, foi observado uma diferença entre os valores de recuperação de energia entre os métodos de alteração de frequência natural. Quando comparados em pares, foi constatado que o sistema com variação de massa apresenta valores absolutos maiores que o sistema de variação de rigidez em todos os casos. Isso indica que uma forma de modificação da frequência natural é mais eficiente que a outra, e podem estar ligadas à maiores valores de energia recuperados por elementos transdutores.

Dessa forma, é possível concluir que os efeitos da metodologia de variação da frequência natural estão diretamente ligados a quantidade de energia recuperada por um elemento piezoelétrico acoplado ao sistema.

5.2 Recomendações

Recomenda-se um estudo a respeito da utilização dessa energia para a alimentação de um sensor, eliminando a necessidade de uma fonte externa. Além disso, incentiva a investigação de uma metodologia de automatização da variação da frequência natural do sistema, gerando um modelo de constante adaptação ao meio em que está submetido.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PRIYA, S.; SONG, H.; ZHOU, Y.; VARGHESE, R.; CHOPRA, A.; Kim, S.; KANNO, I.; WU, L.; HA, D.; RYU, J.; et al. **A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits.** *Energy Harvest. Syst.* 2017

AZEVEDO, A.F.M; **Método dos elementos finitos**, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

HALLIDAY D.; RESNICK R.; WALKER J. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. Volume 3. 8a ed**, 2009.

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

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

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

Challa, Vinod & Prasad, Marehalli & Shi, Yong & Fisher, Frank. **A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability.** *Smart Materials and Structures*, 2008.

BERVIAN, Pedro A.; **Metodologia Científica**. 6 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

COSTA G. A. S. **Análise vibratória de fundações de máquinas sobre estacas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil -Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2013.

MOHANTY, A.; PARIDA, S.; BEHERA, R.K.; ROY, T.; **Vibration energy harvesting: A review**, Vol. 9, *Journal of Advanced Dielectrics* (2019).

MOULSON, A. J; HERBERT, J. M.; **Eletroceramics, materials, properties and applications**. 1990.

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

LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica** 1. 5. ed. - São Paulo: Atlas 2003.

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

PRIYA, S., **Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers,** Journal of Electroceramics, 2007

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