

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

THANITY BRAUN KAUFMANN

**MICRO COLHEITA DE ENERGIA ATRAVÉS DE PISO VIBRATÓRIO COM
SISTEMA PIEZOELÉTRICO**

CERRO LARGO

2021

THANITY BRAUN KAUFMANN

**MICRO COLHEITA DE ENERGIA ATRAVÉS DE PISO VIBRATÓRIO COM
SISTEMA PIEZOELÉTRICO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Palacios Félix

CERRO LARGO

2021

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Kaufmann, Thanity Braun
COLHEITA DE ENERGIA ATRAVÉS DE VIBRAÇÕES EM
PLATAFORMA PIEZOELÉTRICA / Thanity Braun Kaufmann. --
2020.

f.

Orientador: Jorge Luís Palacios Félix

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro
Largo, RS, 2020.

1. Piezoeletricidade. 2. Vibrações Mecânicas. 3.
Geração de Energia. I. Félix, Jorge Luís Palacios,
orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III.
Título.

THANITY BRAUN KAUFMANN

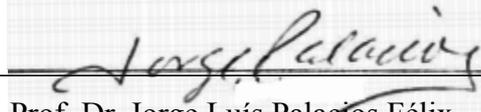
**MICRO COLHEITA DE ENERGIA ATRAVÉS DE PISO VIBRATÓRIO COM
SISTEMA PIEZOELÉTRICO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul.

Este trabalho de conclusão do curso foi defendido e aprovado pela banca em:

25/05/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jorge Luís Palacios Félix – UFFS

Orientador



Prof. Dr. Marcio Antônio Vendrusculo

Avaliador



Prof. Dr. Thiago de Casio Luchese

Avaliador

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus, pela vida, saúde e força em todo o processo de graduação, que me deu forças diante às dificuldades e nunca me deixou desistir.

Aos meus queridos pais, Renato e Roslaine, que sempre acreditaram em mim, independentemente da condição ou adversidade, sendo figuras importantíssimas e fundamentais em minha vida, onde sempre me motivaram a dar um passo adiante e chegar aonde cheguei, ao final desta graduação. Pela dedicação que sempre tiveram para que tudo que eu fizesse fosse possível, além de abdicar de algumas (muitas) coisas para o conforto de vocês em função de mim. São as pessoas mais incríveis e importantes da minha vida.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante a graduação, principalmente às minhas irmãs do coração Bruna, Eduarda, Maria Eduarda e Letícia, que alegraram, durante 5 anos, todos os meus dias e sempre me deram forças para enfrentar meus problemas. Amo vocês!

Meu reconhecimento ao meu orientador Jorge Luis Palacios Félix e seus orientandos do PPGATS, pelo tempo dedicado, pelos conhecimentos e informações passadas para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos professores da Banca, Dr. Marcio Antonio Vendrusculo e Dr. Thiago de Cacio Luchese, por aceitarem o convite como avaliadores da apresentação do meu trabalho de conclusão.

A meu namorado Patrik, que por mais que tenha entrado a pouco tempo em minha vida, já se fez muito presente em minha vida acadêmica, sempre me incentivando e me apoiando para ir em busca dos meus sonhos.

A vida é um constante recomeço. Não se dê por derrotado e siga adiante. As pedras que hoje atrapalham sua caminhada amanhã enfeitarão a sua estrada.

RESUMO

A sustentabilidade, com o passar dos anos, vem se tornando um conceito amplamente estudado e aplicado, sendo atrelada ao desenvolvimento sustentável, tornando sua aplicabilidade possível apenas com uma visão integrada das esferas social, econômica e ambiental. Seguindo dessa pressuposição, o pavimento surge como uma alternativa sustentável de geração de energia independente de fatores climáticos. O pavimento é considerado o ponto de encontro de pessoas e veículos, e através dele é possível se obter energia elétrica por meio da transformação da energia mecânica transmitida por veículos ou pedestres, utilizando dispositivos piezoelétricos. Diante deste contexto, projetou-se um protótipo coletor de energia em pequena escala com materiais piezoelétricos poliméricos LDT1-028K cujas vibrações são geradas pelo fluxo de pessoas sobre a estrutura denominada piso vibratório. Foram simulados três ensaios de diferentes fluxos passantes sobre o piso vibratório, simulação de passos de caminhada lentos denominada M1, simulação de passos de caminhada intermediários denominada M2 e simulação de passos de corrida denominada M3. Os resultados obtidos apresentaram um crescente aumento na saída de tensão eficaz conforme as simulações variaram de passos lentos para passos de corrida. Obteve-se uma tensão de 0,967 V para a simulação M1, 1,217 V para a simulação M2 e 1,788 V para a simulação M3. Ademais, observou-se que, apesar de superar alguns resultados encontrados na literatura, trabalhos futuros utilizem outro modelo de piezoelétrico e diferentes materiais para a viga em balanço, para que assim o sistema possa ser acionado gerando seus resultados ótimos.

Palavras-chave: Colheita de energia. Piezoelectricidade. Viga em Balanço. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Sustainability, over the years, has become a concept widely studied and applied, being linked to sustainable development, making its applicability possible only with an integrated view of the social, economic and environmental spheres. Following this assumption, the pavement emerges as a sustainable alternative for energy generation independent of climatic factors. The pavement is considered the meeting point for people and vehicles, and through it it is possible to obtain electrical energy through the transformation of the mechanical energy transmitted by vehicles or pedestrians, using piezoelectric devices. In this context, a small scale energy collector prototype was designed with LDT1-028K polymeric piezoelectric materials whose vibrations are generated by the flow of people on the structure called the vibrating floor. Three tests of different flows passing under the vibrating floor were simulated, simulation of slow walking steps called M1, simulation of intermediate walking steps called M2 and simulation of running steps called M3. The results obtained showed an increasing increase in the effective voltage output as the simulations varied from slow steps to running steps, respectively. A voltage of 0.967 V was obtained for the M1 simulation, 1.217 V for the M2 simulation and 1.788 V for the M3 simulation. Furthermore, it was observed that, despite surpassing some results found in the literature, future works use another piezoelectric model and different materials for the cantilever beam, so that the system can be activated, generating its optimal results.

Keywords: Harvesting energy. Piezoelectricity. Cantilever Beam. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema ilustrativo de viga em balanço.....	12
Figura 2- Matriz energética do Brasil em 2017.....	15
Figura 3 - Matriz elétrica brasileira em 2017.....	15
Figura 4 - Imagens em escala real dos modelos desenvolvidos, onde estão apresentados (a) FAI, (b) FTI e (c) FTL, respectivamente, acoplados ao transdutor piezoelétrico PVDF LDT1028K.....	16
Figura 5 - Micro gerador eletromagnético.....	17
Figura 6 - Desenho esquemático do modelo de coletor de energia em formato de ladrilhos...	18
Figura 7 - Modelo do transdutor Cymbal.....	19
Figura 8 - Representação gráfica do protótipo instalado na cidade de Gravataí/RS.....	20
Figura 9 - Execução de tecnologia piezoelétrica em Curitiba/PR.....	21
Figura 10 - Configurações dos modelos de PVDF testados.....	21
Figura 11 - Matriz energética Energy Harvesting.....	23
Figura 12 - Aplicações técnicas dos efeitos da piezoeletricidade.....	26
Figura 13 - Esquematização dos dois modos da piezoeletricidade.....	28
Figura 14 - Os eixos de um material piezoelétrico.....	29
Figura 15 - Respostas das variáveis: $ij = 33$ (a); $ij = 31$ (b) e $ij = 15$ (c).....	31
Figura 16 - Representação de uma viga em balanço (infinitos graus de liberdade).....	32
Figura 17 - Etapas metodológicas aplicadas no trabalho.....	34
Figura 18 - Sistema de suporte designado caixa-mola.....	35
Figura 19 - Sistema móvel designado superfície vibratória.....	36
Figura 20 - Sistema de piso vibratório detalhado. (a) acoplamento do piezoelétrico; (b) suporte vertical; (c) massa de apoio; (d) objeto impactador.....	37
Figura 21 - Imagem representativa do PVDF LDT1-028K.....	38
Figura 22 - Imagem representativa das dimensões do PVDF LDT1-028K.....	38
Figura 23 - Representação esquemática do coletor de energia “passarela piezoelétrica”.....	39
Figura 24 - Sistema experimental piso vibratório.....	41
Figura 25 - Circuito elétrico utilizado para a determinação da potência.....	42
Gráfico 1 - Tensão eficaz do sistema para diferentes simulações.....	45
Figura 26 - Respostas de saída de voltagem para as simulações M1.....	53
Figura 27 - Respostas de saída de voltagem para as simulações M2.....	54

Figura 28 - Respostas de saída de voltagem para as simulações M3.....55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do Piezo PVDF LDT1-028K.....	38
Tabela 2 - Relação do número de impactos realizados em função do tempo.....	40
Tabela 3 - Tensões obtidas a partir da simulação M1.	43
Tabela 4 - Tensões obtidas a partir da simulação M2.	44
Tabela 5 - Tensões obtidas a partir da simulação M3.	44
Tabela 6 - Potência desenvolvida pelo sistema.	45
Tabela 7 - Análise comparativa de regiões que estudam o uso do piezoelétrico em pavimentos.	46

LISTA DE SIGLAS

d	Constante piezoelétrica
ϵ	Constante dielétrica
σ	Tensão mecânica
κ	Constante de permissividade
D	Deslocamento elétrico
k	Coeficiente eletromecânico
E	Campo elétrico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
3.2 CRESCIMENTOS DO CONSUMO ENERGÉTICO E A IMPORTÂNCIA DO USO DE FONTES ALTERNATIVAS/ENERGIA LIMPA.....	13
3.3 MODELOS ENERGÉTICOS A PARTIR DE ESTRUTURAS PIEZOELÉTRICAS...	15
3.4 ENERGY HARVESTING.....	22
3.4.1 PIEZOELETRICIDADE.....	24
3.4.1.1 TIPOS DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS.....	27
3.4.2 VIBRAÇÕES MECÂNICAS.....	31
4 METODOLOGIA.....	32
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	32
4.2 MÉTODOS.....	33
4.2.1 ETAPA EXPLORATÓRIA.....	33
4.2.2 ETAPA DE CRIAÇÃO (Descrição do Sistema de Piso Vibratório).....	34
4.2.3 ETAPA EXPERIMENTAL.....	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	41
5.2 ANÁLISE EXPLORATÓRIA.....	46
6 CONCLUSÕES.....	48
7 REFERÊNCIAS.....	50
8 ANEXO.....	54
ANEXO A – Saídas de tensões capturadas pelo osciloscópio de gravação.....	54

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial, ocorrida nos séculos XVIII e XIX, provocou um conjunto de mudanças, onde a mais relevante foi a substituição do trabalho artesanal pelo uso de máquinas, tornando essencial o uso de energia elétrica para qualquer atividade humana. Como consequência disso, o consumo de energia elétrica aumentou significativamente e a carência por fontes energéticas elevou-se, além de causar o aumento exponencial da degradação ambiental.

Atualmente, os principais meios de geração de energia elétrica são as centrais térmicas (utilizando carvão, gás ou gasóleo) e nucleares, que são em sua maioria instaladas no exterior das cidades e centros urbanos, tendo combustíveis fósseis nucleares, ou recursos naturais (água, sol, vento) como fontes para a geração. Também se faz necessário o transporte da energia gerada para os locais onde será consumida, com especial destaque para os grandes centros urbanos e industriais, existindo perdas de energia nas redes de transporte, o que faz com que seja necessário gerar mais energia do que aquela que realmente é necessária, aumentando assim os custos.

De modo a contornar esta situação, recentemente começou-se a adotar o conceito de “microgeração” de energia, que consiste na geração de energia elétrica nos próprios edifícios, principalmente através de sistemas de energia solar e eólica. No entanto, estes sistemas dependem dos fatores climáticos e da disponibilidade dos recursos (sol e vento) para gerar energia elétrica.

Logo buscaram-se alternativas sustentáveis de geração de energia, que não dependam do sistema natural, no qual o pavimento passa a ser considerado, pois este é visto como o ponto de encontro de pessoas e veículos, um local ideal para a geração de energia renovável, possuindo como variável dependente apenas o movimento habitual sobre sua estrutura, permitindo a conversão dessa energia mecânica dissipada em energia elétrica, reduzindo as perdas pelo transporte e a necessidade de utilização de combustíveis fósseis e os malefícios que estes trazem para o ambiente.

Santos (2014) destacou que o pavimento não é mais apenas funcional e estrutural, mas pode contribuir para o desenvolvimento sustentável ao produzir e armazenar energia elétrica. Essa energia pode ser usada para a própria infraestrutura rodoviária, para sistemas de

iluminação, gerenciamento de tráfego e para redes de energia para edifícios residenciais, comerciais e industriais próximos à rodovia.

Estudos sobre técnicas alternativas de coleta de energia por meio da conversão de vibração mecânica em energia elétrica, conhecida na literatura como “Energy Harvester”, têm aumentado. A técnica consiste na captura e no armazenamento da energia através do meio ambiente em estruturas, utilizando materiais piezoelétricos para a conversão energética, também denominada “Piezoelectric Energy Harvesting”. (Félix; Rocha; 2014)

Os materiais piezoelétricos possuem grande importância no meio de geração de energia graças à sua capacidade de converter diretamente a energia aplicada em energia elétrica utilizável, e, possuem um grande atributo de poder receber qualquer forma de pressão e converte-la em sinal elétrico. No quesito de obtenção de energia, os piezoelétricos podem ser configurados de inúmeras maneiras que se revelam altamente proveitosas em aplicações de coleta de energia (Anton; Sondano; 2007).

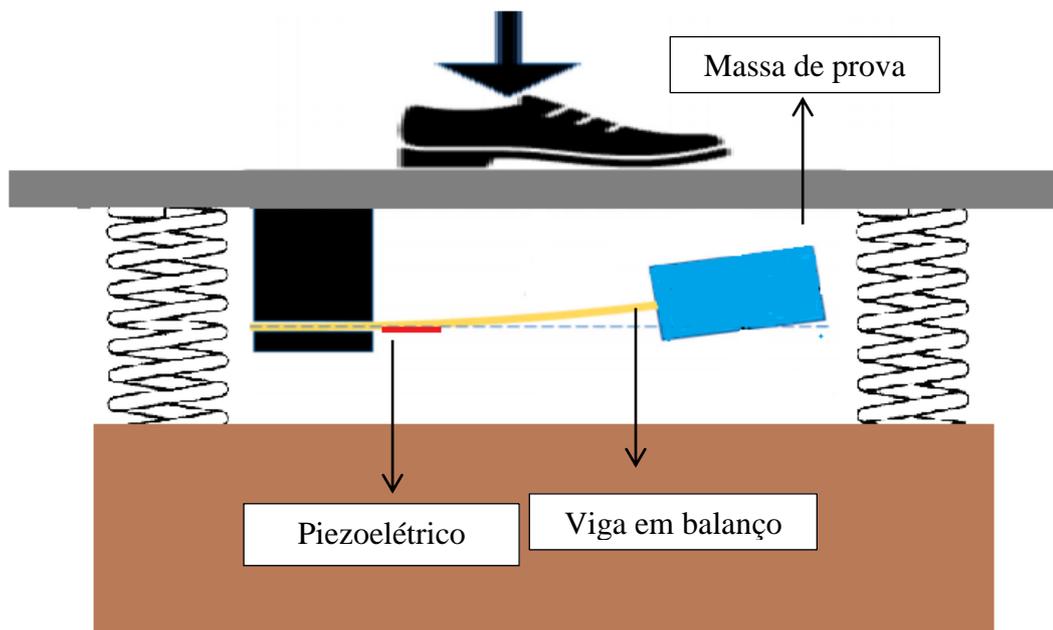
Neste mesmo cenário, no decorrer deste trabalho são relatados estudos relacionados à geração de energia limpa, em pequena escala, utilizando um material em comum, os piezoelétricos, conhecidos comumente por converter a energia mecânica em energia elétrica, ou vice-versa.

Inúmeras obras propõem a conversão de energia mecânica em elétrica através de calçadas, porém, vale destacar que no cenário envolvendo vibrações este número tende a escassear. Levando em consideração o conceito de vibrações, D. Isarakorn et al. traz a visão de piso vibratório a partir da prototipagem de uma viga em balanço para geração de energia de forma sustentável.

Neste sentido, a ideia do presente trabalho foi basear-se nos conceitos de D. Isarakorn et al. fazendo a construção de um protótipo de piso vibratório, a fim de realizar as medições de voltagem do sistema projetado em escala laboratorial ativado a partir das vibrações realizadas pelo fluxo de pessoas, onde, foi feita a comparação de diferentes fluxos passantes sobre o sistema projetado afim de comparar qual destes gera mais energia. Os fluxos foram divididos em 3 (três) grupos, o primeiro grupo compõe amostragens de simulações a passos lentos sob a plataforma (M1), o segundo grupo compõe amostragens de simulações a passos intermédios de caminhada sob a plataforma (M2) e o terceiro grupo compõe amostragens de simulações a passos acelerados ou de corrida sob a plataforma (M3). O intuito final deste trabalho foi calcular a potência máxima gerada neste sistema, deixando-o inicialmente ativo

para que futuros trabalhos sejam feitos a partir deste a fim de realizar melhoramentos para obtenções de saídas de voltagens significativamente relevantes. Através dos melhoramentos feitos, também traz-se a ideia futura de elaboração de um sistema de geração de energia na forma de um piso vibratório com materiais de vigas piezoelétricas em balanço em escala real, podendo-se, com isso, gerar uma parte da energia demandada no campus da UFFS/Cerro Largo para uso de dispositivos de pequeno porte.

Figura 1 - Sistema ilustrativo de viga em balanço.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é analisar experimentalmente o piso inteligente vibratório de colheita de energia de pequeno porte utilizando materiais piezoelétricos poliméricos em balanço, cujas vibrações são induzidas pelas caminhadas de pessoas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre uso de colheita de energia utilizando piezoelétricos em pavimentos.
- Analisar as respostas de tensão do piezoelétrico LDT1-028K através de um osciloscópio.
- Comparar os diferentes tipos de oscilações obtidas através do fluxo de pessoas sobre um piso experimental de colheita de energia.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para seguimento de estudo é imprescindível à definição de alguns parâmetros acerca da energia gerada a partir de vibrações e dos materiais piezoelétricos, desta forma, o estado da arte do presente trabalho apresenta quatro seções distintas. A primeira seção aborda a problemática envolvendo o uso de combustíveis fósseis e a alta demanda energética, e apresenta como substituição a estes, o uso de energias limpas renováveis como a energia gerada por materiais piezoelétricos. A segunda seção aborda os modelos energéticos gerados a partir de estruturas piezoelétricas vibracionais encontrados na literatura. Na terceira sessão são apresentados os conceitos da expressão “Energy Harvesting” juntamente com a explanação do conceito de piezoeletricidade e suas propriedades. Por fim, a última sessão esclarece o que diz respeito às vibrações mecânicas.

3.2 CRESCIMENTOS DO CONSUMO ENERGÉTICO E A IMPORTÂNCIA DO USO DE FONTES ALTERNATIVAS/ENERGIA LIMPA

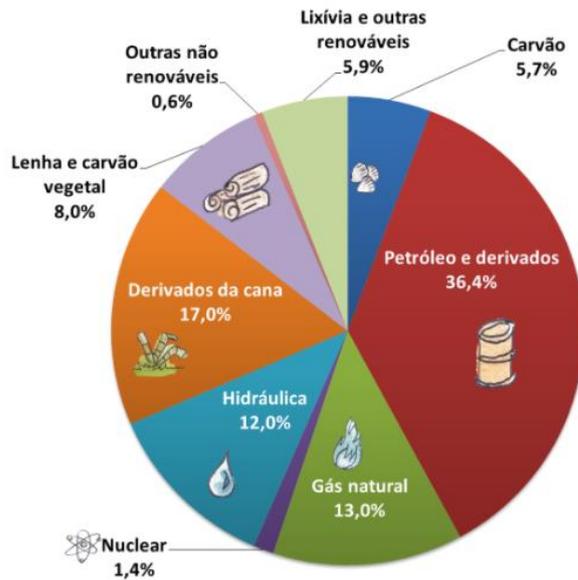
A elevação das temperaturas médias globais do ar e dos oceanos, o derretimento da neve e do gelo, e a elevação do nível médio do mar, têm demandado um esforço no sentido de que haja a implementação de novas tecnologias utilizando fontes renováveis de energia, contribuindo dessa forma para o desenvolvimento e a manutenção sustentável da humanidade.

Muitas dessas mudanças são geradas pela ação do ser humano, especialmente na sua relação com o trato dos recursos naturais. Uma das áreas de interferência humana é na geração e no uso de energia, predominantemente baseada em fontes finitas, como aquelas provenientes de combustíveis fósseis, com potencial altamente poluidor.

O consumo de energia no Brasil está crescendo sequencialmente ao fornecimento desta, e isso tem causado uma grande preocupação no setor de energias. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2018), a maior fração da matriz energética do Brasil atualmente está com o petróleo e derivados, seguidos pelos derivados da cana, gás natural e hidráulica. A Figura 2 apresenta a porcentagem de encargo de cada fonte na matriz energética nacional em 2017.

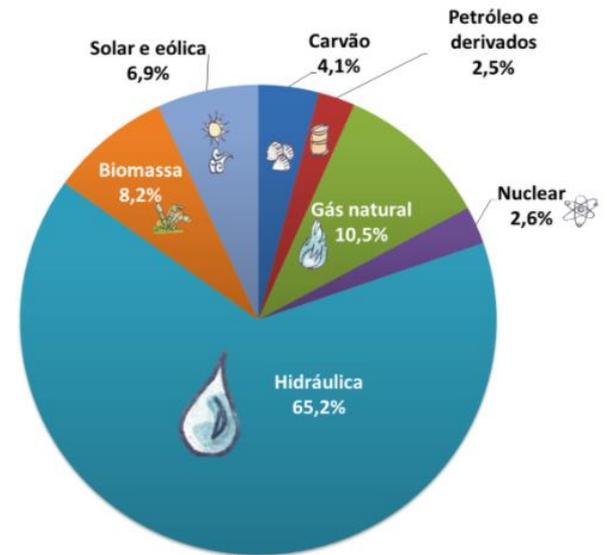
Dando seguimento aos dados fornecidos pela EPE (2018), 65,2% da matriz elétrica do Brasil é proveniente da energia elétrica oriunda de usinas hidrelétricas. Todavia, o consumo de energia elétrica proveniente da água é posto em risco quando nos deparamos com os fatores climáticos decorrentes do aquecimento global e do efeito estufa e das constantes secas que atrelam o país. Assim, podemos perceber a grande escassez a que este recurso está submetido. A Figura 3 apresenta as frações de contribuição para a geração de energia elétrica no Brasil.

Figura 2- Matriz energética do Brasil em 2017.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2018)

Figura 3 - Matriz elétrica brasileira em 2017.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2018)

Neste sentido, existem outros meios de captação de energia, a energia cinética está presente na forma de vibrações, deslocamentos ou forças aleatórias, que são convertidos em energia elétrica através de mecanismos eletromagnéticos, piezoelétricos ou eletrostático. As vibrações podem ser encontradas em várias aplicações, englobando eletrodomésticos, equipamentos de instalação industrial, estrutura de móveis, edifícios, pontes, entre outros (Roundy et al., 2003). O acúmulo de energia gerada a partir desta circunstância depende da quantidade e da forma de energia cinética disponível no meio ambiente e da eficiência do mecanismo de conversão.

3.3 MODELOS ENERGÉTICOS A PARTIR DE ESTRUTURAS PIEZOELÉTRICAS

Foi a partir da década de 90 que se iniciou o desenvolvimento de dispositivos que permitem converter a energia cinética das vibrações em energia elétrica. Estes dispositivos

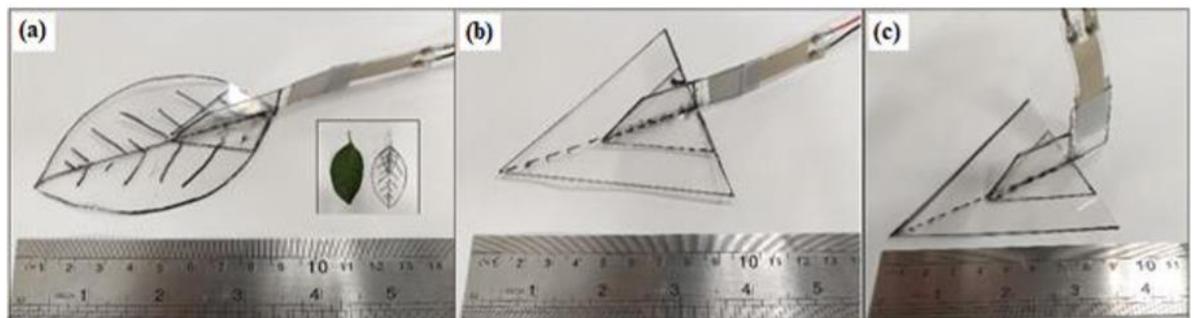
eletromagnéticos são desenvolvidos, fundamentalmente, numa escala de potência de saída que vai desde a ordem dos micro até à ordem dos mili-watts de potência. As fontes de energia mecânica podem ser encontradas facilmente. (Beeby et al, 2011)

A energia mecânica pode contribuir como uma saída possível para a questão das energias renováveis e a preocupação com o esgotamento e desgaste do meio ambiente, oriunda da instalação de grandes usinas hidrelétricas. A excessiva quantidade de água necessária para o funcionamento de hidrelétricas, bem como a extensa área necessária para a implementação de parques eólicos e solares são fatores que contribuem para a utilização da energia mecânica, visto que os sistemas de transformação da mesma em energia elétrica podem ser implementados nas camadas do pavimento. (Mota, 2019)

O grupo de pesquisa do Prof. Dr. Jorge Luís Palacios Félix, atuante na Universidade Federal da Fronteira Sul campus Cerro Largo, atualmente encontra-se com uma ampla gama de estudos envolvendo o uso de piezoelétricos para a captação e geração de energias renováveis e sustentáveis.

Recentemente, em 2019, A.C. Do Nascimento e J.P. Félix desenvolveram uma alternativa de produção de energia renovável em microescala explorando o potencial eólico por meio de vibrações mecânicas induzidas e impostas pelo fluxo de vento, sobre pequenas estruturas arquitetônicas artificiais com formato de folha árvore reais, empregando o polímero piezoelétrico Polifluoreto de Vinilideno (PVDF) como caule vertical e horizontal. As máximas potências de saída registrada nos experimentos foram de $3,96 \mu\text{W}$ para o modelo FAI e $2,22 \mu\text{W}$ para o modelo FTI. A Figura 4 mostra as configurações utilizadas pelo autor.

Figura 4 - Imagens em escala real dos modelos desenvolvidos, onde estão apresentados (a) FAI, (b) FTI e (c) FTL, respectivamente, acoplados ao transdutor piezoelétrico PVDF LDT1028K.



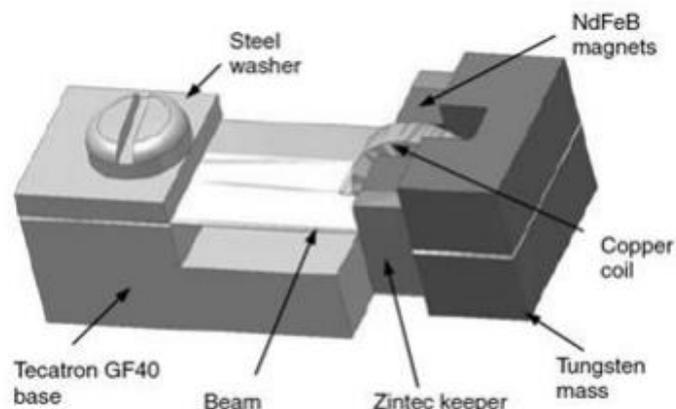
Fonte: A.C.Do Nascimento; J.P.Félix; 2019.

Novamente no ano de 2019, L. R. Damke e J.P. Félix desenvolveram um estudo com o objetivo de avaliar a aplicação dos materiais piezoelétricos na geração de energia renovável. Foi confeccionada uma plataforma, a qual consiste em um suporte rígido vertical de ferro, de pequeno porte, em que foi utilizada uma garra, para que esta servisse de suporte ao polímero piezoelétrico PVDF (Fluoreto de Polivinilideno) LDT0-028K e para realizar o movimento do polímero foi utilizado um simulador de vento que produzia várias velocidades distintas. Foi possível avaliar as melhores condições experimentais a uma velocidade do vento de 6,74 m/s, obtendo-se 9,40 mW de energia.

A.O. Schonarth e J. P. Félix, em 2017, realizaram um estudo acerca da análise experimental da coleta de energia limpa e renovável em pequena escala através do uso de materiais piezoelétricos poliméricos PVDF/LDT0 de MEAS, cujas vibrações foram geradas pelo fluxo do vento, a partir de um simulador de vento. Ao final da pesquisa puderam obter um total de 8,92 V e 0,00074 W.

Um gerador de energia utilizando os movimentos do corpo humano, Figura 5, foi desenvolvido por C.R.Saha et al., do Instituto Nacional de Tyndall, em 2007. O protótipo foi utilizado durante dois movimentos específicos do corpo humano. Os resultados de potência obtidos variam entre os 300 μ W, em andamento, e os 2,5mW, em corrida lenta.

Figura 5 - Micro gerador eletromagnético.



Fonte: C.R.Saha et al., 2007.

De acordo com Zhao et al., 2010, os pavimentos rodoviários são capazes de suportar, ao longo de sua vida útil, uma ampla variedade de cargas, provocando fadiga, tensão, deformação e vibração nas suas camadas, devido à energia transferida da aplicação das cargas

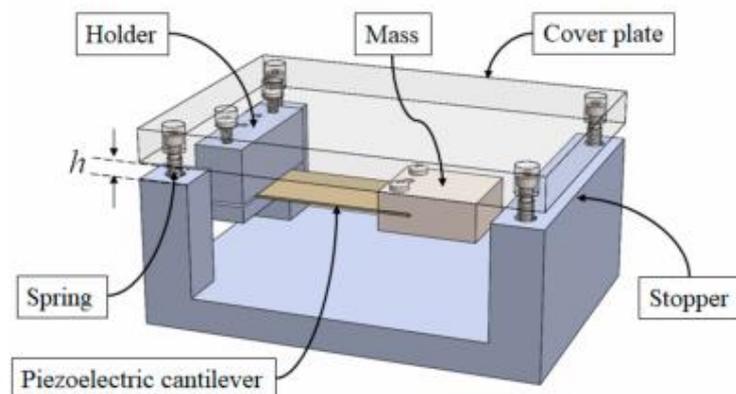
dos veículos ao longo de seu deslocamento, fator que contribui diretamente para a perturbação das cargas de sensores piezoelétricos. Os autores mencionaram que, em alguns casos, o trabalho externo gerado pela carga na calçada chega a mais de 1 J, que é dissipado como calor residual no ambiente do pavimento, o que leva a um maior risco de deformação da calçada devido ao acúmulo de energia. No entanto, se o transdutor piezoelétrico estiver embutido na calçada, parte dessa energia pode ser coletada e convertida em energia elétrica.

Wischke et al., no ano de 2011, estudaram a aplicação de sensores piezocerâmicos em túneis, onde a vibração causada por veículos automotores e ferroviários é capaz de gerar energia. As medições de campo mostraram que pelo menos 135 μJ foram aproveitados na geração de energia elétrica, em 85% dos casos de passagem de veículos ferroviários.

Ross et al., em 2017, da Universidade Florestal de Pequim, desenvolveram um estudo acerca da captura de energia através da vibração que uma bola de basquete causava em estruturas de madeira contendo piezoelétricos, no momento em que a bola foi movimentada sobre a estrutura se teve um ganho de 16,3V.

Também, no ano de 2019, D. Isarakorn et al., do Instituto de Tecnologia Ladkrabang, em Bangkok, na Tailândia, desenvolveram um modelo de coletor de energia em formato de ladrilhos que usa uma viga em balanço, Figura 6, para gerar eletricidade a partir de passos humanos. Uma potência média de 0,82 mW e uma energia total de 2,40 mJ.

Figura 6 - Desenho esquemático do modelo de coletor de energia em formato de ladrilhos.

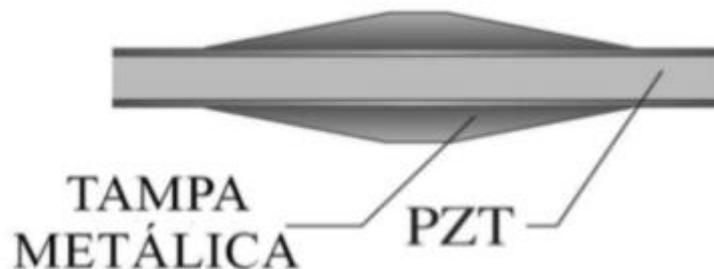


Fonte: D. Isarakorn et al., 2019.

Dentre os possíveis transdutores a serem utilizados, para converter energia mecânica em energia elétrica, encontra-se o Cymbal. Ele é um exemplo de transdutor piezoelétrico, cuja

estrutura pode ser observada na Figura 7. O equipamento é composto de um disco de titanato zirconato de chumbo (PZT) e tampa metálica em ambos os lados. Gera-se um potencial elétrico na superfície do eletrodo devido os efeitos piezoelétricos do PZT quando a carga está sendo aplicada na extremidade da tampa de metal na direção vertical. (Zhao et al., 2010).

Figura 7 - Modelo do transdutor Cymbal.



Fonte: Zhao et al. (2010).

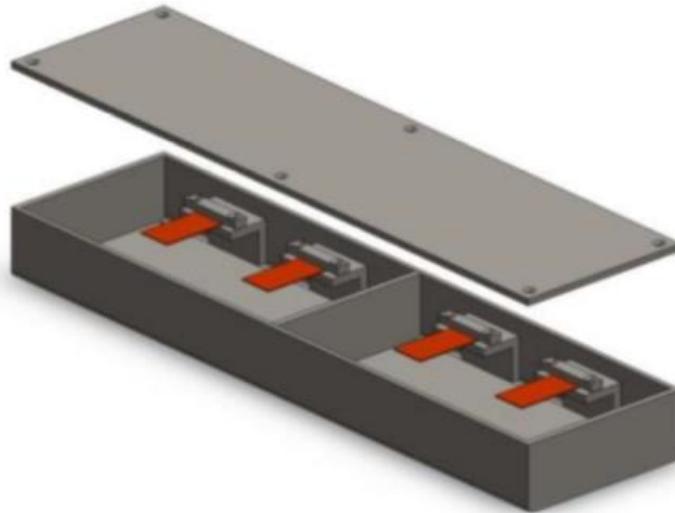
Zhao et al. (2010) chegaram ao modelo geométrico ideal do transdutor a ser inserido na parte inferior da camada de revestimento, de modo que o mesmo chegaria a gerar 97,33 V de potencial elétrico, com capacidade de saída máxima em cerca de 0,06 mJ e, ao assumir que a frequência de carga de um veículo de grande porte é de 20 Hz, a energia elétrica máxima obtida a partir do pavimento chegaria a 1,2 mW. Também foi avaliada a questão do deslocamento da superfície do pavimento com a instalação do Cymbal, sendo encontrado um aumento de 0,07%, que é similar ao já existente no pavimento normal.

Kim, Shen e Ahad (2015) testaram duas unidades de captação de energia piezoelétrica comercialmente disponíveis sob a ação da carga de roda simulada usando um simulador de tráfego. Foram aplicados três níveis de carga a cada coleta de energia (222 N, 445 N e 890 N), que resultou em tensões variando de 5 a 20 V. Esse experimento foi realizado sob a hipótese de 600 veículos por hora a 72 km/h, resultando em uma energia de 2,67 mWh.

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2018), por meio de pesquisa realizada em parceria com a concessionária Triunfo Concepa, propôs a implantação de um sistema piloto que utiliza sensores piezoelétricos para sinalização viária na praça de pedágio de Gravataí/RS. O sistema consiste em tachas com flash, com efeito estroboscópico. Foi usado o sensor piezoelétrico PZT-5H, que possui um melhor desempenho do que a cerâmica PZT-5A comumente usada. Capacitores com alto valor de armazenamento são usados para

armazenar a energia gerada. A potência máxima gerada foi de 36.1 W. A Figura 8 mostra uma representação gráfica do protótipo instalado.

Figura 8 - Representação gráfica do protótipo instalado na cidade de Gravataí/RS.



Fonte: ANTT, 2018.

O sistema aplicado proveniente da pesquisa realizada pela ANTT (2018) foi de pequena escala, utilizando apenas 16 transdutores no total. Com o aumento da quantidade desses sensores seria permitido um aumento da energia gerada. A questão da geração de energia encontra um empecilho no preço do material, fazendo com que a priori, a alternativa não seja economicamente viável.

Novamente a nível Nacional um projeto entre uma empresa japonesa e a prefeitura de Curitiba, iniciou os testes relativos a implementação de um piso gerador de energia elétrica em um trecho de ciclovia no Centro Cívico da cidade. A tecnologia utiliza um sistema piezoelétrico para iluminar as ciclovias do tráfego de bicicletas e proporcionar maior segurança aos ciclistas e pedestres. A energia para acender os leds vem da vibração do piso, tanto do giro dos pneus das bicicletas quanto das pessoas que caminham por ele, onde estão instalados os sensores.

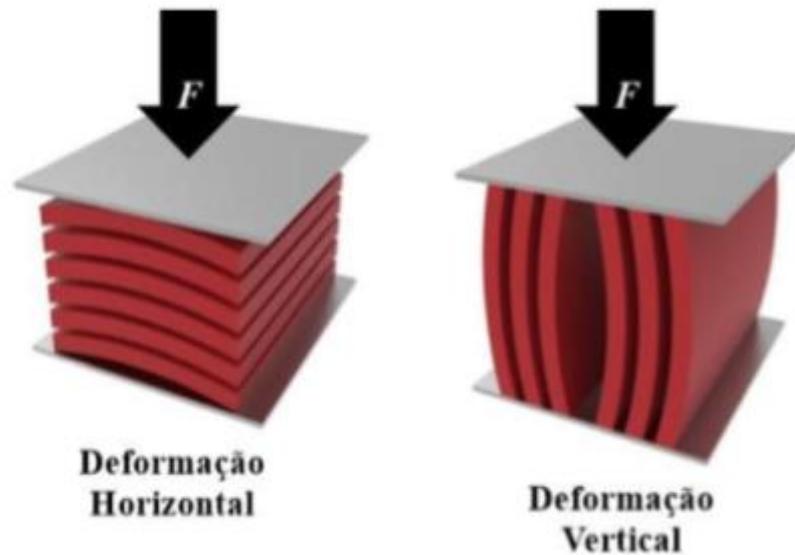
Figura 9 - Execução de tecnologia piezoelétrica em Curitiba/PR.



Fonte: Marcelo Elias, 2018.

A partir da crescente demanda de estudos mais avançados de materiais piezoelétricos, foi elaborado por Jung et al. (2017) um modelo de captação de energia piezoelétrica baseado em polímero de fluoreto de polivinilideno (PVDF) para aplicações rodoviárias. Para otimizar estruturalmente o modelo, foram realizadas análises de elementos finitos para duas configurações, uma com o PVDF em posição horizontal e outra em posição vertical, que podem ser visualizadas na Figura 10. O módulo foi testado com um sistema de carga móvel modelo (MMLS3) e exibiu até 200 mW de potência. Foi observado que a configuração de deformação vertical apresentava resultados mais elevados de saída de potência, chegando a ser 4 vezes maior que a configuração horizontal.

Figura 10 - Configurações dos modelos de PVDF testados.



Fonte: Jung et al. (2017).

3.4 ENERGY HARVESTING

O termo “energy harvesting” tem origem no inglês, e seu significado é simplesmente “colheita” ou “captura” de energia. (Safaei et al., 2019)

Soin (2018) menciona que Energy Harvesting pode ser definido como um processo em que fontes como carga mecânica, vibrações, gradientes de temperatura, luz, rádio frequência (RF), entre outros, são eliminadas e convertidas para obter níveis relativamente pequenos de energia na faixa de nW a mW . Sendo assim, energy harvesting se trata de uma proposta alternativa ao aproveitamento da energia renovável de baixa dimensão antes desperdiçada, em pequenas quantidades de energia elétrica proveitosa.

De acordo com a pesquisa de Galhardi (2010), o desenvolvimento da tecnologia e o desenvolvimento da microeletrônica nos últimos anos têm afetado as pesquisas sobre fontes alternativas de energia limpa, como a área da engenharia, na qual as pessoas buscam modelos de mecanismos autônomos. Uma possibilidade é capturar energia através do meio ambiente, como um coletor de energia chamado "energy harvesting", que converte vibrações mecânicas em energia elétrica.

Rocha (2012) acrescentou que as tecnologias de captação e armazenamento de energia utilizam materiais piezoelétricos para ocorrer na forma de calor, luz, vibração e ondas de rádio, ou seja, os piezoelétricos funcionam a partir de fontes externas. Portanto, esta alternativa se adapta a recursos alternativos gratuitos e ilimitados, e é capaz de substituir baterias e cabos de alimentação.

Além disso, de acordo com Kong et al. (2014), graças ao fornecimento da tecnologia de material piezoelétrico, material este desenvolvido tanto fino como espesso, a tecnologia foi desenvolvida no nível macro e micro e é muito eficaz na captação de energia. O processo vem de fontes de energia mecânica, incluindo estruturas civis, trilhos, tráfego de veículos nas estradas, ondas do mar e fluxo de pessoas.

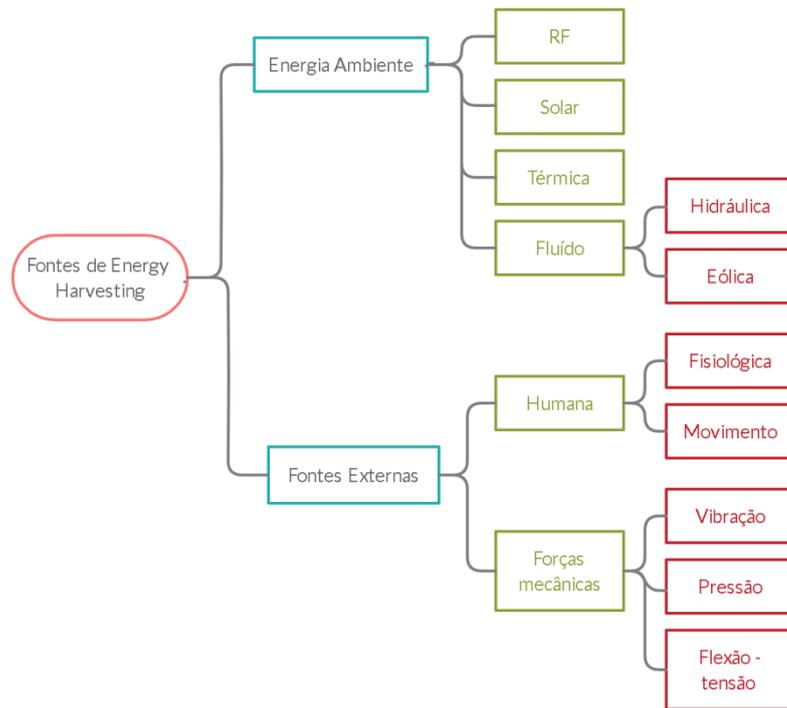
Cottone et al. (2011) salienta que existem muitas fontes de energia no meio ambiente, mas a energia cinética por meio da vibração é a que está mais disponível. A captura de energia ocorre por meio da deformação estrutural do material de acoplamento e a converte em energia elétrica por meio de mecanismos como piezoelétricos, eletromagnéticos e eletrostáticos, mas dentre estes o de maior desempenho é o método piezoelétrico.

Portanto, Cottone (2014) propôs as vantagens e desvantagens do método de conversão de energia cinética em energia elétrica, como a piezoelectricidade, método mais adequado para uso em microescala e com alta tensão de saída, mas é caro e pode produzir efeitos de fadiga. Eletromagnético é usado para baixas frequências e não requer uma fonte de tensão externa, mas é ineficiente na escala microeletromecânica (MEMS). Finalmente, a eletroestática tem uma boa tensão de saída, é eficaz para MEMS e tem uma longa duração, mas tem baixa potência na microescala.

O principal desafio enfrentado pelo avanço dessas tecnologias pode estar intimamente relacionado à geração de energia, que é considerada muito baixa. Por outro lado, para Rocha (2012), o custo energético da geração de energia em grande escala é alto (petróleo, carvão, etc.), enquanto a energia do sistema “energy harvesting” está amplamente disponível e gratuita.

As fontes do sistema energy harvesting, também conhecido como colheita de energia residual, são classificadas em dois grupos, fenômenos recorrentes no ambiente e fontes externas. (Rubio, 2018). A Figura 11 mostra a classificação destas fontes.

Figura 11 - Matriz energética Energy Harvesting.



Fonte: Adaptado de Rubio (2018).

Atentando para o escopo deste trabalho, é considerado apenas o uso de dispositivos piezoelétricos para conversão de energia por meio da conversão de energia eletromecânica. Em comparação com outros coletores, como energia solar ou térmica, o nível de energia gerado pela coleta de energia piezoelétrica é muito menor, cerca de nW a mW. No entanto, isso não deve ser visto como um problema, pois as pessoas devem estar cientes do fato de que, por exemplo, a energia solar e a eólica são fontes de energia intermitentes, por isso é necessário operar esses sistemas de forma complementar, em contrapartida, os piezoelétricos são dispositivos autônomos que independem de fatores climáticos para seu eficaz funcionamento.

3.4.1 PIEZOELETRICIDADE

De acordo com Coelho (2015), no final do século XIX, os irmãos Pierre e Jacques Curie ocasionaram a descoberta da piezoelectricidade ao observarem que alguns cristais naturais, como o quartzo, a turmalina, a calcita e a piritita apresentavam cargas positivas e

negativas em suas superfícies devido à compressão. Sendo assim, é produzida uma tensão elétrica pela estrutura do material proporcional à pressão mecânica submetida.

Segundo Rangel (2014), “piezein” é uma palavra grega, que significa “apertar” ou “pressionar”, e, a soma desta palavra com eletricidade resulta no título deste tópico em estudo, piezoeletricidade. Devido à deformação, ocorre o surgimento de cargas positivas em um dos lados dos cristais não condutores e cargas negativas nos lados opostos. Além disso, a tensão elétrica é considerada irresistível, pois ocorre a deformação em conformidade nos terminais do material.

Além disso, Mineto (2013) aclara que Gabriel Lippman, em 1881, deduziu matematicamente o efeito inverso que ocorre nos materiais citados quando uma tensão elétrica deriva da deformação mecânica do cristal. Segundo Mineto, os irmãos Curie não analisaram este efeito, após Lippman analisá-lo, os irmãos o concluíram experimentalmente.

De acordo com Perlingeiro, Pimenta e Silva (2016), no ano de 1910 Woldermar Voigt publicou o livro “Lehrbuch der Kristallphysik” que descreveu vinte diferentes classes de cristais naturais capazes de gerar correntes quando submetidos a pressões mecânicas, além da determinação das constantes piezoelétricas, a partir de análises tensoriais.

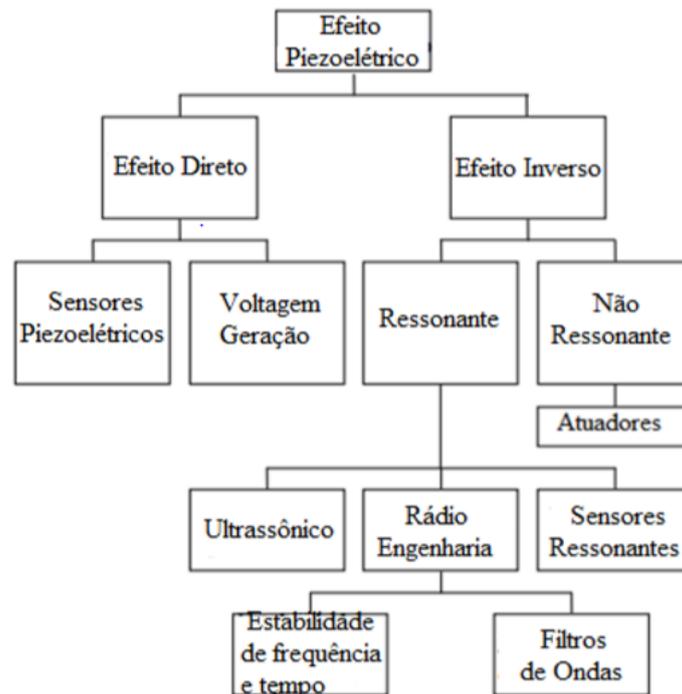
Conforme Galhardi (2010), os materiais piezoelétricos podem se originar de um campo elétrico a altas temperaturas, através da polarização dos materiais. Essa polarização ocorre pelo alinhamento parcial dos dipolos elétricos das propriedades microscópicas e macroscópicas, favorecendo o acoplamento eletromecânico do cristal. O resultado do acoplamento pode ser a deformação em resposta ao campo elétrico externo (efeito inverso), com capacidade de atuação, ou as forças mecânicas externas ao material influenciam na rotação dos dipolos (efeito direto), surgindo cargas elétricas.

Coelho (2015) aponta que outro fator determinante para caracterização dos materiais piezoelétricos é a temperatura de Curie - temperatura na qual o magnetismo permanente de um material se torna um magnetismo induzido -, a estrutura cristalina de materiais cerâmicos piezoelétricos, por exemplo, exibe simetria cúbica simples quando acima da temperatura de Curie, com a combinação das cargas positivas e negativas sem dipolos elétricos. Entretanto, quando a temperatura está abaixo de Curie, a simetria se apresenta tetragonal, com cargas positivas e negativas irregulares e dipolos elétricos internos.

De acordo com Tichy et al. (2010), todos os materiais piezoelétricos possuem constantes piezoelétricas (d) e dielétricas (ϵ) e a piezoeletricidade, em cristais sem centros de simetria, é a relação linear entre sistemas mecânicos e elétricos. Ademais, o efeito da piezoeletricidade direto é derivado de quando a polarização ocorre devido à deformação e o

efeito inverso, é ao contrário, quando se aplica um campo elétrico externo e o material se deforma. A Figura 12 exibe as diferenças das aplicações dos efeitos diretos e inversos.

Figura 12 - Aplicações técnicas dos efeitos da piezoeletrecidade.



Fonte: TICHÝ et al., 2010.

Segundo Ertuk, Hoffmann e Inman (2009) é necessário realizar pesquisas sobre o desenvolvimento dos materiais para entender os efeitos que ocorrem nos materiais, pois os fenômenos diretos e inversos coexistem normalmente em um mesmo material piezoelétrico. Com isso, termodinamicamente, é desconexo ignorar o efeito inverso, mesmo que a finalidade seja capturar energia através do efeito direto.

De acordo com Cellular (2016), os materiais inteligentes podem ser identificados através dos modelos de acoplamentos e suas utilizações específicas, como as “[...] ligas com memória de forma, materiais piezoelétricos, materiais magnetostrictivos e os fluidos eletro e magnetoreológicos [...]”. Os tipos de materiais adequados dependem da densidade de energia de atuação e da frequência de atuação do material. Os modelos de materiais mais eficientes são os cristais de quartzo e os piezocerâmicos, como o titanata zirconado de chumbo (PZT), que convertem 80% da energia mecânica em elétrica.

Todavia, repetidamente, Tichy et al. (2010) salientam que as propriedades dos materiais em aplicações sensoriais de força ou pressão são baixo custo de processo, coeficientes piezoelétricos elevados, resistência mecânica e rigidez, resistividade de isolamento elevada, estabilidade no tempo e ligação linear entre a força mecânica e a polarização elétrica. Uma vez que o propósito do processo é miniaturizar e automatizar o desempenho dos modelos, e, acima de tudo, reduzir o consumo de energia.

3.4.1.1 TIPOS DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Quando nos direcionamos aos tipos de materiais piezoelétricos podemos afirmar que eles existem em duas principais classes: os encontrados naturalmente (in natura) e os sintéticos. Os materiais encontrados em sua forma natural são denominados precursores das primeiras descobertas do fenômeno da piezoelectricidade, e são encontrados na forma de mineirais como cristais de quartzo, turmalina e sal de Rochelle (Lopes et al., 2014; Shepelin et al., 2019).

Os materiais classificados como piezo sintéticos são aqueles fabricados em laboratório, artificialmente. O desenvolvimento desses materiais artificiais se deu a partir da criação das cerâmicas piezoelétricas, naquela época a motivação foi feita devido ao trágico naufrágio envolvendo o memorável caso do navio Titanic, um novo sistema de segurança foi necessário, logo o primeiro sonar foi desenvolvido (Rubio, 2018). Assim, objetos sob a água podiam enfim ser detectados e sua posição determinada através de um sistema emissor e receptor ultrassônico a partir do efeito piezoelétrico (Uchino, 2017). Nos eventos seguintes, com a ocorrência da primeira e segunda grandes Guerras, houve a criação de outros materiais piezoelétricos com características distintas, tais como (Kao, 2004; Uchino, 2017):

- a) Piroelétrico: Indução de um potencial elétrico quando submetido a uma variação de temperatura;
- b) Ferroelétricos: Polarização espontânea que pode ser invertida com a aplicação de um campo elétrico externo. Exemplo: Niobato/Tantalato de Lítio ($\text{LiNbO}_3/\text{LiTaO}_3$, LN/LT);
- c) Cerâmicos: Transdutores de compressão. Exemplo: Titanato de Bário (BaTiO_3 , BT) e Titanato Zirconato de Chumbo ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$, PZT);

- d) Polímeros: Transdutores de deformação e/ou flexão. Exemplo: Difluoreto de Polivinilideno ((CH₂-CF₂)_n, PVDF);
- e) Compósitos: Piezo-compósitos são aqueles materiais piezoelétricos adaptados com propriedades físicas desejáveis a partir da união de dois materiais como, por exemplo, cerâmicos e polímeros.

Recentemente, o uso de dispositivos piezoelétricos aumentou muito devido ao alargamento substancial na automação e à atratividade dos consumidores para dispositivos complexos modernos. É comum encontrarmos aplicações destes materiais como transdutores, sensores, atuadores e, na atualidade, ele também está sendo empregado como dispositivo harvester, ou seja, coletor de energia. (Callister et al., 2012) (Hamlehdar et al., 2017).

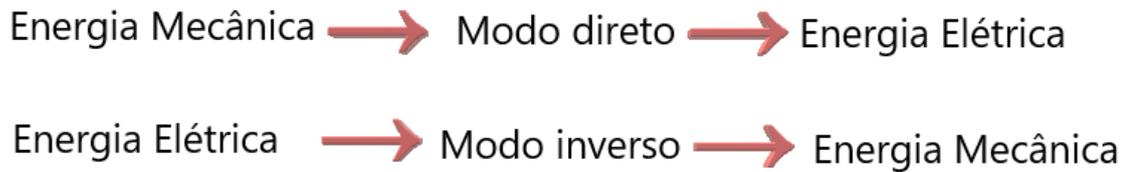
Dentre todas as opções de materiais piezoelétricos, as cerâmicas piezoelétricas são as que apresentam melhor desempenho na produção de energia. No entanto, seu tamanho e rigidez limitam sua aplicação na compressão, e isso nos leva aos polímeros piezoelétricos. Esses materiais são considerados materiais interessantes devido à sua alta flexibilidade, o que é propício à aplicação em sistemas baseados na energia do movimento de fluidos como água e vento, proporcionando assim maiores possibilidades de aplicação. (Lopes et al., 2014) (Shepelin et al., 2019)

Nesse tipo de sistema, o objetivo principal é utilizar a energia mecânica da vibração gerada pela interação entre o fluido e um determinado tipo de estrutura (acoplada ao feixe piezoelétrico) para fornecer energia ao sistema de baixo consumo de energia. (Shepelin et al., 2019)

3.4.1.2 PROPRIEDADES PIEZOELÉTRICAS

Segundo a pesquisa de Rocha (2014), a piezoelectricidade direta é determinada pela conversão de energia mecânica em energia elétrica, como em sensores, enquanto a piezoelectricidade inversa é determinada pela conversão de energia elétrica em energia mecânica, como em atuadores e transdutores. No entanto um material é composto por um sistema piezoelétrico, através de dois métodos físicos acoplados, o mecânico e o elétrico.

Figura 13 - Esquematização dos dois modos da piezoelectricidade.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Portanto, de acordo com Erturk e Inman (2011), esse efeito pode ser transformado a partir das duas equações simplificadas a seguir (Equação 1).

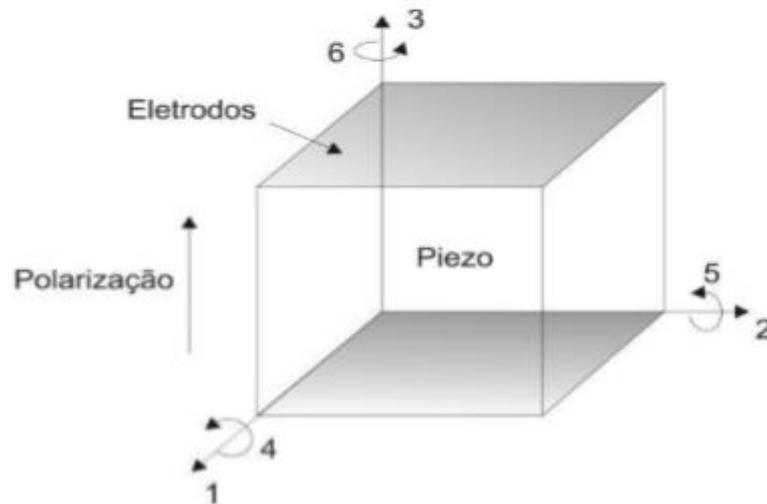
$$D = d\sigma + \kappa E$$

$$\varepsilon = s\sigma + dE \quad (1)$$

Fazendo a sondagem da Eq. 1 temos que a primeira linha descreve o efeito direto e a segunda linha o efeito inverso onde D (N/m) é o deslocamento elétrico e E (V/m) é o campo elétrico. A tensão mecânica é dada por σ (N/m²), a deformação é dada por ε (F/m), as propriedades elásticas por s (inverso da rigidez) e o coeficiente piezoelétrico e de permissividade são dados por d e κ (m/V) (Erturk; Inman, 2011).

Consoante a Perlingeiro, Pimenta e Silva (2016), os materiais piezoelétricos são isotrópicos, isso significa que as propriedades físicas dependem da direção. Desta forma a Figura 14 mostra que a combinação da direção positiva de polarização é geralmente definida para coincidir com a direção de z (eixo 3), já as direções de x e y (eixos 1 e 2, respectivamente) são aleatórios e as forças de cisalhamentos são caracterizadas por 4, 5 e 6. Essas direções são determinadas durante o processo de fabricação dos materiais.

Figura 14 - Os eixos de um material piezoelétrico.



Fonte: Perlingeiro; Pimenta; Silva, 2016.

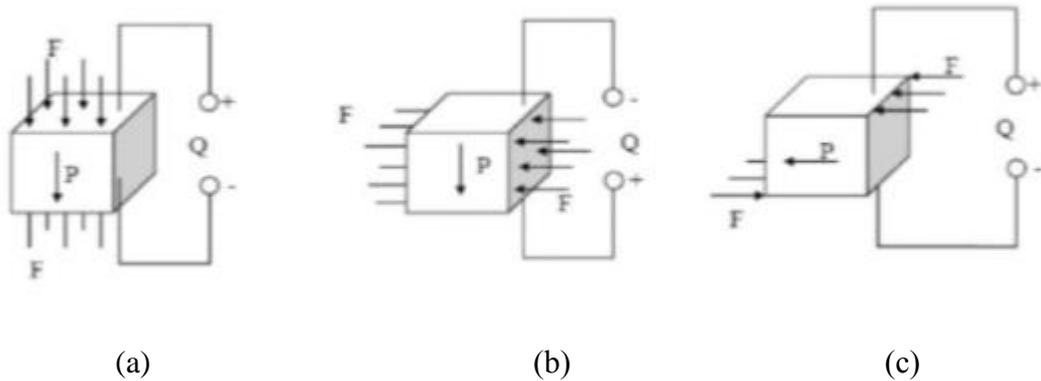
3.4.1.2 COEFICIÊNTE PIEZOELÉTRICOS

Em concordância com Rangel (2014) além do tipo, formato e tamanho dos materiais piezoelétricos, o modo de acoplamento também é crucial para a configuração ideal e a eficiência da coleta de energia. Desta forma, segundo Ikeda (1990) os coeficientes piezoelétricos são responsáveis pela correspondência da tensão elétrica com a tensão mecânica e as constantes dos campos elétricos, através da tensão mecânica, respectivamente. Ademais, segundo ele, perduram os coeficientes de acoplamento “d”, cognominados constantes de deformações, e os coeficientes piezoelétricos “g”, cognominados constantes de potenciais.

Além disso, Ikeda (1990) afirma que os coeficientes d_{ij} tem suas unidades expressas em $\frac{C}{N/m^2}$, porém se a força mecânica aplicada se dispersar por toda a área dos elétrons, as unidades de área descritas anteriormente se anulam e desta forma permanece apenas a unidade $\frac{C}{N}$ (Coloumb por Newton), já o coeficiente g_{ij} tem suas unidades expressas por $\frac{V/m}{N/m^2}$. As variáveis ij que acompanham os coeficientes representam o sentido da polarização por entre a força aplicada. A Figura 15 nos mostra as respostas das variáveis ij em seus diferentes modos.

O modo $ij = 33$ ocorre devido à tensão e a força aplicadas no mesmo eixo de polarização, o modo $ij = 31$ ocorre quando a tensão é aplicada no eixo da polarização e a força é aplicada no sentido perpendicular à polarização e o modo $ij = 15$ ocorre devido à tensão ser aplicada no sentido perpendicular ao eixo e a força de torção.

Figura 15 - Respostas das variáveis: $ij = 33$ (a); $ij = 31$ (b) e $ij = 15$ (c).



Fonte: IKEDA, 1990.

Ademais, Ikeda (1990) explana que além dos piezoelétricos possuírem os coeficientes “d” e “g”, também possuem o coeficiente “k” cognominado por coeficiente eletromecânico, este por sua vez representa a conversão da energia através de materiais piezoelétricos tanto da forma mecânica para a forma elétrica quanto da forma elétrica para a forma mecânica. Os subíndices (ij), neste caso são similares aos coeficientes “d” e “g” pois indicam a direção relativa das quantidades elétricas e mecânicas. A equação 2 representa a energia convertida e está diretamente relacionada com a energia mecânica armazenada fracionada pela energia elétrica fornecida.

$$k_{ij} = \sqrt{\frac{\text{energia mecânica armazenada}}{\text{energia elétrica fornecida}}} \quad (2)$$

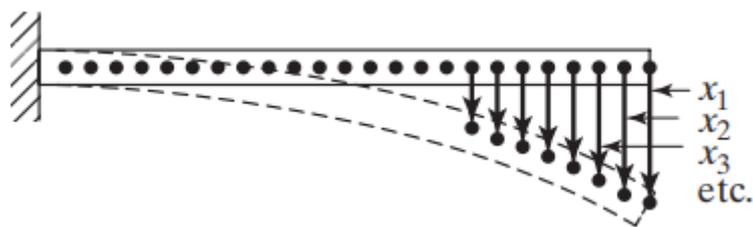
3.4.2 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

De acordo com Rao (2008) qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo recebe a denominação de oscilação ou vibração. Portanto, o sistema vibratório consiste em um espaço para armazenamento de energia potencial, outro espaço para armazenamento

de energia cinética e um terceiro espaço para perda contínua de energia. Além disso, a vibração de um sistema envolve a conversão alternada de energia potencial em energia cinética e vice-versa.

O sistema de vibração mecânica é composto por graus de liberdade. Portanto, Rao (2008) define esse fenômeno como o número mínimo de coordenadas independentes que definem as posições de todas as partes do sistema em um determinado momento. No caso da viga em balanço, o autor a define como um modelo elástico contínuo com graus de liberdade ilimitados para determinar a curva de deflexão elástica, pois a viga em balanço é composta por inúmeros pontos de massa.

Figura 16 - Representação de uma viga em balanço (infinitos graus de liberdade).



Fonte: RAO, 2008.

4 METODOLOGIA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presente seção apresenta os tipos de estudo e métodos aplicados na pesquisa, bem como o cronograma de atividades de forma a atingir os objetivos previamente definidos. O trabalho foi desenvolvido com um estudo exploratório por meio de uma revisão bibliográfica dos temas aqui trabalhados presentes em livros, teses, dissertações e artigos, visando oferecer informações relevantes acerca do objeto em estudo e orientar a inicial construção de um sistema inovador para fins de futura utilização em testes mais aprofundados a fim de motivar a execução do sistema em um pavimento real.

Em seguida, foi conduzido um estudo para a realização da construção de um protótipo de piso vibratório a fim de realizar breves experimentos e verificar sua saída de voltagem. O objetivo da construção do protótipo foi torna-lo dinâmico para que, futuramente,

se dê continuidade em seus experimentos podendo-se alterar suas configurações e dimensões para verificação de melhores resultados.

4.2 MÉTODOS

A etapa metodológica foi dividida entre a exploratória e de criação conjuntamente com experimental.

4.2.1 ETAPA EXPLORATÓRIA

Gil (2008) desenvolve uma proposta de metodologia para o estudo exploratório, tendo sido adaptada de forma a serem realizadas pesquisas nas bases de dados da CAPES, Scielo e Google Acadêmico. Utilizou-se a inserção de palavras chave como “sustentabilidade”, “energia”, “piezoeletricidade” e “pavimentos” a fim de possibilitar o acesso dos temas em livros, dissertações, artigos científicos, tanto nacionais como internacionais e patentes de pesquisas relatadas nos artigos pesquisados.

Para a seleção das fontes foram consideradas, como critério de inclusão, bibliografias que abordassem a transformação de energia mecânica em energia elétrica por meio do pavimento. Além disso, para não ocorrer à possibilidade de apresentação de dados defasados foi definido um período de busca de 10 anos, abrangendo os anos de 2010 a 2020. Após esse procedimento, partiu-se para a coleta de dados, seguindo a seguinte premissa:

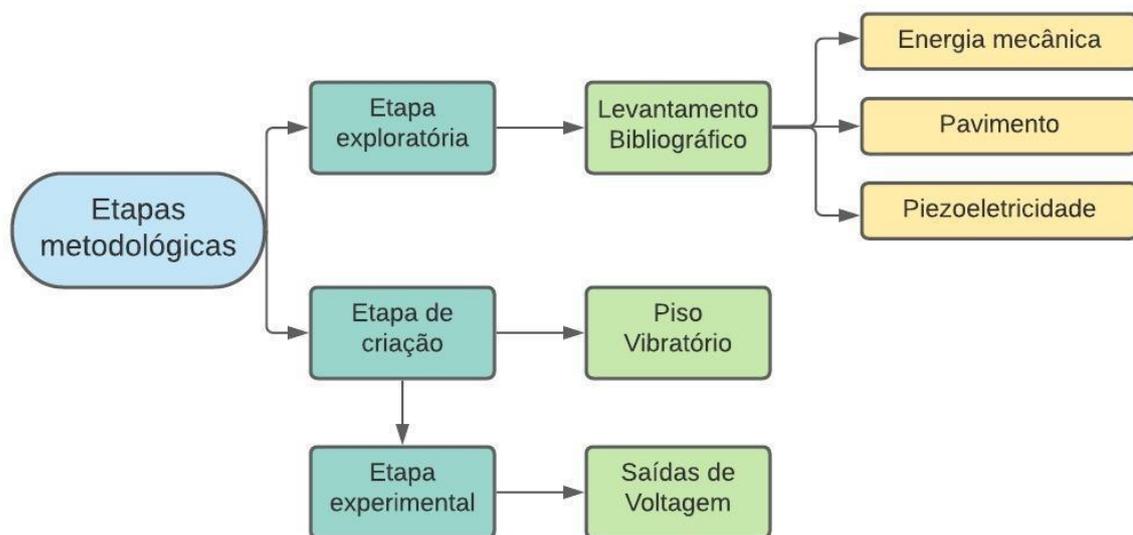
- a) leitura exploratória do material selecionado (leitura rápida que objetiva verificar se a obra consultada é de real interesse para o trabalho);
- b) leitura seletiva (leitura aprofundada das partes que realmente interessam);
- c) registro das informações relevantes extraídas das fontes em instrumento específico (autores, ano, método, resultados e conclusões).

Na seguinte etapa realizou-se a análise e interpretação dos resultados provenientes da pesquisa exploratória, sendo realizada uma leitura analítica com a finalidade de ordenar e resumir as informações contidas nas fontes, de forma que estas possibilitassem a obtenção de hipóteses de respostas ao problema central da pesquisa, a necessidade de novas fontes de energia com intuito de promover a sustentabilidade. Efetuou-se a discussão dos resultados a

partir das categorias que emergiram da etapa anterior, sendo analisadas e discutidas com base no referencial teórico da temática de estudo, abordando eficiência, disponibilidade e instalação. A fase final da pesquisa exploratória emerge diretamente na pesquisa experimental, permitindo assim o planejamento e a execução de um sistema viável e inovador.

As etapas metodológicas adotadas são apresentadas conforme o fluxograma da Figura 17.

Figura 17 - Etapas metodológicas aplicadas no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

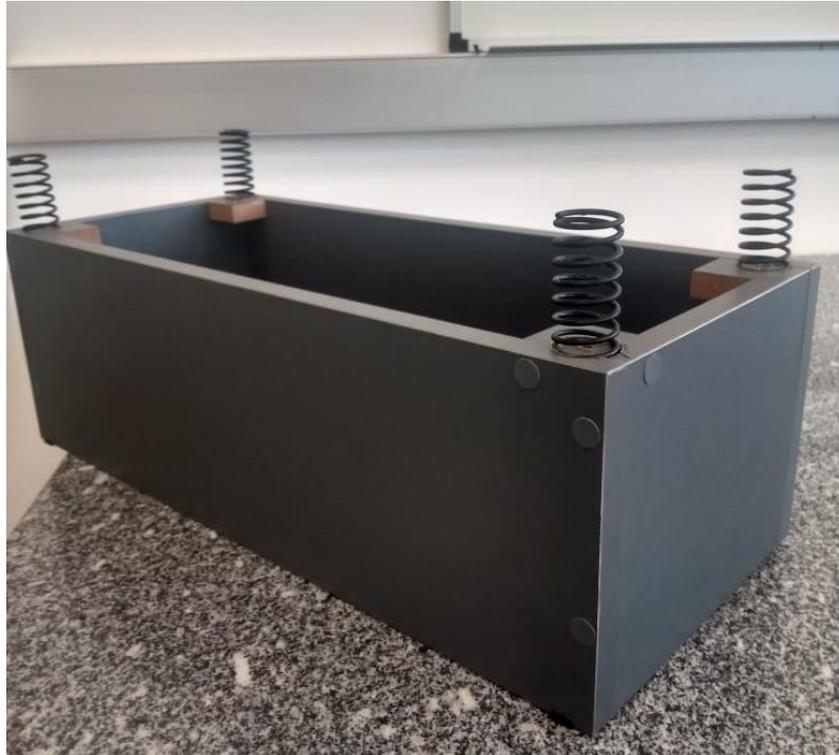
4.2.2 ETAPA DE CRIAÇÃO (Descrição do Sistema de Piso Vibratório)

O sistema piso vibratório foi desenvolvido a partir do modelo proposto por D. Isarakorn et al. e este é composto por duas estruturas distintas: o sistema de suporte e o sistema vibracional.

Para a confecção estrutural do suporte foi utilizada uma caixa em material MDF com dimensões de 30x26x60cm contendo quatro paredes fechadas tendo seu interior esvaziado para a melhor movimentação da viga em balanço. Esta estrutura também consta com um total de quatro molas de aço inox definidas para o sistema desenvolver sua vibração máxima, sendo

este conjunto caixa-mola designado suporte da superfície vibratória. Na Figura 18 é possível visualizar o sistema caixa-mola em tamanho real.

Figura 18 - Sistema de suporte designado caixa-mola.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O sistema vibracional ou superfície vibratória (Figura 19) é considerada como uma parte móvel, que é configurada para se mover na direção vertical - para baixo quando pisada e para cima quando a mola a empurra. É composta por uma chapa de material MDF de 30x65cm de dimensão utilizada para dar sustentação ao peso exercido sobre ela, e fixada nesta há uma chapa metálica de 2,5mm de espessura onde é soldado um suporte vertical que segura uma das extremidades da régua metálica, assim tornando-a uma viga em balanço. Na outra extremidade é inserida em uma massa de prova de 35,15g que é utilizada para induzir a deflexão inicial da viga em balanço e aumentar a deformação mecânica no material piezoelétrico conforme o sistema oscila. O valor da massa foi obtido através da pesagem em uma balança analítica (AD 500-R) com precisão de $\pm 0,001g$. A régua metálica possui 2,0mm de espessura e 30 cm de comprimento a fim de ter uma rigidez suficiente para sofrer vibrações que possam gerar uma saída significativa de voltagem. A parte inferior da superfície vibratória também conta com um objeto fixo que possui o papel de impactar-se

com o centro da viga em balanço a fim de ocasioná-la vibrações mais intensas e consequentemente aumentar a tensão gerada pelo piezoelétrico.

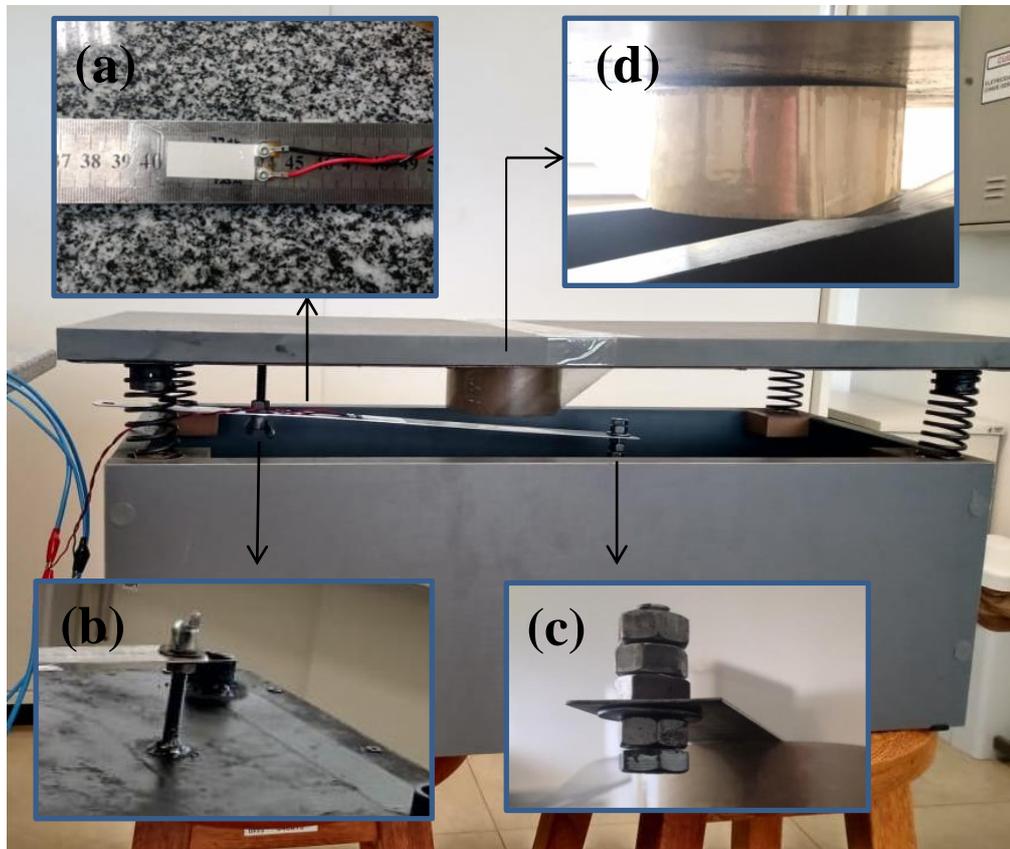
Figura 19 - Sistema móvel designado superfície vibratória.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

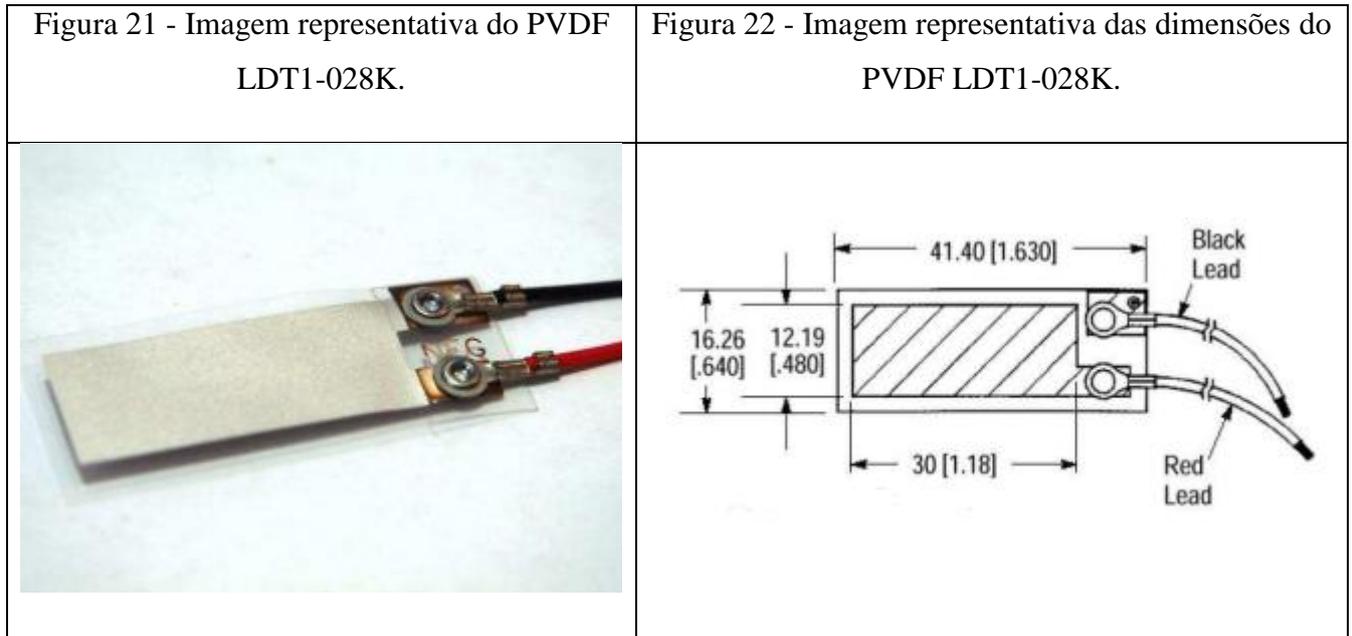
O material piezoelétrico LDT1-028K por sua vez detém-se acoplado ao extremo inferior da viga em balanço, para que, no momento em que houver uma força exercida pelos passos humanos sobre a superfície vibratória, o material piezoelétrico juntamente com a viga em balanço sofra tensão mecânica e consequentemente se deforme e passe a gerar sinais elétricos. Salientando que, de acordo com a literatura o aumento da tensão mecânica no material piezoelétrico leva a um aumento na produção de energia elétrica. A Figura 20 ilustra o sistema vibratório acoplado ao sistema de suporte.

Figura 20 - Sistema de piso vibratório detalhado. (a) acoplamento do piezoelétrico; (b) suporte vertical; (c) massa de apoio; (d) objeto de impacto.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O dispositivo piezoelétrico empregado no protótipo foi o sensor multiuso de detecção de impacto ou vibração mecânica PVDF LDT1-028K PIEZO SENSOR (MEAS TE connectivity) que apresenta suas dimensões de 41,1 mm de comprimento, 16,26 mm de largura e 1,56 mm de espessura sendo laminado em folha de poliéster (Mylar).



Fonte: TE SENSOR SOLUTIONS

A Tabela 1 traz uma série de informações gerais que dizem respeito às propriedades deste material, sendo elas densidade e constantes piezoelétricas.

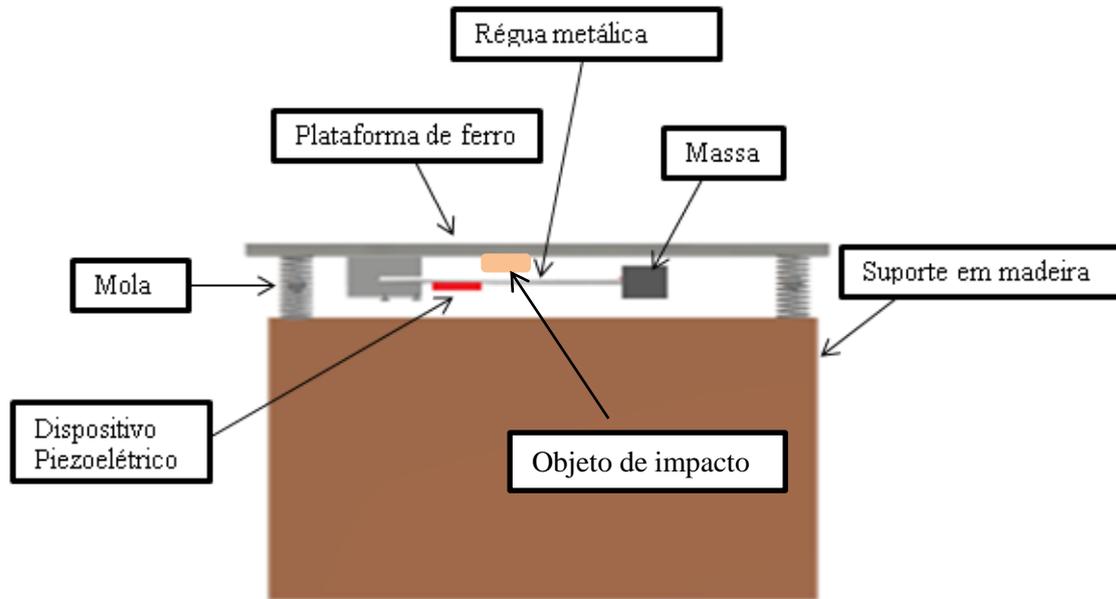
Tabela 1 - Propriedades do Piezo PVDF LDT1-028K.

Propriedade	Unidade	Valor
Densidade	(10^3) kg/m ³	1,78
Constante d31 e d33	(10^{-12}) C/N	23 e -33
Constante g31 e g33	(10^{-3}) Vm/N	216 e -330
Constante k31	% at 1 KHz	12

Fonte: Adaptado de TE SENSOR SOLUTIONS.

Os coeficientes piezoelétricos de carga e voltagem, $d_{i,j}$ e $g_{i,j}$, possuem dois subscritos pois como a película do piezo é fina, os eletrodos são aplicados somente nas suas superfícies superior e inferior. Por outro lado, o fator de acoplamento eletromecânico ($k_{i,j}$) é um número adimensional que tem como função relacionar a energia convertida de saída com a energia total de entrada sendo assim uma designação direta da intensidade do efeito eletromecânico. (R. T. Rocha, 2012)

Figura 23 - Representação esquemática do coletor de energia “passarela piezeoelétrica”.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.2.3 ETAPA EXPERIMENTAL

Os experimentos foram inteiramente conduzidos em bancada, no Laboratório de Eletromagnetismo da Universidade Federal da Fronteira Sul, campus Cerro Largo - RS.

Devido às condições adversas aos anos de 2020 e 2021, sendo elas a pandemia mundial devido ao Corona Vírus, os experimentos tiveram que ser limitados, não podendo assim tornar o sistema otimizado de forma que gere sua máxima voltagem. Desta forma, utilizando o sistema com todas as dimensões e características citadas anteriormente elencou-se um voluntário de aproximadamente 60 kg que pudesse exercer movimentos que simulassem passos lentos, médios e acelerados sobre a plataforma vibratória e posteriormente observou-se as saídas de voltagem geradas pelo movimento oscilatório que a viga em balanço realiza sobre o piezeoelétrico quando o sistema está acionado. O voluntário selecionado possui uma massa de 60 kg e para cada etapa realiza diferentes números de impactos por segundo sobre a plataforma. O número de impactos em função do tempo foi medido com o auxílio de

um cronômetro digital INS-1338. A relação dos movimentos em função do tempo é exposta na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação do número de impactos realizados em função do tempo.

Simulação	Tempo de base (s)	Impactos (n)	Número de impactos em função do tempo (n/s)
Passos de caminhada lenta (M1)	24	45	1,8
Passos de caminhada média ou normal (M2)	24	60	2,5
Passos de corrida (M3)	24	100	4,2

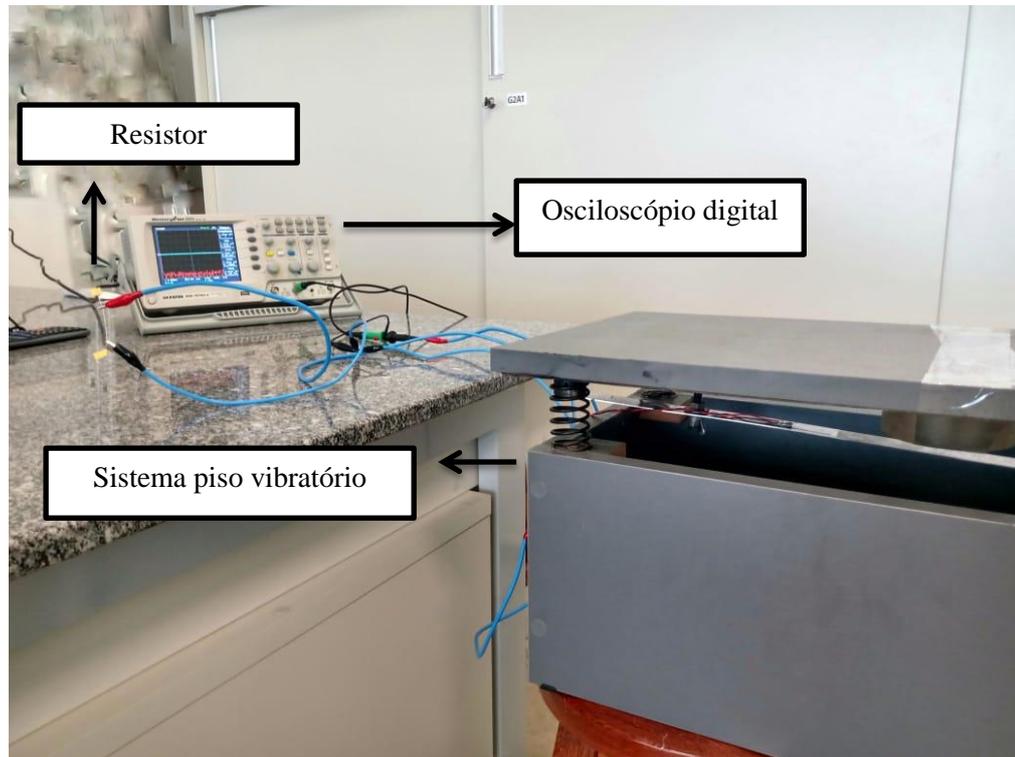
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A literatura propõe após a construção do protótipo de viga em balanço à conexão de um resistor para medir a potência, a energia de saída e a tensão transiente de saída a fim de calcular a potência de saída e a realização dos cálculos que envolvem a geração de energia, e o uso de um osciloscópio de gravação para capturar as oscilações da viga em balanço. (Isarakorn, 2019)

Desta forma os sinais de tensão foram registrados por um osciloscópio digital (GDS 1000 A) com os terminais de prova conectados a uma resistência de 5,6 M Ω em série com o PVDF.

A Figura 24 ilustra o sistema piso vibratório conectado ao resistor e ao osciloscópio de gravação.

Figura 24 - Sistema experimental piso vibratório.



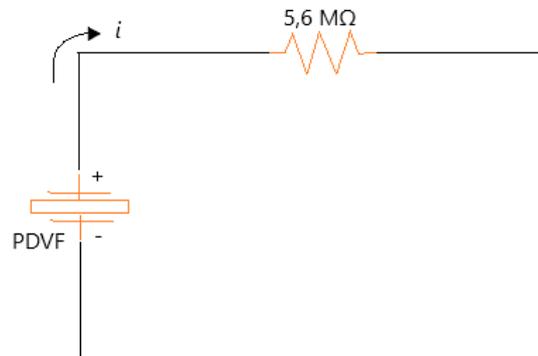
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

De acordo com Halliday E Resnick (2012), um resistor é adicionado a um circuito com o intuito de, através da resistência elétrica, analisar as características e as propriedades de materiais em estudo. Com o intuito de investigar o desempenho do sistema piso vibratório contendo o dispositivo PVDF, os terminais de tensão do transdutor foram conectados em série junto a um resistor de carga nominal de 5,6 M Ω . Na Figura 25 é apresentado o diagrama esquemático do circuito utilizado.

Figura 25 - Circuito elétrico utilizado para a determinação da potência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para fazer o registro dos picos de tensão utilizou-se um osciloscópio de armazenamento digital (GDS 1000 A). Em cada seção experimental, foi considerado um tempo de no mínimo um minuto para garantir uma saída de tensão mais regular, ou seja, para registrar as medidas realmente representativas em cada situação. Os experimentos foram realizados em quintuplicata para cada simulação de passos, primando pela insuspeição dos resultados obtidos.

Existem inúmeras maneiras de calcular a potência produzida por um sistema. Para Halliday e Resnick (2012), os circuitos elétricos são compostos de resistores, capacitores e indutores, responsáveis por realizar trabalhos sobre portadores de cargas e manter uma diferença de potencial entre os terminais, fornecendo energia elétrica. Dessa forma pode-se calcular a corrente elétrica (i) através da equação 3, salientando que, quanto maior a resistência R , menor a corrente (i).

$$i = \frac{V}{R} \quad (\text{Eq. 3})$$

Neste caso i é dado em ampères (A), V é dado em volts (V) e R é dado em ohms (Ω).

Por conseguinte, Halliday e Resnick (2012), afirmam que levando em consideração a lei da conservação da energia, pode-se calcular a potência (P) em circuitos elétricos. Sendo assim, a potência é a taxa de transferência de energia elétrica, sua unidade é expressa em watts (W) e pode ser observada na equação 4.

$$P = iV \quad (\text{Eq. 4})$$

Desta forma, fazendo a assimilação das equações 3 e 4 chegamos à equação 5, assim podendo-se calcular a potência de forma rápida e descomplicada.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (\text{Eq. 5})$$

A tensão eficaz (VRMS) foi estimada instantaneamente com a sonda do osciloscópio conectada a uma resistência à carga (R) de 5,6 MΩ. Desta forma, pode-se calcular a potência gerada pelo sistema.

As tensões eficazes e a potência gerada em cada simulação são apresentadas nas Tabela 3 a 5.

A Tabela 3 traz informações de Tensão eficaz (VRMS) e Tensão de pico (VPP) geradas a partir dos ensaios simulando passos humanos à baixa velocidade (M1), tendo suas especificidades explanadas na Tabela 2.

Tabela 3 - Tensões obtidas a partir da simulação M1.

Ensaio	Simulação	VRMS (V)	VPP (V)
1	M1	0,963	6,80
2	M1	0,776	5,36
3	M1	1,25	4,71
4	M1	1,08	4,23
5	M1	0,764	4,55
Média		0,967	5,13

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Interpretando os dados da Tabela 3 pode-se perceber que a tensão eficaz gerada pelo piezoelétrico acoplado à viga em balanço a partir da execução de passos lentos sobre a superfície vibratória está em torno de 1V enquanto a tensão de pico chega aos 6,8 V.

A Tabela 4 traz informações de Tensão eficaz (VRMS) e Tensão de pico (VPP) geradas a partir dos ensaios simulando passos humanos à média velocidade (M2), tendo suas especificidades explanadas na Tabela 2.

Tabela 4 - Tensões obtidas a partir da simulação M2.

Ensaio	Simulação	VRMS (V)	VPP (V)
1	M2	1,63	6,88
2	M2	1,34	7,36
3	M2	1,09	7,76
4	M2	1,05	7,36
5	M2	0,976	7,51
Média		1,217	7,374

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Fazendo a interpretação da Tabela 4 pode-se perceber que a tensão eficaz gerada pelo piezoelétrico acoplado à viga em balanço a partir de simulações de passos médios (caminhada normal de um ser humano) chega em torno de 1,3 V enquanto a tensão de pico gerada chega em torno de 8V.

A Tabela 5 traz informações de Tensão eficaz (VRMS) e Tensão de pico (VPP) geradas a partir dos ensaios simulando passos humanos à alta velocidade (M3), tendo suas especificidades explanadas na Tabela 2.

Tabela 5 - Tensões obtidas a partir da simulação M3.

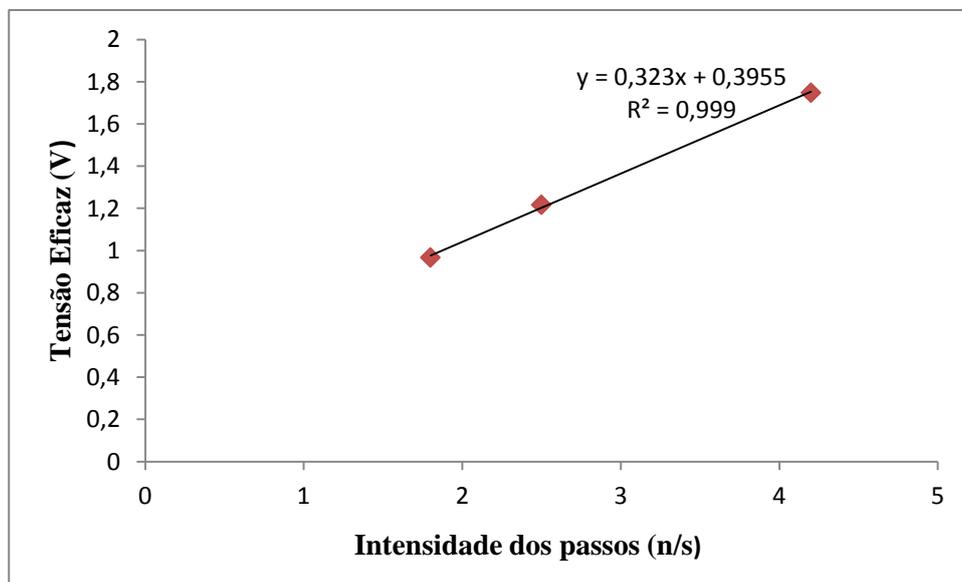
Ensaio	Simulação	VRMS (V)	VPP (V)
1	M3	1,99	11,6
2	M3	1,63	10,3
3	M3	1,92	10,8
4	M3	1,51	10,1
5	M3	1,89	10,8
Média		1,788	10,72

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Interpretando os dados da Tabela 5 pode-se perceber que o piezoelétrico acoplado à viga em balanço sofrendo tensões mecânicas a partir de simulações de passos humanos em forma de corrida chegam a gerar uma tensão elétrica eficaz de aproximadamente 2V enquanto sua tensão elétrica de pico chega na faixa dos 12 V. Com isso se chega a conclusão de que para as simulações de passos lentos sob a superfície vibratória a saída de voltagem encontra-se inferior às simulações à passos médios e assim também observa-se que estas encontram-se

inferiores às voltagens obtidas através das simulações à passos rápidos ou de corrida. Da mesma forma pode-se observar que a diferença de saída de voltagem encontra-se maior quando temos as situações de caminhada e corrida, sendo a simulação de corrida a maior geradora tanto de tensão eficaz quanto de tensão de pico. Desta forma, se confirma a hipótese de que, quanto maior a tensão mecânica aplicada ao piezoelétrico, maior a sua geração de tensão elétrica. O Gráfico 1 traz a confirmação das hipóteses descritas anteriormente trazendo uma correlação linear (R^2) com 99% de confiança.

Gráfico 1 - Tensão eficaz do sistema para diferentes simulações.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A partir da leitura de voltagens obtidas pelo sistema, com aplicação à equação 5, tem-se a potência gerada a partir das diferentes intensidades de passos humanos.

Tabela 6 - Potência desenvolvida pelo sistema.

Simulação	Voltagem Média (V)	Carga Resistiva (Ω)	Potência (W)
M1	0,967	$5,6 \times 10^6$	$1,669 \times 10^{-7}$
M2	1,217	$5,6 \times 10^6$	$2,645 \times 10^{-7}$
M3	1,788	$5,6 \times 10^6$	$5,722 \times 10^{-7}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As imagens capturadas pelo osciloscópio de gravação encontram-se registradas em anexo com a finalidade de apresentação dos resultados obtidos.

5.2 ANÁLISE EXPLORATÓRIA

A análise exploratória possui um caráter técnico e avaliativo das tecnologias de geração de energia abordadas no presente trabalho, sendo utilizadas variáveis como a energia captada, a densidade de potência, a eficiência de conversão e como funciona a geração de energia da tecnologia em condições ambientes de operação.

Na Tabela 7 estão reunidos os melhores resultados alcançados por alguns autores de acordo com a tecnologia de geração de energia a partir do pavimento e a configuração proposta, para que possamos fazer um comparativo entre resultados no presente estudo e demais autores.

Tabela 7 - Análise comparativa de regiões que estudam o uso do piezoelétrico em pavimentos.

Tecnologia	Empresa ou instituição de pesquisa	Método de instalação	Quantidade de energia gerada
Energia Mecânica	Instituto Coreano de Ciência e Tecnologia	Instalado de forma vertical na estrutura do pavimento	$200 \times 10^{-3} \text{ W}$
Energia Mecânica	Universidade de Oklahoma	Na estrutura do pavimento	$5,5 \times 10^{-7} \text{ W}$
Energia Mecânica	Instituto de Tecnologia de Bangkok	Embutido na estrutura do pavimento	$8,2 \times 10^{-4} \text{ W}$
Energia Mecânica	Universidade Florestal de Pequim	Na estrutura do pavimento	$5,7 \times 10^{-3} \text{ W}$
Energia Mecânica	Universidade do Texas	Embutidos na estrutura do pavimento	$3,5 \times 10^{-3} \text{ W}$
Energia Mecânica	Instituto Politécnico da Virgínia	Sem informações	$3,0 \times 10^{-4} \text{ W}$
Energia Mecânica	Universidade Federal da Fronteira Sul	Embutido na estrutura do pavimento na forma horizontal	$5,7 \times 10^{-7} \text{ W}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A Tabela 7 nos revela que os resultados alcançados no presente estudo ficaram muito próximos aos alcançados por alguns autores, chegando a superá-los, como é o caso de D.

Baldwin et al. da Universidade de Oklahoma. Por outro lado, ainda muito distante dos resultados obtidos por Ross et al. da Universidade Florestal de Pequim, A. Papagiannakis et al. da Universidade do Texas e I. Jung et al. do Instituto Coreano de Ciência e Tecnologia. É evidente que alguns fatores inerentes das condições limitadas de estudo podem ter levado a resultados um pouco mais modestos, levando em conta os materiais utilizados para a construção do protótipo, a não determinação da resistência à carga ótima para o circuito empregado e o uso de apenas um piezoelétrico gerador de tensão, fatores esses que podem vir a ser considerados em estudos futuros.

6 CONCLUSÕES

Alternativas para a aplicação de tecnologia para gerar eletricidade a partir de materiais piezoelétricos têm sido implementadas em pequena escala, a partir de pesquisas em laboratório. À medida que a população cresce, aumenta o consumo de energia e, para isso, este estudo utiliza fontes alternativas de captação para substituir pequenas quantidades de energia. Além da possibilidade de ser considerada uma energia limpa, esse tipo de aplicação também apresenta menor consumo de energia, pode ser utilizada por cidades locais e comunidades remotas e pode utilizar as vibrações ocasionadas pelos passos humanos como fonte de energia.

O presente trabalho foi desenvolvido em forma experimental e teve como objetivo a coleta de energia utilizando as vibrações de um polímero piezoelétrico de LDT0-MEAS acoplado à uma viga em balanço sendo acionada a partir do movimento de passos humanos sobre uma superfície vibratória, sendo realizadas três simulações com intensidades de passos distintas. As saídas de voltagens foram capturadas em um osciloscópio de gravação para posterior cálculo da energia potencial.

A máxima tensão efetiva observada no estudo foi registrada pela simulação a passos de corrida (M3), com 1,8 V de tensão e uma potência de saída de $5,7 \times 10^{-7}$ W. Por outro lado, a simulação a passos de caminhada lenta apresentou resultados menos expressivos, na ordem de 0,9 V e $1,6 \times 10^{-7}$ W de tensão e potência, respectivamente, com isso pode-se concluir que quanto mais intenso o movimento for feito sobre a superfície vibratória, maior é a tensão gerada pelo piezoelétrico. Para melhorar o desempenho do sistema acredita-se que, neste caso, a opção de acoplar mais de um material piezoelétrico na viga em balanço seja uma alternativa para maior geração de energia, porém, a coleta de energia através de um ou mais polímeros piezoelétricos, de acordo com as configurações apresentadas de LDT0-MEAS, estaria ainda muito longe da produção em grande escala, devido à baixa saída de energia potencial. Além disso, as considerações econômicas seriam impraticáveis pelo custo da utilização de milhares destes materiais, mas, por outro lado poderiam ser dimensionados para algumas aplicações que necessitam de quantidades menores de energia.

Por fim, como sugestão de trabalhos futuros sugere-se estudos que acoplem mais de um piezoelétrico e assim se verifique a possibilidade de instalação de calçadas piezoelétricas

para sanar o problema de iluminação das calçadas que dão acesso a UFFS Campus Cerro Largo, uma vez que isto demandaria uma baixa quantidade de energia.

REFERÊNCIAS

- A.C.S. Cellular. **“Análise da influência de efeitos não-lineares em sistemas de colheita de energia baseados em vibração utilizando materiais piezoelétricos.”**. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica-COPPE, Rio de Janeiro, 2016.
- A. Erturk; D. J. Inman. **An Experimentally Validated Bimorph Cantilever Model for Piezoelectric Energy Harvesting From Base Excitations**. Smart Materials and Structures, v. 18, p. 1-20, 2009.
- A. Erturk; J. Hoffmann; D.J. Inman. **“A piezomagnetoelastic structure for broadband vibration energy harvesting.”** Journal Applied Physics Letters, v.94, n. 25. Estados Unidos, 2009.
- A.C. Gil. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- A.C. Do Nascimento e J.P. Félix. **Sistema de energy harvesting empregado a estruturas bioinspiradas usando dispositivo piezoelétrico pvdf**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária. Cerro Largo, 2019.
- A.C. Lopes; P. Martins; S. L. Mendez. **Polímeros piezoelétricos: caraterísticas, aplicações, perspectivas**. Publicado e gazeta de física, 2014.
- Agência Nacional de Transportes Terrestres ANTT. **Estratégias de eficiência energética em praças de pedágio rodoviário**. Relatório Final de Pesquisa RDT ANTT, Triunfo|CONCEPA. [s.l]. 2018. Disponível em: http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/2018/08/22/Relatorio_Final.pdf. Acesso em: 10 ago. 2020
- A.J. Rubio. **Análisis del estado actual de la tecnología Energy Harvesting (Recolectores de energía) basados en piezoelectricidad**. Trabalho de conclusão de curso, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica - Tecnología en Electricidad Bogotá D.C., Colombia 2018.
- A. Papagiannakis et al. **Energy Harvesting from Roadways**. Procedia Computer Science, v. 83, p.750-766, 2016. Elsevier BV
- A.T. Mineto. **“Geração de energia através de vibração estrutural de dispositivos piezoelétricos não-lineares”**. Tese de Doutorado em Dinâmica de Máquinas e Sistemas – Universidade de São Paulo, Curso de Pós-Graduação em Ciências, Rio Claro (SP), 2013.
- A.O. Schonarth e J. P. Félix. **Geração de energia limpa através de materiais piezoelétricos poliméricos e do vento**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental. Cerro Largo, 2017.

B.C.Mota. **O pavimento como instrumento de geração de energia para o desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes**. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil. Fortaleza, 2019.

D. Halliday; J. Resnick. Oscilações. In: _____. **Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. cáp. 15, p. 88-106.

D. Halliday; J. Resnick. Corrente e Resistência. In: _____. **Fundamentos de física: eletromagnetismo**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. cáp. 26, p. 133151.

D. Isarakorn, S. Jayasvasti, P. Panthongsy, P. Janphuang and K. Hamamoto. **Design and Evaluation of Double-Stage Energy Harvesting Floor Tile**. Bangkok Institute of Technology. August, 2019.

D. Baldwin et al. **Energy harvesting on highway bridges**. Oklahoma Department Of Transportation, Oklahoma, v. 1, n. 1, p. 01-25. 2011.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Cenários de Demanda para o PNE 2050**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-202/Cen%C3%A1rios%20de%20Demanda.pdf>. Acesso em: 10 de agosto 2020.

F. Cottone et al. **Nonlinear Kinetic Energy Harvesting**. Journal Elsevier. Itália, v. 7, p.190-192. Dezembro, 2011.

F. Cottone. **Vibration Energy harvesting: non-linear approaches**, 2014.

H. Zhao; J. Yu; J. Ling. **Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement**. Journal of the Ceramic Society of Japan. Tokyo, p. 909-915. Agosto, 2010.

H. Xiong. **Piezoelectric Energy Harvesting for Public Roadways**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2014.

I. Jung et al. **Flexible piezoelectric polymer-based energy harvesting system for roadway applications**. Applied Energy, [s.l.], v. 197, p.220-231. 2017. Elsevier BV.

J. Tichý, et al. **“Principles of Piezoelectricity”**. In: _____. Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials. 1. ed., Berlin Heidelberg, 2010. p. 01-15.

J. P. Félix et al. **Um novo protótipo de gerador piezolétrico de energia sujeito a uma excitação não-ideal e modos de saturação**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2014.

J. Kan; R. J. Ross; X. Wang; W. Li. **Energy Harvesting from Wood Floor Vibration Using a Piezoelectric Generator**. United States Department of Agriculture, Abril, 2017.

K. C. Kao. **Ferroelectrics, Piezoelectrics, and Pyroelectrics**. 2004, Dielectric Phenomena in Solids With Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes, Pages 210-281.

K. Uchino. Chapter 1 - **The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective**. Advanced Piezoelectric Materials (Second Edition), Science and Technology, Woodhead Publishing in Materials, p. 1 – 90, 2017.

L. B. Kong et al. **Waste Mechanical Energy Harvesting: Piezoelectric Effect**. In: BING, Ling et al. Waste Energy Harvesting. Capítulo 2. p. 20-130. Berlim Heidelberg: Springer US, 2014.

L. R. Damke e J.P. Félix. **Análise da eficiência energética do material polímero piezoelétrico: um novo conceito de energias renováveis**. Dissertação de Mestrado em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis. Cerro Largo, 2019.

M.A. Galhardi. **“Guia de power harvesting: história, evolução e fundamentos”**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Curso no Departamento de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, 2010.

M.A.J. Coelho. **“Avaliação e análise de um sistema de micro geração de energia baseado no efeito piezoelétrico”**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 2015.

M. Hamlehdar; A. Kasaeian; M. Safaei. **Energy harvesting from fluid flow using piezoelectrics: A critical review**. 2019, Renewable Energy.

M. Safaei; H. A. Sodano; S. R. Anton. **A review of energy harvesting using piezoelectric materials: State-of-the-art a decade later**. Smart Materials and Structures, 2019.

M. A. Galhardi. **Guia de power harvesting: história, evolução e fundamentos**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Curso no Departamento de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, 2010.

N. A. Shepelin; A. M. Glushenkov; V. C. Lussini; P. J. Fox; G. W. Dicoski; J. G. Shapter; A. V. Ellis. **New developments in composites, copolymer technologies and processing techniques for flexible fluoropolymer piezoelectric generators for efficient energy Harvesting**. 2019, Energy Environmental Science.

N. Soin. **Magnetic Nanoparticles—Piezoelectric Polymer Nanocomposites for Energy Harvesting**. Magnetic Nanostructured Materials, Capítulo 10, p.: 293–320, 2018.

R. T. Rocha. **Colheita de energia usando dispositivos baseados em materiais piezoelétrico**. Trabalho de Conclusão de Curso em Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho, Curso de Graduação em Física, Rio Claro (SP), 2012.

R. T. Rocha. **Comportamento Dinâmico Não-Linear em Fenômenos de Colheita de Energia usando Dispositivos baseados em Materiais Piezoelétricos em Estruturas Aperticadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Paulo, 2014.

R.F. Rangel. **Caracterização de uma célula tubular piezoelétrica para geração de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal da Paraíba – UFPB. João Pessoa, 2014.

R. Perlingeiro; G.M. Pimenta; S.E. Silva. **“Geração de energia através de materiais piezoelétricos”**. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Curso de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2016.

S. R. Anton; H.A. Sodano. **A review of power harvesting using piezoelectric materials**. Smart materials and Structures, v. 16, 2007.

S. Roundy; P.K. Wright; J. Rabaey. **A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes**. Computer communications, v. 26, 2003.

S. S. Rao. **Vibrações mecânicas**. In: _____. Fundamentos de vibrações. 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. Capítulo 1. p. 01 – 45. 2008

T. Kazmierski; S. Beeby. **Energy harvesting systems**. Janeiro, 2011.

T. Ikeda. **Thermodynamic aspects of electromechanical interaction and piezoelectric relations**. In: _____. Fundamentals of piezoelectricity. University Tohoku, Japan, 1990, Capítulo 2, p. 05-50.

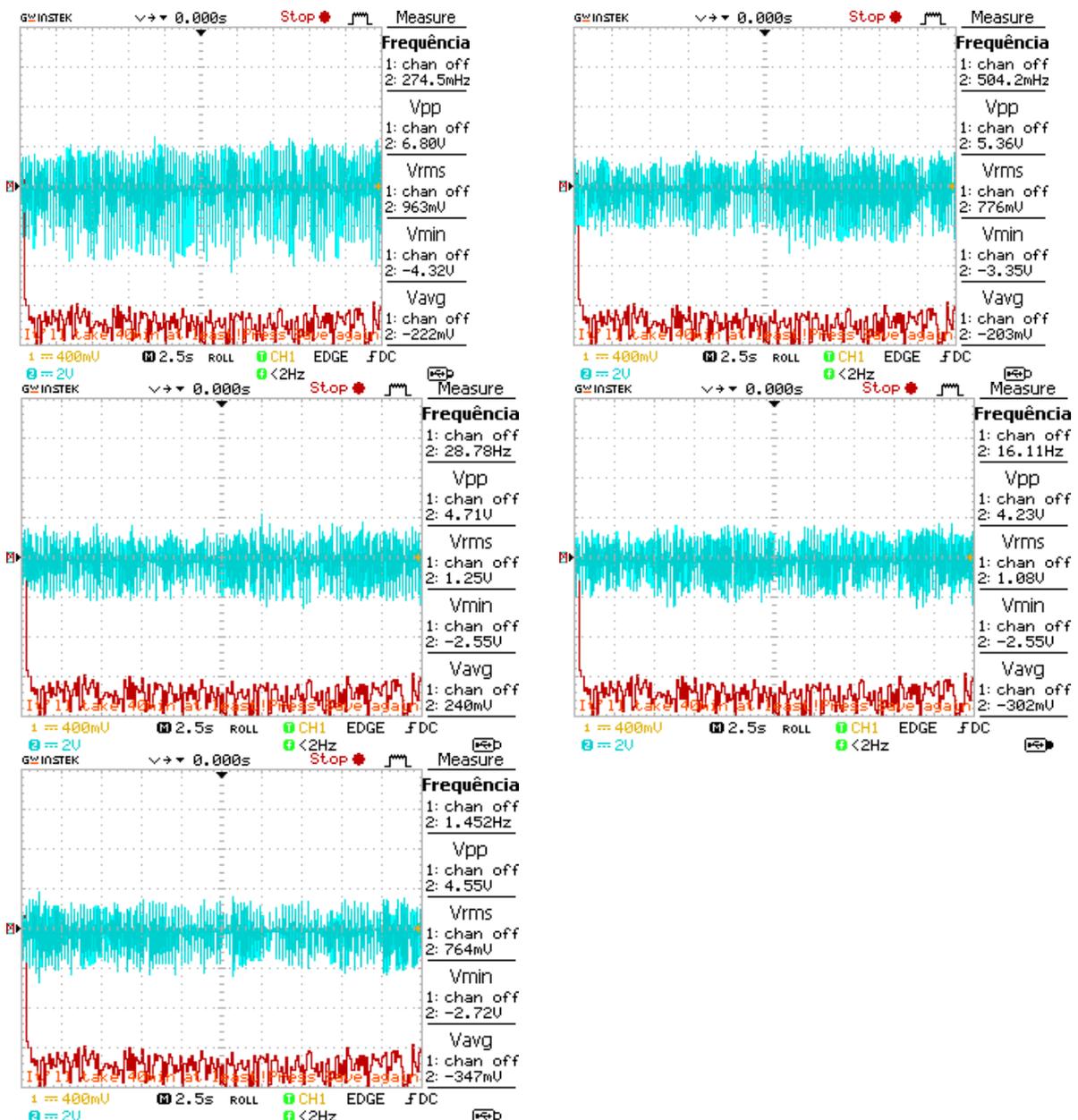
V. C. Santos. **Aplicação de Sistemas de Geração de Energia nos Pavimentos Rodoviários**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

ANEXO

ANEXO A – Saídas de tensões capturadas pelo osciloscópio de gravação.

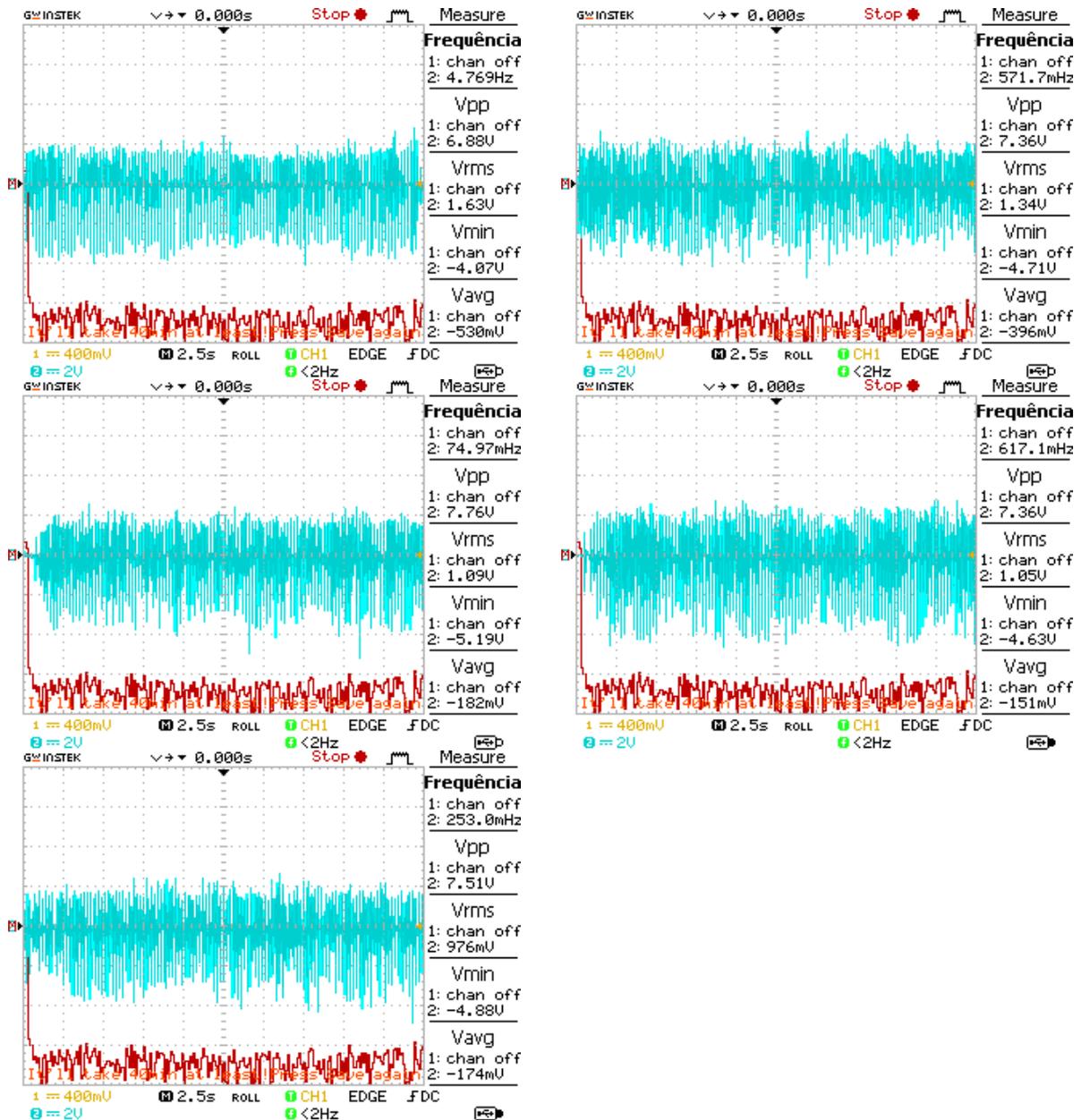
As respostas de saídas de voltagens capturadas pelo osciloscópio digital para todas as simulações experimentais realizadas nesse trabalho de conclusão de curso (TCC) são apresentados da Figura 26 à Figura 28. Ademais, vale ressaltar, que o eixo vertical das figuras corresponde às voltagens em volts (V), enquanto que o eixo horizontal representa o tempo em segundos (s).

Figura 26 - Respostas de saída de voltagem para as simulações M1.



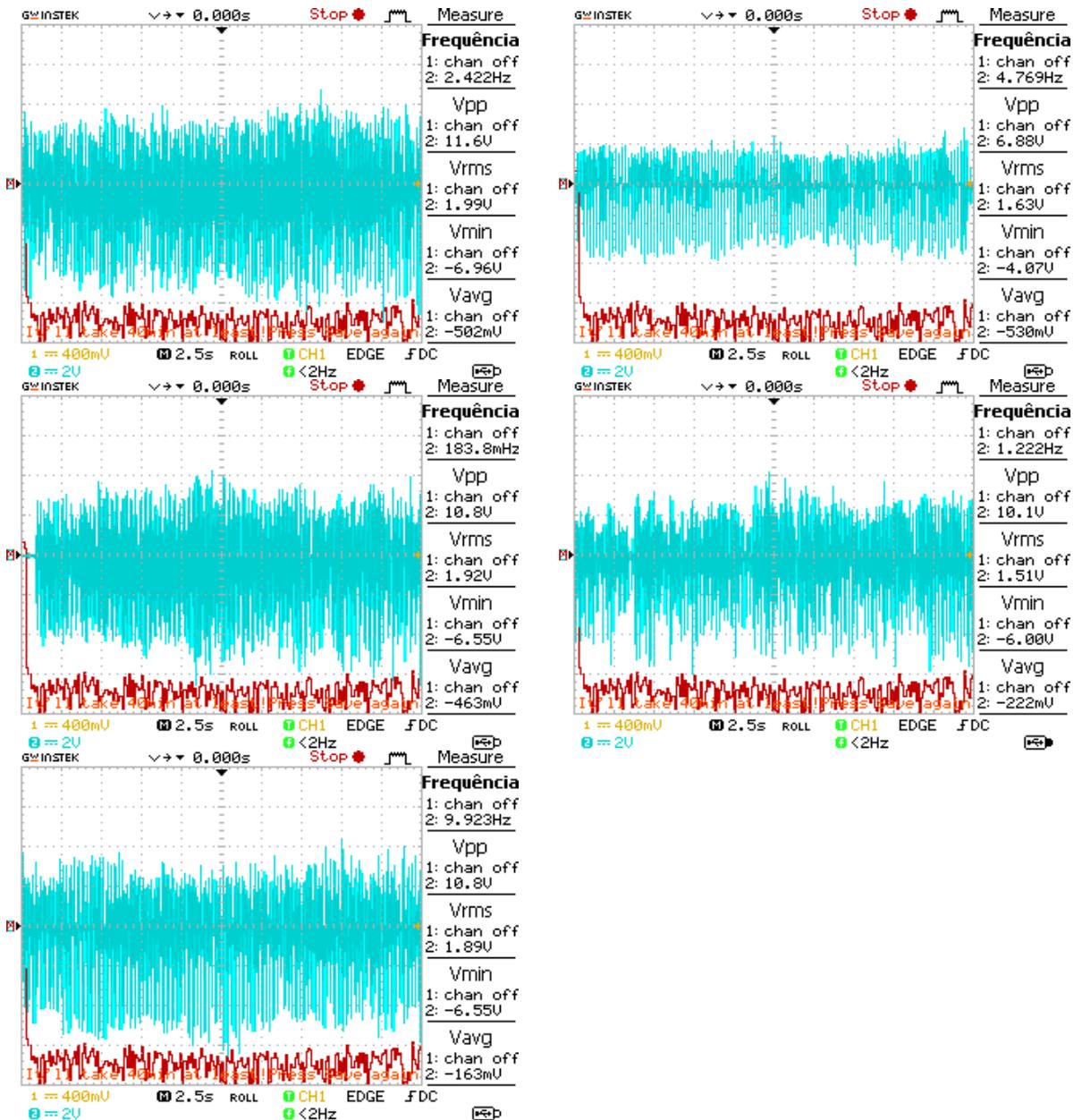
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 27 - Respostas de saída de voltagem para as simulações M2.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 28 - Respostas de saída de voltagem para as simulações M3.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.