

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DANIEL UTSCH FERNANDES SILVA
FÁBIO RAMOS DOS SANTOS
LUCAS GOMES CARRAMONA**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DE MATERIAIS INTELIGENTES
PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA NAS INSTALAÇÕES DO CEFET/RJ**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

2023

DANIEL UTSCH FERNANDES SILVA

FABIO RAMOS DOS SANTOS

LUCAS GOMES CARRAMONA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DE MATERIAIS INTELIGENTES
PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA NAS INSTALAÇÕES DO CEFET/RJ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior

RIO DE JANEIRO

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S586 Silva, Daniel Utsch Fernandes
Estudo de viabilidade do uso de materiais inteligentes para a
geração de energia nas instalações do CEFET/RJ / Daniel Utsch
Fernandes Silva, Fábio Ramos dos Santos [e] Lucas Gomes
Carramona. — 2023.
xiii, 63f. + anexo : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.
Bibliografia : f. 60-63
Orientador: Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior

1. Engenharia mecânica. 2. Materiais inteligentes. 3. Energia -
Fontes alternativas. 4. Geração de energia elétrica. 5. Material
cerâmico. 6. Estudos de viabilidade. I. Santos, Fábio Ramos dos. II.
Carramona, Lucas Gomes. III. Monteiro Junior, Paulo Cesar da
Camara. (Orient.). IV. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS DANIEL

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado forças para seguir meu caminho até este momento.

Agradeço aos meus pais, Mozart e Kátia, por todo o apoio, incentivo, companheirismo e esforço para que eu tivesse a melhor educação possível. Sem vocês eu não teria chegado até aqui.

Deixo um agradecimento mais do que especial a minha avó Therezinha, minha eterna e amada vó Tetê, que nos deixou pouco antes de iniciar minha jornada na graduação, mas que viverá para sempre em meu coração, por todo amor, carinho, e suporte ao longo da minha vida. À Tia Denise, a querida Didi, que esteve sempre junto e acompanhou meu crescimento junto da minha avó.

Agradeço a toda minha família, meus tios e tias, minhas primas e meus primos, por estarem sempre comigo. Faço um agradecimento especial ao Tio Paulo Cesar, Engenheiro Mecânico formado na primeira turma de Engenharia do CEFET, que sempre despertou em mim a curiosidade e a vontade de entender e aprender como as máquinas e equipamentos funcionam.

Agradeço aos meus amigos da vida, José Scher e João Pedro Vangelotti, que estiveram comigo tanto nos bons e nos maus momentos, sempre me apoiando e ajudando a seguir em frente.

Agradeço aos amigos que fiz no CEFET: Daniel Arruda, Lucas Carramona, Fábio Ramos, Thales Queiroz, Anna Carolina Mendonça, Vitor Pastor, Victor Bittencourt, Yuri Regatieri e André Luiz. Agradeço também aos amigos que fiz na FAETEC e que, assim como eu, vieram cursar Engenharia Mecânica no CEFET: Italo Moraes, Caio Vinícios, Lucas Almeida e, especialmente, Sérgio Cavalcanti, que nos ajudou muito ao longo da graduação e que hoje é companheiro de trabalho.

Agradeço à IEC Engenharia e aos amigos que lá fiz, por terem me dado a oportunidade de conseguir meu primeiro estágio e entrar no mercado de trabalho e por terem contribuído sobremaneira para o meu desenvolvimento tanto profissional quanto pessoal.

Por fim, agradeço ao nosso orientador, Paulo Camara, por ter nos guiado de forma ímpar frente aos desafios de um Projeto Final, sempre nos prestando todo o suporte necessário.

AGRADECIMENTOS FÁBIO

Em primeiro lugar, estou extremamente grato pela ajuda que Deus me deu durante todo o projeto, tanto para finalizar este TCC como para conseguir conciliá-lo com todos os compromissos.

Agradeço profundamente a minha família, pois eles sempre me apoiaram e me ajudaram em todos os momentos que precisei. Meus pais batalharam bastante para que eu pudesse ter as oportunidades que tive durante a minha vida e eu sou muito grato por isso.

Agradeço a minha noiva que durante todas as minhas recaídas, foi peça importantíssima para que eu pudesse atravessar meus obstáculos. Sempre fui aconselhado, cuidado e estimulado por ela, o que me deu forças para continuar e um norte para onde ir.

Aproveito esse momento para agradecer aos meus colegas de faculdade que estiveram comigo durante todo o desafio que é a faculdade. Juntos nos entristecemos, animamos e comemoramos várias das diferentes experiências que tivemos durante toda essa caminhada.

Agradeço ao CEFET que me deu todas as oportunidades para realizar esse estudo, além de ter me ensinado muito por meio de todos os seus professores. Fora do meio acadêmico, o CEFET me capacitou para conseguir um emprego e hoje tenho um local de trabalho também graças a essa instituição.

Por fim, agradeço ao professor Paulo Camara que nos auxiliou do início ao fim do nosso projeto. Muitas dúvidas, ideias e conversas foram realizadas para que chegássemos a esse ponto em que estamos e muito disso foi realizado com a ajuda do nosso orientador.

AGRADECIMENTOS LUCAS

Agradeço primeiramente, a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica e me ajudaram a chegar neste momento.

Agradeço a minha família, minha mãe Cristiane e minha vó Maria de Lourdes por todo apoio antes e durante a minha caminhada na graduação, todo o esforço de vocês para minha formação e qualificação. Vocês foram essenciais para minha chegada, e agora, finalização deste ciclo.

Ao meu tio Alexandre (in memorian) que sempre me instigou a estudar, e apoiou o interesse na área de exatas.

À minha namorada Giovanna pelos momentos de apoio e incentivo, seu companheirismo e compreensão nos diversos momentos de ansiedade e estresse, foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Agradeço aos amigos que fiz no CEFET, especialmente aos meus companheiros neste trabalho: Daniel Utsch e Fábio Ramos, e a todos que me ajudaram durante a graduação: Daniel Arruda, Anna Carolina Mendonça, Vitor Pastor, Thales Queiroz, Victor Bittencourt e Sergio Cavalcanti.

À IEC Engenharia e todos os companheiros de trabalho que me ajudaram no dia a dia e contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Ao CEFET, seu corpo docente, direção e administração que possibilitaram minha entrada e formação no curso desejado. Também pelos softwares, materiais e laboratórios cedidos para realização deste trabalho.

Por fim, agradeço ao nosso orientador, Paulo Camara, por ter nos guiado e incentivado pelos desafios deste trabalho, sempre nos prestando todo o suporte intelectual e materiais necessários.

Eu não falhei, encontrei 10 mil soluções que não davam certo. (EDISON, Thomas, 1910)

RESUMO

SILVA, Daniel Utsch Fernandes. SANTOS, Fabio Ramos dos. CARRAMONA, Lucas Gomes. **Estudo de viabilidade do uso de materiais inteligentes para a geração de energia nas instalações do CEFET/RJ.** 2023. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

A piezoelectricidade pode ser utilizada como uma forma de geração de energia através da ação mecânica sobre materiais com essa propriedade. Em um cenário de crescente aumento da demanda por energia elétrica e de questões associadas a sustentabilidade, faz-se necessário a busca por fontes alternativas e limpas de geração. Nesse sentido, o presente trabalho visou avaliar a viabilidade da geração de energia através do uso de um piso montado com uma chapa de alumínio e com um transdutor piezoelétrico do tipo PZT (titanato zirconato de chumbo - $\text{Pb}[\text{Zr}_x \text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ com $0 < x < 1$), um dos materiais mais comumente usados no que tange aos materiais piezoelétricos e a captura de energia. Essa chapa tem como objetivo gerar energia para alimentação em geral (catracas, iluminação, entre outros). Inicialmente, foi realizado um estudo prático na entrada da Rua General Canabarro do CEFET/RJ para verificar a quantidade de pessoas que circulam em três períodos do dia e chegar-se a um valor médio. Foram realizadas simulações numéricas eletromecânicas e experimentos práticos para comparação dos resultados de tensão elétrica obtidos. Os resultados são apresentados e discutidos por meio de gráficos, tais como: tensão mecânica, deslocamento, tensão elétrica gerada e tempo de carga do capacitor. Os resultados indicam que o piso piezoelétrico com 1 m^2 é viável para carregar diferentes tipos de baterias e poderia ser aplicado em luminárias de emergência que seriam acionadas em situações de queda de luz no campus da instituição. Por se tratar de um estudo em estágio inicial, é necessário um aprofundamento das pesquisas quanto ao armazenamento da energia gerada visando ampliar o campo de aplicação do piso analisado.

Palavras-chave: Piezoelectricidade. Captura de energia. Geração de energia. PZT. Viabilidade.

ABSTRACT

SILVA, Daniel Utsch Fernandes. SANTOS, Fabio Ramos dos. CARRAMONA, Lucas Gomes. **Feasibility study on the use of intelligent materials for energy generation at CEFET/RJ facilities.** 2023. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

Piezoelectricity can be used as a form of energy generation through mechanical action on materials with this property. In a scenario of increasing demand for electrical energy and associated sustainability issues, the search for alternative and clean sources of generation becomes necessary. In this sense, the present study aimed to evaluate the feasibility of energy generation through the use of a floor mounted with an aluminum plate and a piezoelectric transducer of the PZT type (lead zirconate titanate - $\text{Pb}[\text{Zr}_x \text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ with $0 < x < 1$, one of the most commonly used materials in piezoelectric materials and energy harvesting. The objective of this plate is to generate energy for general use (turnstile gates, lighting, among others). Initially, a practical study was conducted at the entrance of General Canabarro Street at CEFET/RJ to verify the number of people circulating during three different periods of the day and arrive at an average value. Electromechanical numerical simulations and practical experiments were performed to compare the obtained results of electrical voltage. The results are presented and discussed through graphs, such as mechanical stress, displacement, generated electrical voltage, and capacitor charging time. The results indicate that the 1 m^2 piezoelectric floor is feasible for charging different types of batteries and could be applied in emergency lighting that would be activated in situations of light outage on the institution's campus. As this is an initial stage study, it is necessary to deepen the research regarding the storage of generated energy in order to expand the field of application of the analyzed floor.

Keywords: Piezoelectricity. Energy harvesting. Power generation. PZT. Feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz elétrica brasileira em 2021.....	4
Figura 2 – Utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo em 2020.....	5
Figura 3 – Representação esquemática dos efeitos direto e inverso do fenômeno piezoelétrico.	6
Figura 4 – Polarização de um material piezoelétrico.	8
Figura 5 – Representação do efeito piezoelétrico direto, no qual o sentido da polarização depende do tipo de esforço aplicado.....	9
Figura 6 – Estrutura Perovskita das cerâmicas piezoelétricas tipo PZT: 1) Abaixo da temperatura de Curie. 2) Acima da temperatura de Curie.....	9
Figura 7 – Diagrama dos tipos de piezopolímeros. (1) Bulk piezopolímeros, divididos entre amorfo e semicristalino, (2) Piezocompósitos, (3) polímeros vácuo-carregados.....	10
Figura 8 – Cubo piezoelétrico com indicação dos eixos tridimensionais.....	11
Figura 9 – Placa piezoelétrica.....	13
Figura 10 – Desenho do protótipo.	20
Figura 11 – Convergência de malha para a placa de alumínio.	21
Figura 12 – Localização da força aplicada ao mecanismo.	22
Figura 13 – Gráfico Tensão x Espessura para uma carga de 800 N.....	23
Figura 14 – Gráfico Deformação x Espessura para uma carga de 800 N.....	23
Figura 15 – Área de aplicação da força na simulação numérica.	25
Figura 16 – Gráfico Tensão x Espessura para o conjunto.	28
Figura 17 – Gráfico Tensão x Espessura para a carga dividida para o conjunto.....	29
Figura 18 – Gráfico Deformação x Espessura para a carga dividida para o conjunto.	30
Figura 19 - Gráfico Tensão elétrica x Espessura para a carga dividida para o conjunto.....	31
Figura 20 - Tensão Elétrica x Tensão Mecânica x Espessura para o conjunto.	32
Figura 21 – Tensão máxima equivalente na placa de alumínio com PZT acoplado.	33
Figura 22 – Deformação máxima na placa de alumínio com PZT acoplado.	33
Figura 23 – Estado de tensão na superfície superior do PZT.	34
Figura 24 – Tensão máxima equivalente no PZT.....	34
Figura 25 – Deformação máxima no PZT.....	35
Figura 26 – Desenho 3D do suporte projetado.	36
Figura 27 – Frequência de ressonância obtida a partir do modo de deformação crítico.	36
Figura 28 – Resultado de tensão elétrica gerada pelo PZT.	37
Figura 29 – Chapa de alumínio cortada.....	38
Figura 30 – Suporte de aço usinado.	39
Figura 31 – Transdutor piezoelétrico de PZT utilizado.....	40
Figura 32 - Placa de energy harvesting LTC3588 utilizada.	40
Figura 33 – Capacitor eletrolítico de 2200 μ F x 35 V utilizado.....	41

Figura 34 – Módulos da National Instruments utilizados nos experimentos montados no chassi.	42
Figura 35 - Shaker Model 2025E-HF utilizado no experimento acelerado.....	42
Figura 36 – Corrente elétrica sem retificação.....	43
Figura 37 – Diagrama representativo do funcionamento da ponte retificadora.	44
Figura 38 – Corrente elétrica retificada.....	45
Figura 39 – A: Diagrama esquemático da placa LTC3588. B: Diagrama de bloco da placa LTC3588.....	45
Figura 40 – Vista superior do circuito montado.	46
Figura 41 – Vista lateral do circuito montado.	47
Figura 42 – Desenho esquemático do circuito eletrônico.....	47
Figura 43 – Ilustração da montagem realizada no Tinkercad.....	48
Figura 44 – Circuito conectado ao módulo de aquisição de tensão.....	48
Figura 45 – Gráficos de geração de tensão (acima) e carregamento do capacitor (abaixo) gerados no Signal Express.....	49
Figura 46 – Geração de tensão elétrica no transdutor de PZT x tempo.....	50
Figura 47 – Gráfico de carregamento do capacitor x tempo.	50
Figura 48 – Resultado de tensão gerada na placa piezoelétrica de PZT.....	53
Figura 49 – Gráfico de geração de tensão de circuito aberto para diferentes massas aplicadas ao conjunto PZT/chapa de alumínio.....	53
Figura 50 – Sugestão de simulação futura considerando o formato do pé humano.	58
Figura 51 – Conceito de piso com 25 elementos piezoelétricos.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e piezoelétricas do PVDF.....	16
Tabela 2 – Propriedades mecânicas, elétricas e piezoelétricas do PZT.....	18
Tabela 3 – Comparação entre as propriedades do PZT e PVDF.	19
Tabela 4 – Análise da quantidade de pessoas circulando em 15 minutos	25
Tabela 5 – Propriedades mecânicas médias de materiais típicos de engenharia.	29
Tabela 6 – Itens utilizados na montagem do circuito elétrico.	41
Tabela 7 – Resultados elétricos de circuito fechado.....	52
Tabela 8 – Resultados estimados de carregamento inicial de diferentes tipos de baterias.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PLS	Projeto de Lei do Senado
PZT	<i>Lead Zirconate Titanate</i> /Titanato zirconato de chumbo
PVDF	<i>Polyvinylidene Fluoride</i> /Fluoreto de polivinilideno
LED	<i>Light-emitting diode</i> /Diodo Emissor de Luz
D	Deslocamento elétrico
E	Campo elétrico
T	Tensão mecânica
S	Deformação mecânica
s	Complacência elástica
d	Constante de carga piezoelétrica
ϵ	Permissividade
C	Matriz de rigidez
σ_e	Limite de escoamento
ρ	Densidade
R	Resistência elétrica
V	Tensão elétrica
I	Corrente elétrica
P	Potência elétrica
Y	Módulo de elasticidade/Módulo de Young
G	Módulo de cisalhamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 METODOLOGIA.....	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 MATRIZ ENERGÉTICA.....	4
2.2 PIEZOELETRICIDADE.....	6
2.2.1 Funcionamento.....	7
2.2.1.1 Classificações.....	9
2.2.1.2 Equações constitutivas.....	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1 SELEÇÃO DO MATERIAL.....	15
3.1.1 PVDF.....	15
3.1.2 PZT	17
3.1.3 PZT X PVDF.....	19
3.2 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS.....	20
3.3 MÉTODO UTILIZADO	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	28
4.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL	37
4.2.1 Materiais do sistema e usinagem.....	38
4.2.1.1 Circuito elétrico	39
4.2.2 Equipamentos.....	41
4.2.3 Testes práticos.....	42
4.3 COMPARAÇÃO.....	52
4.4 CÁLCULO ESTIMADO DO TEMPO NECESSÁRIO PARA CARGA DE BATERIAS 54	
5 CONCLUSÕES.....	56
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXO A - Desenho técnico do suporte projetado	64
ANEXO B - Desenho técnico do suporte usinado.....	66

1 INTRODUÇÃO

A busca por novas fontes de energia renováveis e pela redução da emissão de gases poluentes é um tema amplamente discutido e colocado como objetivo em diversos setores da indústria mundial. Atualmente a geração de energia solar, eólica e através das ondas, apesar de ainda apresentarem um custo elevado, já se encontram amplamente difundidas.

A literatura apresenta diversos trabalhos que buscam novos métodos de geração de energia renovável e sustentável. Outro ponto levantado no que se refere aos métodos tradicionais de geração de energia elétrica é o custo, dado que a geração é concentrada e dividida com os usuários. O custo da energia aumenta pois, além da energia consumida, pagam-se encargos de iluminação pública e gerais relacionados à distribuição energética. Com essas novas tecnologias, é possível minimizar esses impactos, pois a geração estaria ocorrendo no próprio local de utilização. Atualmente há diversas pesquisas e aplicações reais já existentes que buscam aproveitar a energia mecânica que seria desperdiçada de outros geradores de energia, da movimentação de carros e até da movimentação e tarefas comuns do dia a dia das pessoas. Nesse sentido, destaca-se a busca pela utilização de materiais piezoelétricos, os quais podem gerar energia elétrica através de um estímulo mecânico.

Considerando a realidade do CEFET Maracanã, a principal aplicação se daria em função de um complemento energético para situações que possuem menos demanda, dado que o grande volume de pessoas que circulam em seu campus indica que se pode aproveitar o potencial de geração de energia proveniente da locomoção e convertê-la em energia elétrica, causando um impacto positivo nos recursos da instituição.

1.1 MOTIVAÇÃO

Tendo em vista o exposto no item anterior, busca-se uma forma alternativa de geração de energia que poderia ser aplicada dentro das instalações do campus Maracanã do CEFET/RJ, como, por exemplo, a colheita de energia das arquibancadas da quadra esportiva, das escadas de acesso aos pavimentos dos diferentes blocos ou das entradas do campus, por onde há intenso movimento de pessoas, de modo a contribuir na iluminação dos corredores da instituição, por exemplo.

Para isso, inicialmente, serão realizadas análises numéricas para verificar a resistência mecânica, a deformação causada e posteriormente a tensão elétrica gerada, todas elas utilizando

o software comercial ANSYS®, ferramenta adequada para simular o comportamento do corpo de prova estudado, e, posteriormente, testes dentro do Laboratório de Materiais e Sistemas Inteligentes (LASEI) presente no CEFET/RJ.

Dessa forma, os testes no laboratório serão feitos para comparação entre os resultados encontrados no meio digital e na prática, sendo essa comparação apresentada posteriormente através de gráficos e tabelas de resultados. Dessa forma, será possível compreender melhor o comportamento do material diante dos esforços aplicados nas simulações e nos experimentos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade da geração de energia por meio do uso de materiais piezoelétricos para reduzir o custo da conta de energia do campus do CEFET/RJ.

Os objetivos específicos deste trabalho são realizar uma análise numérica e experimental da energia gerada através de um estímulo mecânico aplicado a uma placa que contém um elemento de material piezoelétrico, determinar a energia gerada, comparar os resultados encontrados com a literatura e, por fim, verificar a viabilidade do uso dessa fonte energia para alimentar algum local do campus Maracanã do CEFET/RJ.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada prevê a aplicação de materiais piezoelétricos, portanto será necessário inicialmente estudar o seu comportamento eletromecânico, o que engloba uma vasta revisão bibliográfica de diversos artigos e livros encontrados no Google Acadêmico, em bases de dados de universidades e plataformas científicas, como Scopus, Researchgate e o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

O projeto será dividido em duas partes principais:

- Estudo e desenvolvimento de um modelo numérico em elementos finitos capaz de descrever o comportamento dos materiais utilizados;
- Estudo e desenvolvimento do dispositivo e seu funcionamento mecânico (cargas, deformações e potência elétrica).

Além disso, destaca-se a utilização dos softwares ANSYS® para a realização das análises numéricas, do ORIGIN® para os traçados dos gráficos de interesse ao presente trabalho e do Autodesk Inventor para o projeto do suporte.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Nesta primeira etapa, o presente trabalho é dividido em 4 capítulos, conforme demonstrado a seguir:

Capítulo 1 – Introdução, no qual o tema principal deste trabalho é apresentado e são abordadas a motivação e os objetivos, bem como a metodologia utilizada;

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, no qual trata-se dos temas de interesse à realização do trabalho, como a matriz energética brasileira e a piezoeletricidade;

Capítulo 3 – Materiais e Métodos, com a descrição dos softwares e do modelo utilizado na análise numérica, bem como os materiais utilizados nos ensaios;

Capítulo 4 – Resultados e Discussão, onde os dados obtidos experimentais serão apresentados e analisados e comparados com os resultados numéricos;

Capítulo 5 – Conclusão, onde serão apresentadas as conclusões em função da discussão dos resultados encontrados no capítulo anterior, bem como sugestões para trabalhos futuros;

Capítulo 6 – Referências Bibliográficas, por fim, no último capítulo, serão apresentadas todas as referências bibliográficas adotadas neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA

Considerando o crescente aumento do consumo de energia elétrica em função do crescimento da população mundial, faz-se necessário buscar novas formas de geração de energia para atender essa demanda.

Associado a essa demanda, existe uma grande motivação global pela redução no uso de combustíveis fósseis, que agredem o meio ambiente, e de outras fontes não renováveis na geração de energia elétrica e, conseqüentemente, pelo uso de fontes renováveis de energia.

Além da preocupação com o meio ambiente, existe a preocupação com a segurança energética dos países. Isso se deve à dependência de combustíveis fósseis importados e ao receio da volatilidade da oferta e dos preços que podem afetar diretamente a população de um país e sua qualidade de vida (LUNA *et al.*, 2019).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz elétrica brasileira é composta em sua maioria pelas usinas hidrelétricas, sendo responsáveis por 56,8% da matriz. O gráfico da Figura 1 ilustra essa situação.

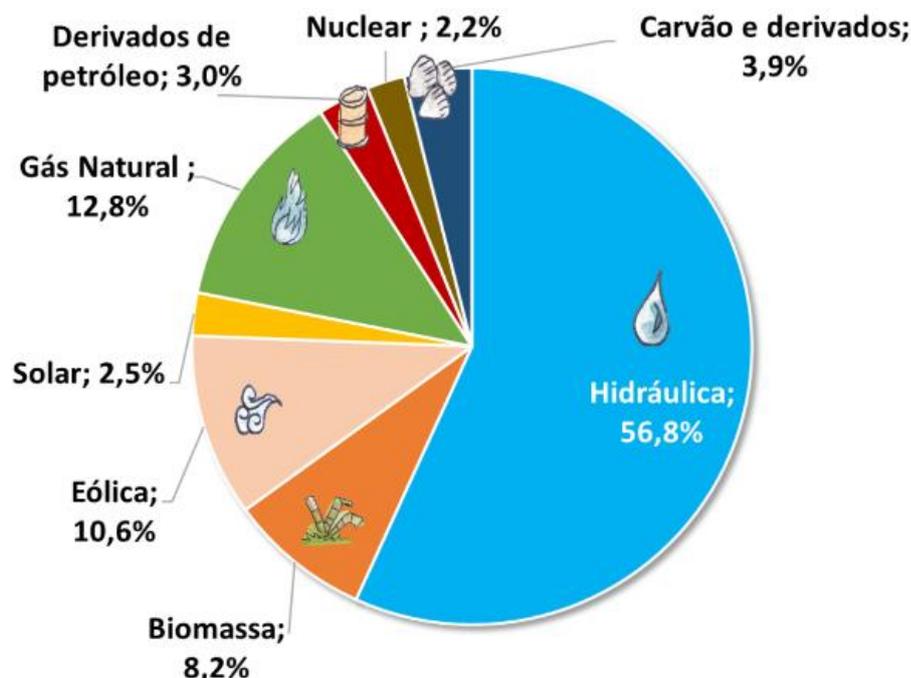


Figura 1 – Matriz elétrica brasileira em 2021.

Fonte: BEN (2022).

Tal fato contribui para que a matriz elétrica brasileira seja, em sua maioria, renovável. Somado a outras fontes renováveis de energia, a matriz elétrica do Brasil pode ser considerada mais renovável quando comparada a matriz elétrica mundial, uma vez que 82,9% das fontes utilizadas são renováveis, conforme ilustrado no gráfico da Figura 2.

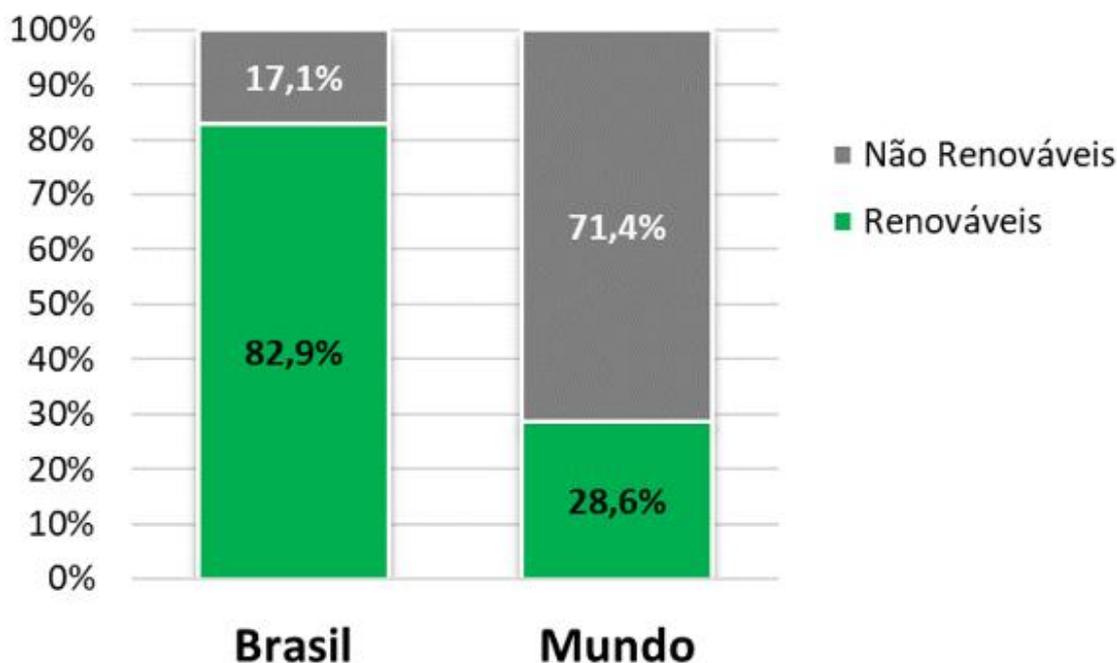


Figura 2 – Utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo em 2020.

Fonte: EPE (2022).

Como pode ser visto, por ter uma matriz majoritariamente renovável, pode-se imaginar que o Brasil não teria grandes problemas com relação a problemas de importação de combustíveis fósseis para utilização na geração de energia elétrica, contudo, considerando-se que, caso o projeto de lei PLS 304/2017, que proíbe a venda de veículos a gasolina e a diesel a partir de 2030 bem como a circulação de veículos a combustão no país em 2040, seja aprovado, haverá o início de um grande aumento da demanda por energia elétrica para atender a frota de carros elétricos, o que coloca dúvidas quanto a capacidade da matriz brasileira suprir essa necessidade. Países da União Europeia enfrentam situação semelhante.

Dessa forma, é possível afirmar que há a necessidade de se buscar novas fontes de geração de energia elétrica tanto no Brasil quanto no mundo. Nesse sentido, este trabalho visa a apresentação da piezoelectricidade, que será mais detalhada no próximo tópico.

2.2 PIEZOELETRICIDADE

De acordo com Callister (2016), a piezoeletricidade pode ser definida como um fenômeno não usual exibido por alguns materiais cerâmicos e poliméricos, podendo ser chamada também de eletricidade por pressão, conforme explicado a seguir.

A palavra que dá nome ao fenômeno é oriunda da língua grega e resulta da união das palavras “piezo”, que significa pressão em grego, e “eletricidade” e significa “eletricidade por pressão” (PALHA, 2012). Esse nome foi proposto pelo físico alemão Wilhelm Gottlieb Hankel um ano depois de sua descoberta (VIVES, 2008).

O fenômeno da piezoeletricidade é uma forma alternativa de geração de energia baseada na diferença de potencial elétrico induzida a partir da deformação mecânica gerada pela aplicação de uma força externa de materiais específicos, os materiais piezoelétricos.

Essa propriedade desses materiais foi descoberta na França, no ano de 1880, pelos irmãos Jacques e Pierre Curie, na qual eles puderam verificar de forma prática a formação de um potencial elétrico na superfície dos cristais de prova ao se aplicar uma tensão mecânica (SILVA, 2019).

A propriedade supramencionada é conhecida como piezoeletricidade direta dado sua descoberta ter acontecido primeiro (LEO, 2007). Nesse sentido, vale também destacar a existência da piezoeletricidade inversa, na qual é possível obter uma deformação mecânica a partir a aplicação de uma tensão elétrica no material. Esse efeito reverso foi provado matematicamente por Gabriel Lippman em 1881 (SOUSA *et al.*, 2018).

Os dois efeitos do fenômeno piezoelétrico estão representados esquematicamente na Figura 3:

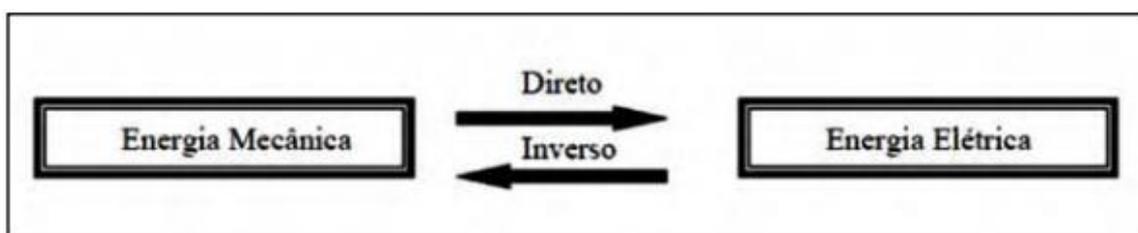


Figura 3 – Representação esquemática dos efeitos direto e inverso do fenômeno piezoelétrico.
Fonte: Eiras (2004).

O efeito piezoelétrico, seja direto ou inverso, é aplicado em diversas áreas atualmente e tem crescido constantemente em decorrência do aumento da automatização e do desenvolvimento de dispositivos cada vez mais modernos. Alguns campos de aplicação são: medicina - aparelho de ultrassom, eletroterapia; eletrônica – microfones, alto falantes, amplificadores sonoros; indústria automotiva – balanceamento de rodas, portas sem chave, alarmes e sensores; consumo – cabeçotes de impressoras e medidores de deformação, entre outras aplicações (CALLISTER, 2016; ARMENDANI *et al.*, 2016).

A piezoelectricidade é característica de materiais que apresentam estruturas cristalinas complexas e existem diversos grupos de materiais com estas propriedades, dentre eles, os cristais únicos, os cerâmicos, os óxidos metálicos, polímeros orgânicos como o Nylon-11, ácidos poliláticos, polipropileno, fluoreto de polivinilideno (PVDF), copolímeros e compósitos orgânico-inorgânicos (XIE *et al.*, 2021). Os cerâmicos piezoelétricos são os materiais piezoelétricos mais conhecidos devido a apresentarem maior flexibilidade de formatos e propriedades, com uma ampla gama de aplicação em equipamentos industriais. Alguns exemplos de cerâmicos piezoelétricos são: zirconato-titanato de chumbo (conhecido como PZT), titanato de bário, titanato de chumbo, zirconato de chumbo e niobato de potássio (CALLISTER, 2016; ARMENDANI *et al.*, 2016).

Contudo, para algumas aplicações, outros grupos de materiais piezoelétricos atendem melhor as demandas, como o PVDF e os copolímeros devido à sua excelente flexibilidade, menor peso, alta resposta piezoelétrica, estabilidade química, biocompatibilidade e não-toxicidade (RAMADAN *et al.*, 2014).

2.2.1 Funcionamento

A piezoelectricidade é um fenômeno que ocorre quando o material é deformado mecanicamente devido à aplicação de alguma tensão de compressão, tração, flexão ou torção. A deformação mecânica aplicada polariza o material piezoelétrico, o que gera uma diferença de potencial proporcional às cargas formadas nas superfícies do material. Aplicando-se uma tensão crescente irá produzir um aumento no deslocamento elétrico (LEO, 2007).

As cargas são estaticamente balanceadas mesmo com a ausência ou baixo grau de simetria. Dessa forma, quando o material é submetido a uma força que gera uma deformação

mecânica, ocorre a separação das cargas positivas e negativas, gerando um dipolo elétrico entre as faces do material e apresentando tensão elétrica (SOUSA *et al.*, 2018).

O inverso também é válido, ou seja, quando esses materiais são expostos a um diferencial de potencial, eles apresentam uma deformação.

Como citado anteriormente, os materiais piezoelétricos possuem uma estrutura complexa, sendo essa estrutura constituída por cristais unitários. Esses cristais foram classificados entre 32 classes ou grupos pontuais, onde cada grupo é caracterizado por um arranjo particular de átomos e, dentre estes grupos, 10 demonstraram um eixo de polarização onde há uma separação entre as cargas positivas e negativas dos cristais (LEO, 2007).

A Figura 4 ilustra a polarização de um destes cristais de um material piezoelétrico quando submetido a compressão.

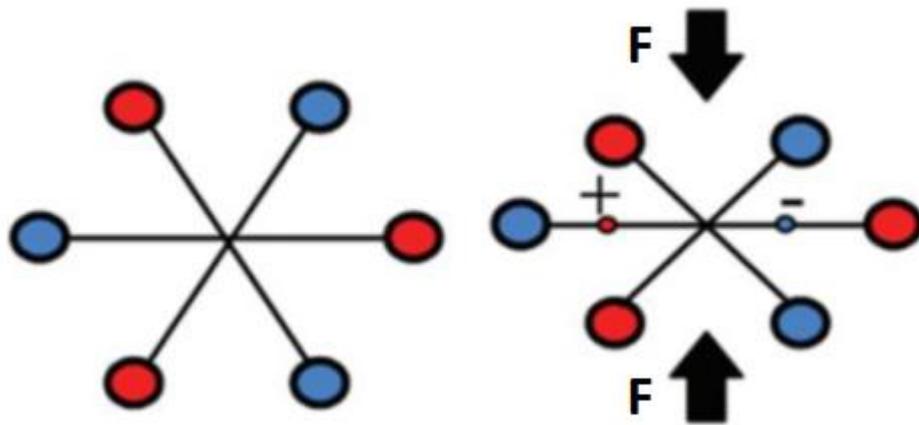


Figura 4 – Polarização de um material piezoelétrico.
Fonte: Adaptado de Silva (2018).

É importante ressaltar que a carga elétrica/polarização gerada é proporcional ao esforço aplicado. (REZENDE, 2020; FREITAS *et al.*, 2012). O sentido da polarização depende do fato de o esforço aplicado ser de tensão ou compressão (SILVA, 2019), como pode ser observado na Figura 5, onde é possível notar a geração de uma tensão negativa ao se aplicar um esforço de tração no corpo de prova, bem como a geração de uma tensão positiva ao se aplicar um esforço de compressão.



Figura 5 – Representação do efeito piezoelétrico direto, no qual o sentido da polarização depende do tipo de esforço aplicado.

Fonte: Ferreira (2015).

2.2.1.1 Classificações

Dentre a diversa gama de materiais com propriedades piezoelétricas duas se destacam: o zirconato titanato de chumbo (PZT) e o fluoreto de polivinilideno (PVDF) devido a suas altas características piezoelétricas (ZHAO *et al.*, 2014). O PZT, como a maioria dos piezoelétricos cerâmicos, possui uma estrutura cristalina de simetria tetragonal, romboédrica ou cúbica simples dependendo da temperatura em que se encontram, como observado na Figura 6 (PEREIRA, 2010).

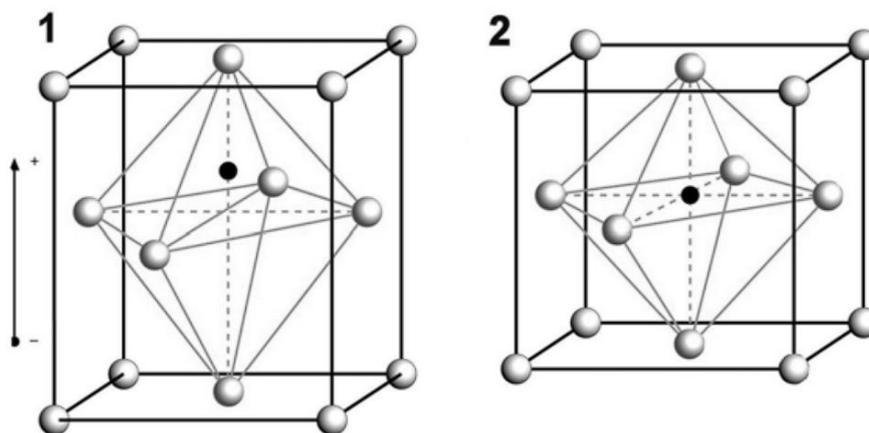


Figura 6 – Estrutura Perovskita das cerâmicas piezoelétricas tipo PZT: 1) Abaixo da temperatura de Curie. 2) Acima da temperatura de Curie.

Fonte: Pereira (2010).

Já o PVDF é classificado como um piezopolímero semicristalino. Dentre essa classe de piezopolímeros dividem-se em Bulk piezopolímeros, polímeros que contém o mecanismo piezoelétrico em sua estrutura e arranjo molecular, onde encontra-se os piezopolímeros amorfos e semicristalinos, piezocompósitos, onde esses últimos são matrizes poliméricas com piezoelétricos cerâmicos integrados e polímeros vácuo-carregados, nos quais as lacunas dos polímeros são preenchidas com gás de modo a formar dipolos internos (RAMADAN *et al.*, 2014). É possível observar as diversas classificações dos piezopolímeros na Figura 7.

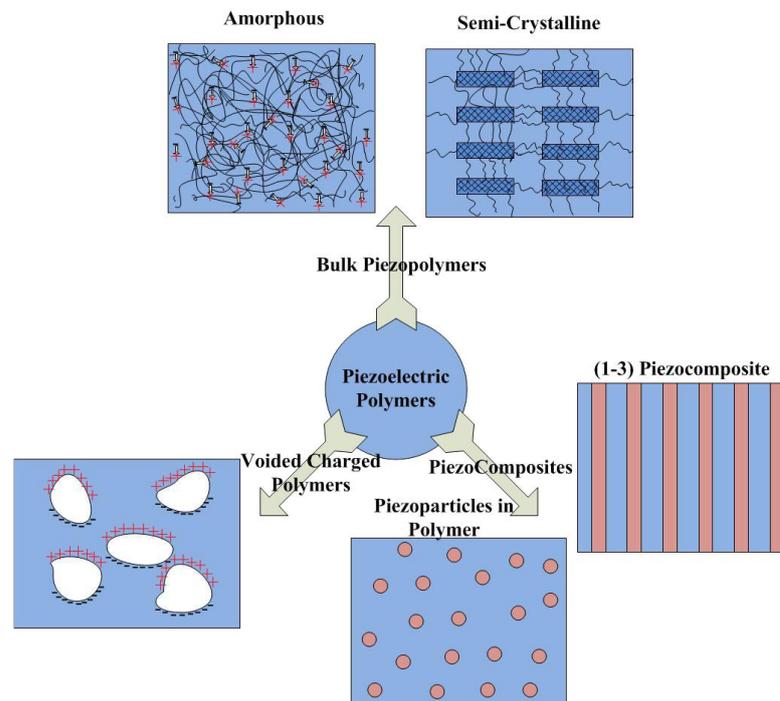


Figura 7 – Diagrama dos tipos de piezopolímeros. (1) Bulk piezopolímeros, divididos entre amorfo e semicristalino, (2) Piezocompósitos, (3) polímeros vácuo-carregados. Fonte: Ramadan (2014).

2.2.1.2 Equações constitutivas

Para apresentação das equações constitutivas dos materiais piezoelétricos, tomar-se-á um cubo de material piezoelétrico demonstrado na Figura 8, onde são indicadas as direções definidas numericamente por 1, 2 e 3.

Os materiais piezoelétricos possuem um plano de simetria, a partir do qual assume-se então o módulo de elasticidade para as direções 1 e 2 como iguais. Dessa forma, os termos das equações constitutivas para um material ortotrópico podem ser representados matricialmente como

$$S^E = \begin{bmatrix} \frac{1}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{12}}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{13}}{Y_1^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{Y_1^E} & \frac{1}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{23}}{Y_1^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{Y_3^E} & -\frac{\nu_{32}}{Y_3^E} & \frac{1}{Y_3^E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}^E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}^E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}^E} \end{bmatrix}$$

para a complacência mecânica,

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

para a permissividade elétrica, e

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

para o coeficiente de deformação piezoelétrica.

Convencionalmente, utiliza-se o eixo 3 como o eixo de simetria alinhado com o eixo de polarização do material, com isso, existem duas maneiras mais comuns de trabalho com os materiais piezoelétricos: os modos 33, com a tensão aplicada na direção 3 e o modo 31, com a tensão aplicada na direção 1 perpendicular a polarização (AI, 2018).

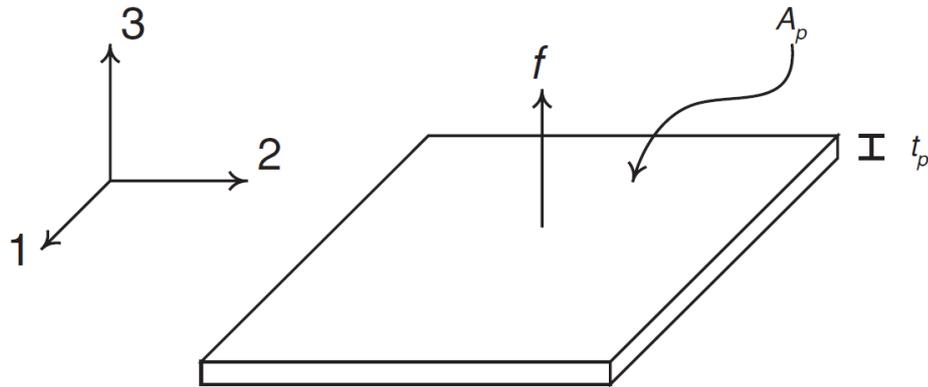


Figura 9 – Placa piezoelétrica
Fonte: Leo (2007).

Com a placa piezoelétrica ilustrada na Figura 9, assume-se os estados de tensão e campo elétrico como zero devido as direções 1 e 2 estarem no plano de placa, sendo assim as equações para definição da deformação e deslocamento elétrico simplificam-se para

$$S_1 = -\frac{\nu_{13}}{Y_1^E} T_3 + d_{13} E_3$$

$$S_2 = -\frac{\nu_{23}}{Y_1^E} T_3 + d_{23} E_3$$

$$S_3 = -\frac{1}{Y_3^E} T_3 + d_{33} E_3$$

$$D_m = d_{33} T_3 + \varepsilon_{33}^T E_3$$

Como na maioria dos casos o modo de operação 33 é o mais interessante, pode-se desconsiderar as duas primeiras equações e determinar as equações constitutivas para o modo de operação 33 (LEO, 2007).

Na literatura, é possível encontrar alguns casos recentes de aplicação da piezoelectricidade na geração de energia elétrica através de simulações e elaboração de protótipos de pisos piezoelétricos.

Valente (2019) verificou numericamente a geração de energia em um piso cerâmico de 45 cm x 45 cm contendo 25 piezoelétricos de PZT-5A e a máxima tensão elétrica gerada foi de 10 V, concentrada nas regiões próximas de onde a força foi aplicada. A potência média observada foi de $3,5 \times 10^{-5}$ W para toda a placa, considerando uma carga de 70 kg aplicada em um modelo teórico de pisada, de modo que as componentes da força variam com o tempo.

Souza *et al.* (2018) montaram um protótipo de piso circular contendo 9 transdutores piezoelétricos e puderam obter valores de tensão próximo dos 12 V.

Rezende (2020) construiu um protótipo de piso piezoelétrico de madeira nas dimensões 14 x 14 cm utilizando 9 elementos piezoelétricos e variando o modo de ligação entre eles. Os resultados práticos de tensão máxima obtidos foram 18 V, 30 V e 28 V para as ligações em paralelo, série e mista, respectivamente, considerando a maior carga aplicada, que foi de 20 g.

Ferreira (2017) analisou uma montagem de 10 pastilhas piezoelétricas em um tablado ligadas de diferentes formas. Os resultados de tensão máxima obtidos para uma carga de 10 kg foram 4,12 V, 1,12 V e 4,10 V para as ligações em circuito misto, circuito em paralelo e circuito em série.

Há diversos outros estudos também que tratam da análise da geração de energia em transdutores piezoelétricos posicionados na extremidade de vigas em balanço que ficam sujeitas a movimentos vibratórios, como no trabalho de Dudhat *et al.* (2019), onde foi observado uma geração de tensão alternada em um intervalo entre 1,8 e 2,6 V para uma força harmônica de aproximadamente 2 N.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SELEÇÃO DO MATERIAL

3.1.1 PVDF

Neste trabalho, foi levado em consideração primeiro a utilização do polímero fluoreto de polivinilideno, conhecido como PVDF, sendo esse um polímero piezoelétrico que possui como suas características uma alta flexibilidade, resistência mecânica e química e baixa frequência, com seus coeficientes piezoelétricos considerados moderados e sendo mais apropriado que o PZT em algumas aplicações (ZHAO *et al.*, 2014).

O PVDF é considerado um dos piezopolímeros mais conhecidos e detém uma ótima resposta piezoelétrica. Uma outra propriedade desse polímero é a sua impedância acústica, que é bem próxima da água em comparação com outros materiais piezocerâmicos (PRECISION ACOUSTICS).

Como informado, o PVDF possui uma alta resistência mecânica e química, porém, as suas propriedades piezoelétricas passam a se degradar quando o material é exposto a altas temperaturas. Esse fenômeno ocorre graças à liberação da polarização necessária para a piezoeletricidade ocorrer, ocasionada pela exposição do material a temperaturas elevadas. Como padrão, esse polímero deve ser armazenado e utilizado em temperaturas abaixo de 60 °C. Quando exposto a temperaturas acima de 100 °C, o comportamento piezoelétrico tenderá a não ocorrer mais.

Como citado anteriormente nas classificações dos materiais piezoelétricos, o PVDF é um piezopolímero semicristalino, ortotrópico e que exibe o efeito piezoelétrico com um campo elétrico ao longo do eixo 3 (ODEGARD, 2003). Suas propriedades gerais são descritas pela Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 – Propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e piezoelétricas do PVDF.

Mechanical properties	
Density	≈ 1.78 g/cm ³
Tensile strength	20–50 MPa
Young's modulus	2000–4000 MPa
Moisture absorption	0.04–0.05 %
Thermal properties	
Glass transition temperature	> -35 °C
Melting point	≈ 175 °C
Temperature stability	80–100 °C
Coefficient of thermal expansion	120–145 ppm/K
Electrical properties	
Dielectric constant	6–13 (at 1kHz–1MHz)
Loss tangent	0.02 at 1 kHz
DC breakdown field	80 V/μm at 25 °C
Piezoelectric properties	
Strain coefficient d ₃₃	-15–33 pC/N
Strain coefficient d ₃₁	6–23 pC/N
Voltage coefficient g ₃₃	0.14–0.33 Vm/N
Voltage coefficient g ₃₁	0.06–0.22 Vm/N
Pyroelectric coefficient ρ _Q	19–30 μC/m ² K
Coupling coefficient k _t	10–15 %

Fonte: GUSAROV (2015).

Dentre as propriedades piezoelétricas, as matrizes constitutivas do PVDF podem-se ser dadas, sendo elas, respectivamente, a complacência mecânica, permissividade elétrica e coeficiente de deformação piezoelétrica: (ODEGARD, 2003)

$$S^E = \begin{bmatrix} 3,8 & 1,9 & 1,0 & 0 & 0 & 0 \\ 1,9 & 3,2 & 0,9 & 0 & 0 & 0 \\ 1,0 & 0,9 & 1,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \end{bmatrix}$$

em GPa

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 6,55 \times 10^{-11} & 0 & 0 \\ 0 & 8,23 \times 10^{-11} & 0 \\ 0 & 0 & 6,73 \times 10^{-11} \end{bmatrix}$$

adimensional

$$d = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0,024 \\ 0 & 0 & 0,001 \\ 0 & 0 & -0,027 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

em C/N.

3.1.2 PZT

Além do PVDF, devido à dificuldade de obtenção da placa deste material para a parte experimental, também foi analisada a utilização da cerâmica piezoelétrica de Zirconato Titanato de Chumbo, bastante conhecida como PZT.

Este possui um comportamento ferroelétrico e piezoelétrico que permitem importantes aplicações no ramo tecnológico em transdutores, amplificadores e sensores (GASPAROTTO *et al.*, 2003). Tal fato é decorrente, principalmente, dos seus elevados coeficientes piezoelétricos (FREITAS, 2012).

Apesar dessas características, o PZT é quebradiço e sofre desgaste quando empregado na forma de filmes ou lâminas. Em alguns casos, com o objetivo de aumentar a flexibilidade do PZT, mistura-se o pó cerâmico, na forma de nanopartículas, com o PVDF, também pulverizado (FREITAS, 2012).

Os materiais piezoelétricos tiveram o maior crescimento do número de aplicações a partir do descobrimento dos piezoelétricos cerâmicos baseados em titanato zirconato de chumbo (PZT) nos anos 50. Desde então, as piezocerâmicas são utilizadas em inúmeras aplicações (FREITAS, 2012). A Tabela 2 abaixo apresenta algumas das propriedades desse material.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas, elétricas e piezoelétricas do PZT.

Material	Parameter	Symbols	Values	Unit	
PZT	Density	ρ	7,450	kg/m ³	
	Dielectric loss factor	$\tan \delta$	0.023		
	Compliance	$s_{11} = s_{22}$		13	10 ⁻¹² m ² /N
		s_{33}		4.8	
		$s_{44} = s_{55}$		34.58	
		s_{66}		22	
		s_{12}		-4.29	
		$s_{13} = s_{23}$		-1.58	
	Relative electric permittivity	$\epsilon_{11} = \epsilon_{22}$		5,800	
		ϵ_{33}		4,500	
	Piezoelectric strain coefficients	$d_{31} = d_{32}$		-186	10 ⁻¹² C/N
		d_{33}		670	
		d_{15}		660	
	Damping ratio	ζ		0.014	

Fonte: Weijie Li *et al.*, (2019).

Dentre as propriedades piezoelétricas, as matrizes constitutivas do PZT podem-se ser dadas, por, respectivamente, a rigidez mecânica, permissividade elétrica e constantes piezoelétricas: (ZAMAN, 2021)

$$C^S = \begin{bmatrix} 1,20 \times 10^{11} & 7,51 \times 10^{10} & 7,52 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 7,51 \times 10^{10} & 1,11 \times 10^{11} & 7,51 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 7,52 \times 10^{10} & 7,51 \times 10^{10} & 1,20 \times 10^{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,11 \times 10^{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,11 \times 10^{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,26 \times 10^{10} \end{bmatrix}$$

em Pa

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 1,99256 \times 10^{-9} & 0 & 0 \\ 0 & 5,78382 \times 10^{-10} & 0 \\ 0 & 0 & 1,99256 \times 10^{-9} \end{bmatrix}$$

adimensional

$$e = \begin{vmatrix} 0 & -5,35116 & 0 \\ 0 & 15,78347 & 0 \\ 0 & -5,35116 & 0 \\ 12,29474 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12,29474 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

em C/m²

3.1.3 PZT X PVDF

Ambos os materiais são dielétricos, porém com características muito distintas (por exemplo, o PVDF tem aproximadamente 1/4 da densidade e 1/250 da constante dielétrica do PZT) (FREITAS, 2012). Além disso, o PZT possui maior deformação plástica quando comparado com o PVDF, apesar dos dois possuírem baixos valores para tal.

Outro fato é que a constante de carga piezoelétrica do PZT é bem superior à do PVDF, sendo esse um fator importante para algumas aplicações. Em geral, o PZT possui um preço menor e pode ser trabalhado em temperaturas maiores do que o PVDF. A Tabela 3 apresenta uma comparação das propriedades de ambos os materiais.

Tabela 3 – Comparação entre as propriedades do PZT e PVDF.

Criteria	PZT element	PVDF element
Deformability	Low	Very Low
Piezoelectric charge constant(d33)	High (110)	Low (33)
Cost (\$)	\$2 per element (25mm dia,449mm2)	\$2.8per element (449mm2)
Temperature Range(C)	High (upto 130)	Low (upto 80)

Fonte: Bhattacharya et al., (2018).

Dessa forma, pode-se considerar que o material piezoelétrico escolhido depende não só das propriedades desejadas, como também da sua disponibilidade para que seja realizada a simulação prática em laboratório. Com isso, chegou-se à conclusão de realizar nesse trabalho análises de elementos finitos considerando o PZT para verificar como esse elemento se

comporta com os carregamentos aplicados e uma análise prática com a utilização de um piezoelétrico de PZT para comparação dos dados teóricos com os dados práticos obtidos.

Nesse sentido, a escolha do PZT-5A é justificada uma vez que o PZT é, de forma ampla, o mais utilizado devido a sua performance superior e por ser, no contexto de *energy harvesting*, junto com o PZT-5H os mais comumente utilizados (WAQAR *et al.*, 2015; ERTURK e INMAN, 2011). Além disso, outra justificativa para a seleção do PZT é a disponibilidade de um transdutor de PZT para este projeto e o custo de aquisição do PVDF é maior, o que inviabiliza um experimento prático com esse material

3.2 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Para analisar o comportamento do material ao sofrer esforços e descobrir a tensão elétrica gerada por meio da deformação, foi utilizado o software de elementos finitos ANSYS®. Nesse programa, foram feitos dois tipos de análise: estrutural, com o intuito de verificar o comportamento mecânico tais quais a deformação e tensão máxima no alumínio e no piezoelétrico, e modal para verificar a vibração que o material sofreria.

Inicialmente, foi criado um desenho no próprio software que representasse os suportes cortados, considerando apenas as partes de contato, a placa de alumínio e o material piezoelétrico colado na parte inferior da placa. O protótipo desenvolvido está ilustrado na Figura 10, abaixo, onde o piezoelétrico está acoplado à chapa e se deformará junto com a chapa de alumínio.

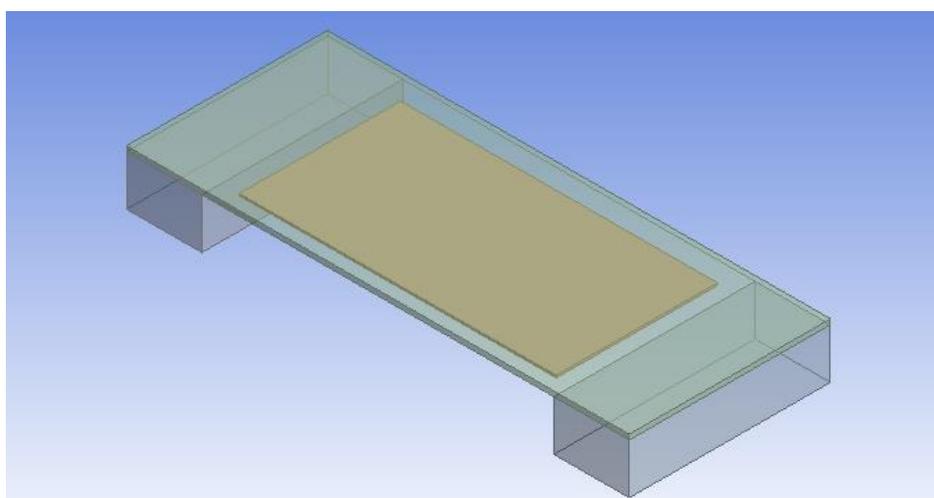


Figura 10 – Desenho do protótipo.
Fonte: Os autores.

Após o desenho ter sido criado, era necessária a seleção da malha de elementos finitos para que as análises fossem realizadas. Com isso, um estudo de convergência de malha foi feito para descobrir qual seria o melhor tamanho do elemento para a malha. Esse estudo consiste em simular um protótipo com uma carga conhecida e ir refinando a malha, ou seja, diminuindo o tamanho do elemento. Assim, percebe-se que a deformação obtida vai diminuindo até se estabilizar e o tempo de processamento da análise vai aumentando conforme a diminuição do elemento. Com esses dados, é possível traçar duas curvas que se cruzam em determinado ponto e o tamanho do elemento que está situado nesse cruzamento será o melhor para a realização da análise, garantindo, assim, um melhor custo-benefício entre deformação e tempo de processamento computacional.

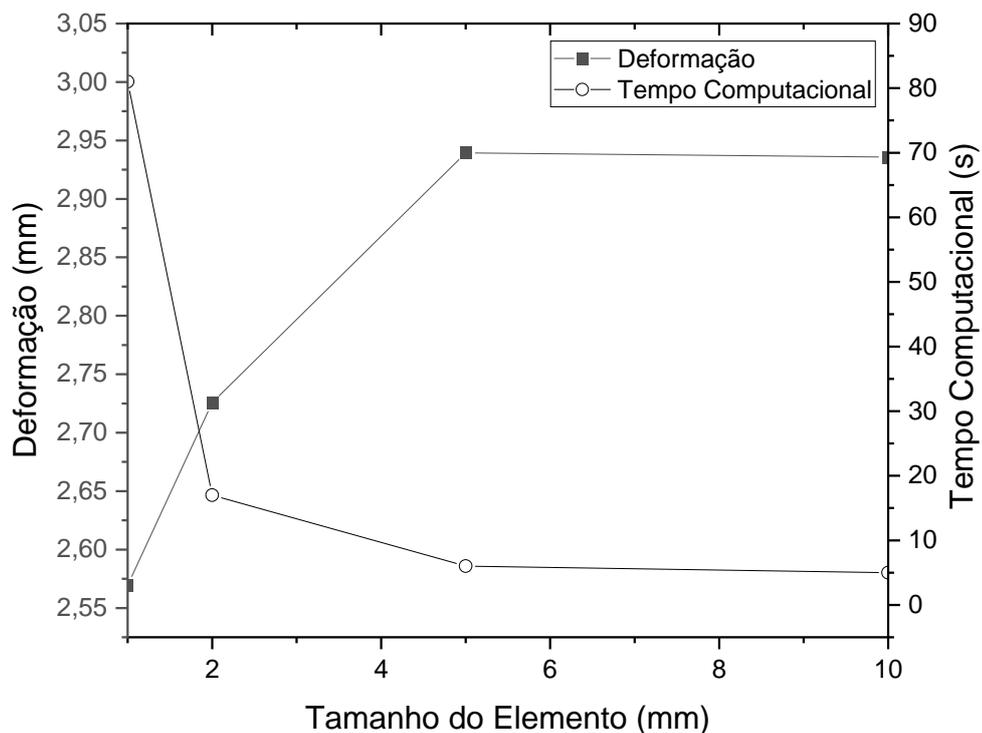


Figura 11 – Convergência de malha para a placa de alumínio.
Fonte: Os autores.

Como demonstrado no gráfico da Figura 11, o melhor tamanho do elemento para o caso dessa monografia é 2 milímetros. Dessa forma, a malha da placa de alumínio e do piezoelétrico tem como tamanho de elemento 2 milímetros. Como não nos interessa o

comportamento do suporte, foi utilizado uma malha mais grosseira a fim de diminuir o tempo computacional, sendo esta de 5 milímetros, padrão do Ansys.

De posse dessas informações, a análise estrutural foi feita. A carga utilizada foi 800 N por ser aproximadamente a força que uma pessoa em torno de 80 kg faria ao pisar no material. Essa carga foi simulada no centro da chapa de alumínio visando obter a maior deformação possível nesta configuração e, conseqüentemente, no centro do material piezoelétrico. O intuito dessa análise é verificar quanto o material estudado e o alumínio irão deformar, pois, essa deformação será utilizada para determinar a voltagem adquirida e para saber a flecha máxima de cada material e garantir que não ocorra a plastificação, assim como para o projeto do suporte.

Para que o alumínio não deformasse plasticamente, a espessura foi selecionada de acordo com o esforço a ser suportado. Por se tratar da peça que resistirá diretamente aos esforços mecânicos, foi realizado um estudo paramétrico inicial, onde variou-se as possíveis espessuras da chapa de alumínio. Para considerar o caso mais crítico o esforço foi aplicado no centro da placa, como mostrado na Figura 12.

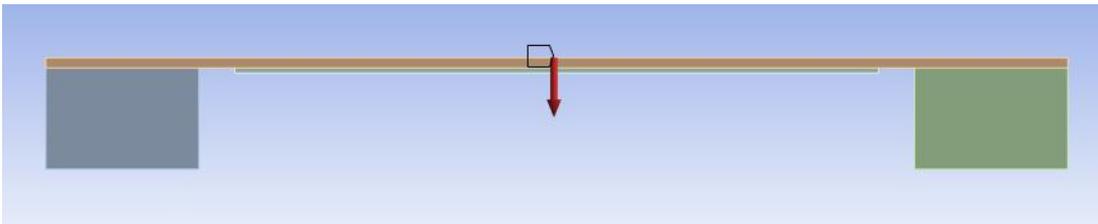


Figura 12 – Localização da força aplicada ao mecanismo.

Fonte: Os autores.

Como previamente explicado, a carga utilizada foi de 800 N por se tratar do esforço médio que a placa sofreria. Os resultados podem ser observados nos gráficos das Figuras 13 e 14.

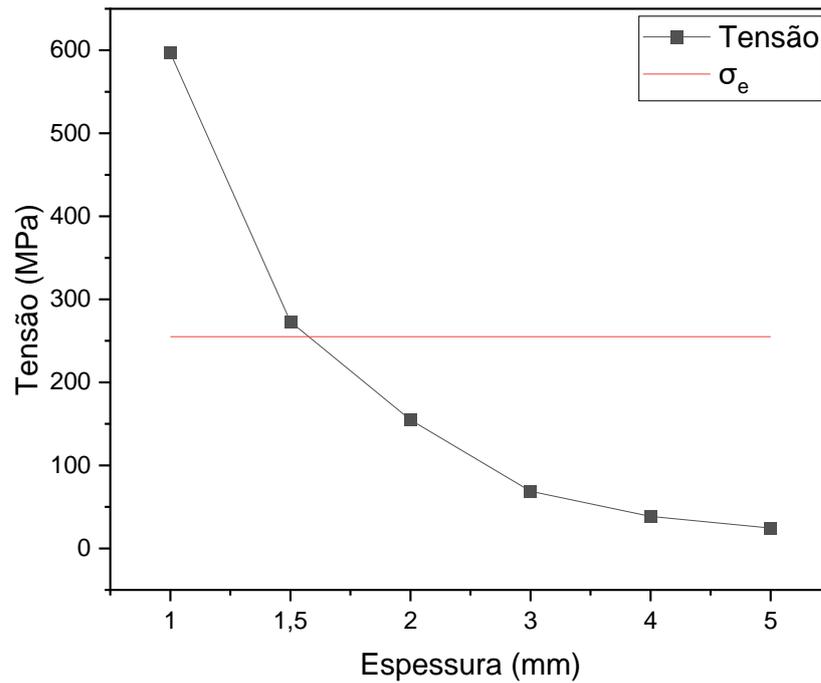


Figura 13 – Gráfico Tensão x Espessura para uma carga de 800 N.
Fonte: Os autores.

Vale ressaltar que essa carga foi apenas uma avaliação inicial considerando a ação de todo o peso de um ser humano através de um pé inteiro em uma única placa.

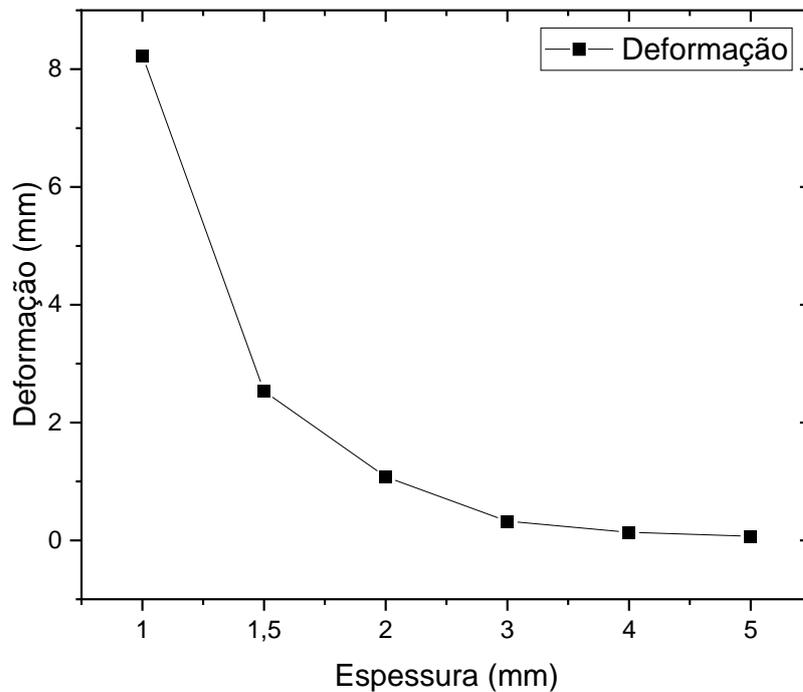


Figura 14 – Gráfico Deformação x Espessura para uma carga de 800 N.
Fonte: Os autores.

Tendo em vista a relação Deformação x Espessura, para as espessuras de 3 mm, 4 mm e 5 mm foram encontradas deformações muito baixas, o que possivelmente resultaria num baixo retorno energético por parte da placa piezoelétrica, sendo sem sentido seguir com a análise dessas espessuras caso os esforços envolvidos não ultrapassem tanto o valor de 800 N.

Já considerando a relação Tensão x Espessura, para os mesmos tamanhos citados no parágrafo anterior, foram encontradas tensões consideravelmente abaixo do limite de escoamento, porém como observado no gráfico da figura 14, esses valores possuem uma deformação muito baixa, o que resultaria num baixo retorno energético, o que reforçou o descarte desses valores de espessura.

Nesse sentido, as espessuras acima de 2 mm foram descartadas e os demais pontos foram escolhidos para um estudo paramétrico de carga visando avaliar qual seria a melhor escolha em uma gama de esforços distintos, dado seu comportamento positivo ao se considerar uma carga média.

Dessa forma, foram utilizados nesse estudo as espessuras de 1 mm, 1,5 mm e 2 mm. Os pontos intermediários 1,3 mm e 1,8 mm foram utilizados para uma melhor visualização do comportamento do material, porém devido à sua dificuldade de obtenção comercial, serão analisados apenas os pontos descritos anteriormente.

A abrangência de pesos escolhidos para essa avaliação foi definida de acordo com grupos de pessoas considerando faixas etárias e características físicas, sendo desde uma criança passando sobre o piso uma aproximação inicial do menor esforço que esse sistema sofrerá, por volta de 250 N ou menos. Também foram utilizados também valores intermediários para incluir uma faixa onde a maioria das pessoas se encontrariam, sendo este um valor médio de 800 N. Além disso, para considerar casos mais extremos de solicitação do sistema, foi considerado um limite de 2000 N.

Para as demais simulações utilizando as cargas divididas, a força foi aplicada nos elementos centrais da placa de alumínio, totalizando uma área de 144 mm^2 , conforme ilustrado na Figura 15.

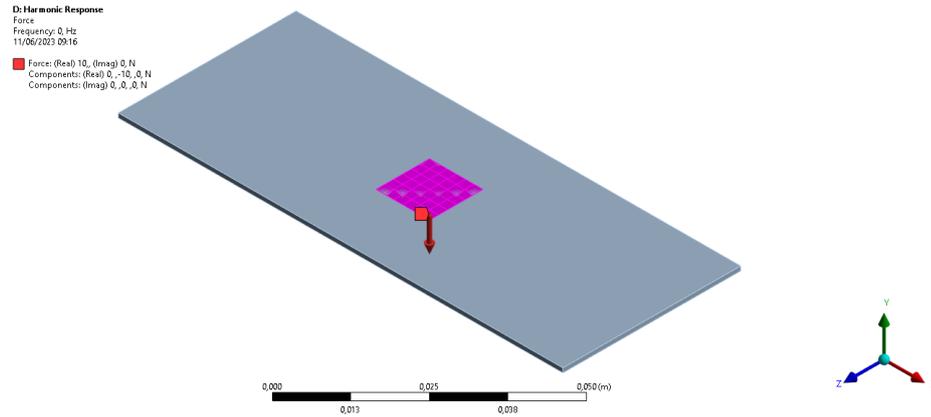


Figura 15 – Área de aplicação da força na simulação numérica.
Fonte: Os autores.

3.3 MÉTODO UTILIZADO

Para garantir a deformação do material e, conseqüentemente, a geração de energia, o piso piezoelétrico pode ser localizado na entrada localizada na Rua General Canabarro do campus Maracanã do CEFET/RJ, pois, assim, a deformação acontecerá no momento em que as pessoas pisarem sobre ele ao passarem pela catraca. Esse local foi escolhido baseado em um estudo de campo que consistia em analisar a quantidade de pessoas que transitavam pelo local selecionado do campus durante um intervalo de 15 minutos. Por razões de simplificação, a distância contabilizada entre os portões externos e a escada de acesso e entre os portões externos em si foi de aproximadamente 1 m, totalizando uma área de 1 m². Os turnos analisados, manhã, tarde e noite, referem-se respectivamente, aos horários aproximados de 9 h, 12 h e 18 h. Os resultados deste estudo encontram-se na Tabela 4:

Tabela 4 – Análise da quantidade de pessoas circulando em 15 minutos

Turno analisado	Quantidade de pessoas
Manhã	204
Tarde	139
Noite	240
Total diário	583

Fonte: Os autores.

Extrapolando esses dados, consegue-se obter uma estimativa da quantidade total de pessoas que passam por dia por essa área. Levando em consideração os horários avaliados, temos uma média de 13 pessoas por minuto passando pela entrada, ou, multiplicando por 60 minutos, 780 pessoas por hora. Sendo assim, os dados obtidos nas simulações para uma carga pontual podem ser multiplicados por 12.480, que foi considerada como a quantidade média de pessoas que passa por dia pela entrada da Rua General Canabarro do campus, considerando um horário de funcionamento de 16 horas ininterruptas, de 6 horas às 22 horas, tendo assim uma melhor noção da capacidade de geração, mais próxima a real.

Com isso estimado, uma chapa e um suporte serão considerados para garantir que o material piezoelétrico tenha uma proteção quando sofrer a força almejada. O método usado para decidir qual seriam os materiais desses itens citados foi a utilização do Ansys Workbench para analisar qual material resistiria ao esforço gerado por uma pessoa de 80 kg sem deformar plasticamente, sendo ao mesmo tempo aquele que possuísse a maior deformação, de modo a garantir que o piezoelétrico sofresse a maior deformação possível e, conseqüentemente, gerasse mais energia. Após essas análises, os materiais escolhidos para a chapa e para o suporte foram o alumínio e o aço, respectivamente.

Esses materiais foram escolhidos considerando os seguintes parâmetros: preço, deformação elástica quando submetido a uma força de 800 N, limite de escoamento acima da tensão que atuará no conjunto e facilidade na compra do material.

Para a chapa, o alumínio foi selecionado devido ao fato de ser um material metálico, que geralmente apresenta uma boa relação entre ductilidade e resistência mecânica. Em relação aos outros metais, o alumínio possui um bom comportamento quanto a intempéries, sendo menos suscetível à corrosão do que outros materiais metálicos, mesmo sendo utilizado em formatos com menor espessura. Sua seleção se deu por, além de possuir essa característica, ser facilmente encontrado comercialmente em uma diversa gama de espessuras variadas. A espessura é importante para permitir a maior deformação possível na chapa e, conseqüentemente, no piezo.

O suporte é projetado para permitir o máximo de deformação do conjunto alumínio e piezoelétrico, para isso foi pensado um suporte onde a chapa metálica ficasse bi-apoiada, permitindo assim a aplicação de uma carga pontual e distribuída, gerando a deflexão máxima no centro do conjunto chapa-piezoelétrico sem perder a estabilidade dado que as pessoas pisariam em cima dele. O material selecionado para a moldura foi o aço para manter uma

estrutura sólida, que, mesmo com a aplicação de altas cargas, não sofresse deformações como as desejadas no alumínio, e pudesse se manter em uma pequena geometria, sendo compacto e permitindo o sequenciamento dos conjuntos suporte-chapa-piezo.

O PZT utilizado possui as seguintes dimensões 63 x 32 x 0,5 mm (C x L x E). Assim, a chapa de alumínio dimensionada detém 10 centímetros de comprimento, 4 centímetros de largura e 1 milímetro de espessura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

O PZT é um piezoelétrico cerâmico, menos flexível e mais resistente a esforços mecânicos sendo, dessa forma, interessante a avaliação desse material para verificar o impacto na resistência e geração de energia do projeto.

Nesse sentido, o PZT foi selecionado para a simulação computacional e futura comparação com a prática.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos:

A Figura 16 mostra o gráfico da relação Tensão x Espessura para as diferentes cargas analisadas do conjunto alumínio e PZT, com o limite de escoamento do alumínio representado pela linha vermelha.

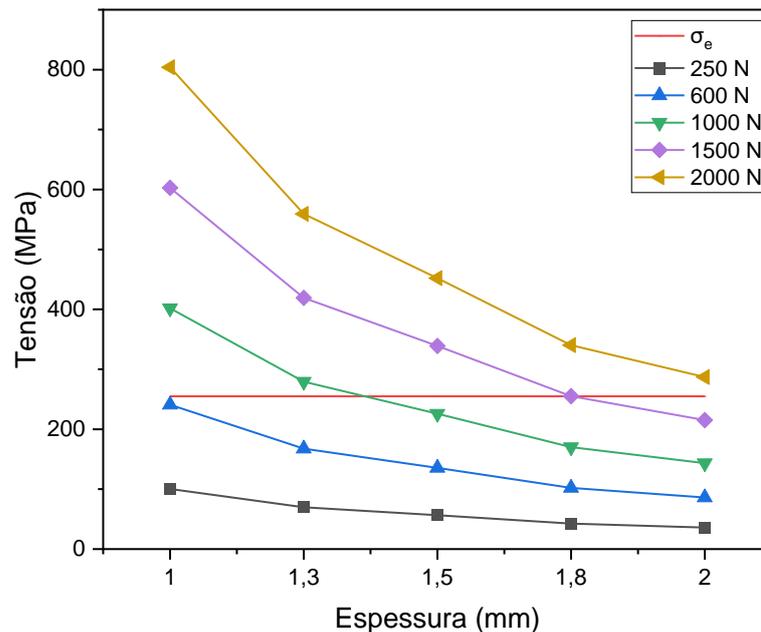


Figura 16 – Gráfico Tensão x Espessura para o conjunto.
Fonte: Os autores.

Ao analisar o gráfico acima, é possível observar que as tensões envolvidas são muito superiores ao limite de escoamento do alumínio, que é de 255 MPa, considerando as propriedades mecânicas médias de materiais típicos de engenharia retiradas de Hibbeler (2010) para o alumínio, que pode ser observada na Tabela 5, a seguir:

Tabela 5 – Propriedades mecânicas médias de materiais típicos de engenharia.

Materiais	Peso específico ρ (Densidade) (Mg/m ³)	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Módulo de elasticidade transversal (módulo de rigidez) G (GPa)	Tensão de escoamento (MPa)			Limite de resistência (MPa)			% de alongamento em corpo de prova de 50 mm	Coeficiente de Poisson ν	Coeficiente de dilatação térmica α (10 ⁻⁶)/°C
				Tração	Compr. ^b	Cisalh.	Tração	Compr. ^b	Cisalh.			
Metálicos												
Ligas de alumínio forjadas	2,79	73,1	27	414	414	172	469	469	290		0,35	23
2014-T6 6061-T6	2,71	68,9	26	255	255	131	290	290	186		0,35	24

Fonte: Hibbeler (2010).

Os únicos casos em que as tensões ficam abaixo do limite em todas as espessuras são para as cargas de 250 N e 600 N, sendo que para a carga de 600 N aplicada a uma chapa de 1 mm, o valor de tensão fica bastante próximo à 255 MPa.

Sendo assim, a fim de tornar os testes mais realistas, foi considerado que em uma pisada média, dado o tamanho do pé humano, ativará simultaneamente 4 conjuntos piezoelétricos. Com isso, é possível considerar que o esforço é dividido entre 4 placas e, dessa forma, as simulações foram refeitas, de modo que foram obtidos os seguintes resultados para Tensão x Espessura e Deformação x Espessura, que podem ser observados nos gráficos das Figuras 17 e 18, respectivamente. Em trabalhos futuros, pode-se realizar uma análise mais apurada da distribuição de carga por pisada, considerando uma modelada da pisada humana.

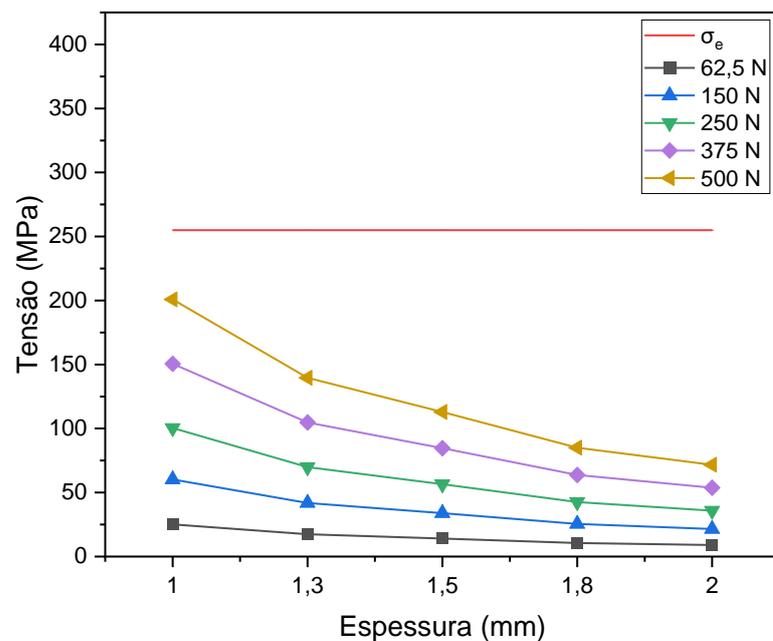


Figura 17 – Gráfico Tensão x Espessura para a carga dividida para o conjunto.

Fonte: Os autores.

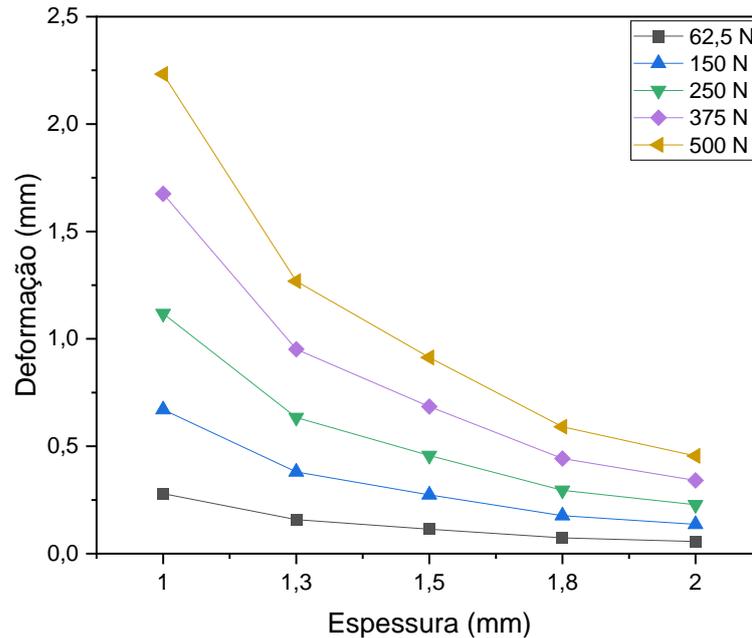


Figura 18 – Gráfico Deformação x Espessura para a carga dividida para o conjunto.
Fonte: Os autores.

Analisando-se o gráfico da Figura 16 e sendo o limite de escoamento do alumínio igual a 255 MPa, observa-se que todas as espessuras atenderiam a necessidade deste projeto, contudo, por fatores de maior possibilidade de geração de energia devido a maior deformação e por disponibilidade comercial, foi escolhida a espessura de 1,0 mm.

Esta espessura de chapa possibilita que ela não sofra uma tensão maior do que a de escoamento, evitando, assim, a deformação plástica, indesejada neste projeto uma vez que geraria alteração nas propriedades mecânicas do material, podendo gerar uma fratura com o decorrer do tempo.

Com isso em mente, o limite de escoamento é o maior empecilho, pois, ao se garantir a menor espessura possível para a não ocorrência da deformação plástica, trabalha-se com a maior deformação elástica possível, logo, essa deve ser a espessura utilizada.

Assim, por meio do estudo paramétrico, foi analisada a menor espessura possível em que a deformação plástica não ocorre. Além disso, o gráfico da Figura 17 mostra que a deformação máxima observada para uma chapa de 1,0 mm de espessura não ultrapassa 2,5 milímetros.

Seguindo além das análises de esforço estático, foi executada uma análise eletromecânica visando relacionar as espessuras avaliadas para a chapa de alumínio e a tensão elétrica gerada pelo PZT associadas às diferentes forças aplicadas sobre o conjunto.

A seguir, é apresentado, na Figura 19, o gráfico que ilustra os resultados obtidos na análise supracitada:

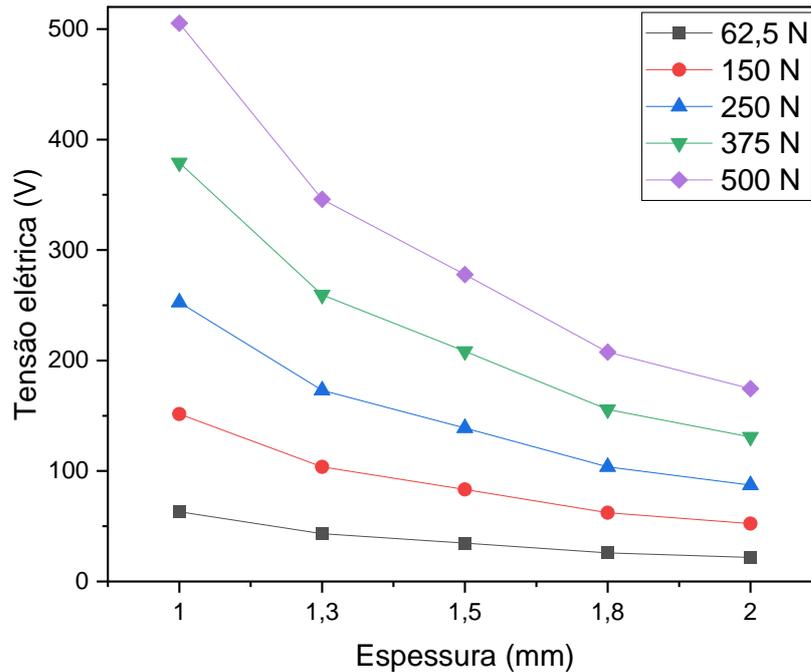


Figura 19 - Gráfico Tensão elétrica x Espessura para a carga dividida para o conjunto.
Fonte: Os autores.

O gráfico, como esperado, indica que quanto maior a carga aplicada e quanto menor a espessura da chapa de alumínio, maior é a geração de tensão elétrica pelo elemento piezoelétrico, isto é, os maiores retornos de tensão para cada força aplicada foram encontrados na espessura de 1 milímetro, enquanto os valores de tensão elétrica foram decrescendo com o aumento da espessura.

Desta forma, é possível concluir que, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 20, a melhor espessura para a placa de alumínio a ser escolhida é a de 1 mm, uma vez que a mantém dentro da zona elástica, evitando a indesejável deformação plástica e perda de eficiência na geração de energia e por gerar mais tensão elétrica quando comparada a maiores espessuras, em específico a espessura de 1,5 mm, por ser a mais próxima comercializada.

No gráfico da Figura 20, é realizada uma comparação entre cada força aplicada, a tensão elétrica obtida e a tensão mecânica gerada, confirmando assim, a hipótese inicial onde a

chapa de 1 mm atende aos esforços, mantendo-se abaixo da tensão limite de escoamento, com um maior retorno energético. As linhas com preenchimento cheio referem-se aos resultados de tensão elétrica, enquanto as linhas com preenchimento suavizado referem-se aos resultados de tensão mecânica.

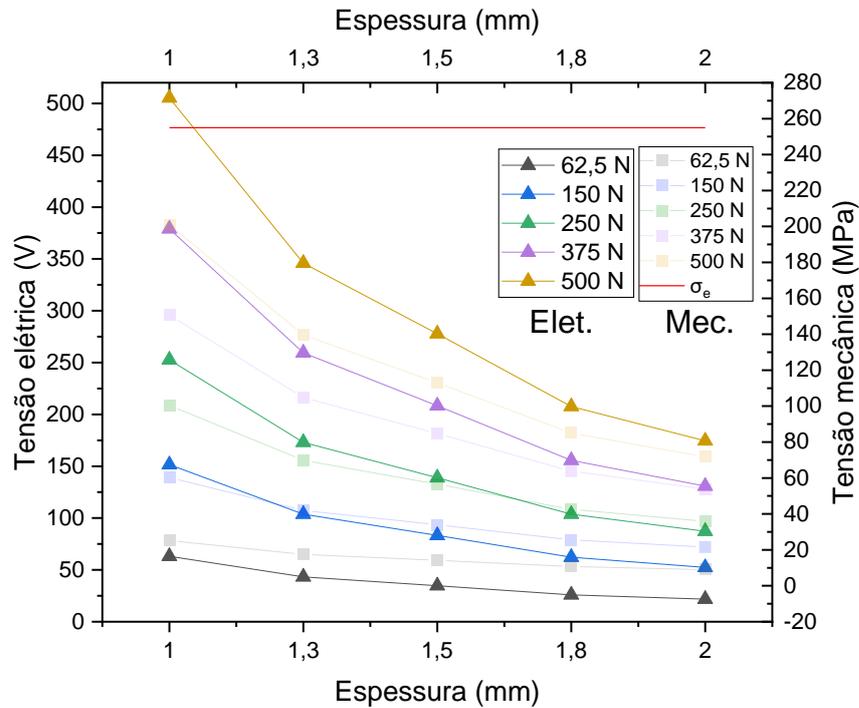


Figura 20 - Tensão Elétrica x Tensão Mecânica x Espessura para o conjunto.
Fonte: Os autores.

Dando prosseguimento ao estudo, foi verificado se o conjunto chapa-piezo permaneceria com as tensões máximas abaixo das críticas para cada material considerando a maior carga analisada (500 N), a fim de verificar os resultados de tensão mecânica na placa de alumínio e no PZT e a tensão elétrica máxima gerada nesta situação. Simultaneamente, verificou-se a deformação máxima do PZT, dado que seria menor que do alumínio por ser atenuado pela espessura da chapa acima dele. Ressalta-se que, para conexão entre as placas no Ansys, foi considerando um contato colado (*bonded*), onde não há pontos de fixação, e sim a superfície inteira em contato.

Sendo assim, na Figura 21, observa-se que o conjunto completo está submetido a grandes tensões devido a espessura da placa de alumínio, permitida por consequência da grande resistência do PZT. Dessa forma, é possível observar que em seu ponto crítico, a chapa de alumínio chega próximo da tensão limite de escoamento no conjunto com o PZT.

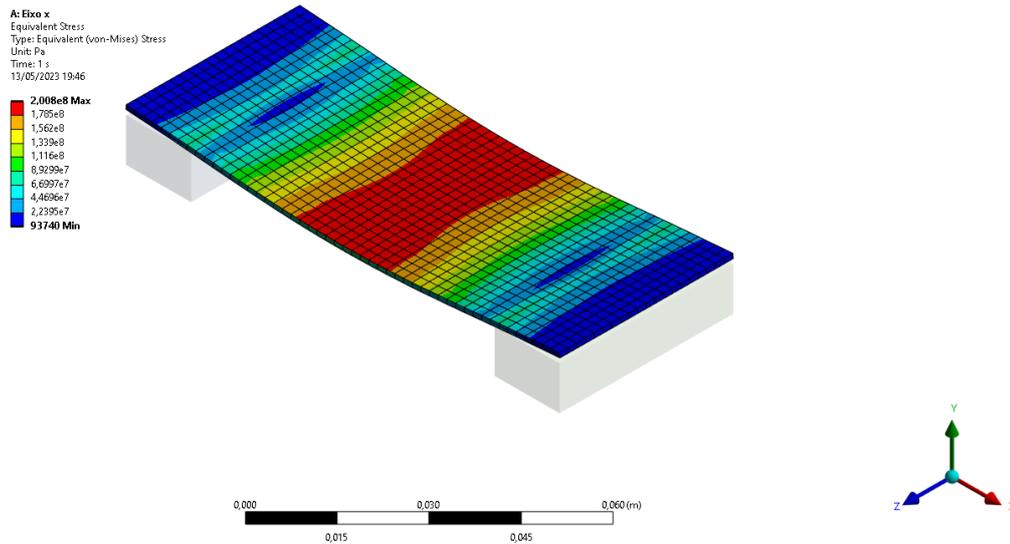


Figura 21 – Tensão máxima equivalente na placa de alumínio com PZT acoplado.
Fonte: Os autores.

Como é possível observar na Figura 21, acima, a tensão máxima no alumínio encontra-se, como esperado, no centro da placa e com módulo de aproximadamente 200,8 MPa, abaixo do limite de escoamento, que é de 255 MPa, considerando as propriedades mecânicas médias de materiais típicos de engenharia retiradas de Hibbeler (2010) para o alumínio.

É possível visualizar o comportamento de deformação da placa de alumínio na Figura 22, onde obtém-se que sua flecha máxima é de 0,0022326 m, ou 2,23 mm.

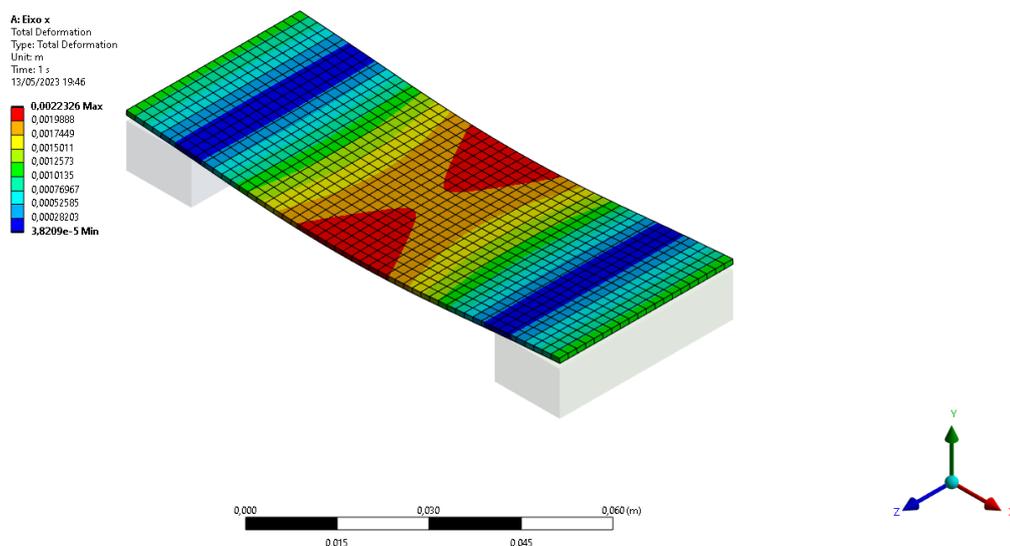


Figura 22 – Deformação máxima na placa de alumínio com PZT acoplado.
Fonte: Os autores.

Analisando, por sua vez, o PZT, o resultado de deformação é bem próximo ao do alumínio, porém a tensão é menor que a do alumínio, contudo, devido a pequena espessura do alumínio nesse sistema, o PZT fica responsável por tensões muito altas, tendo o seu valor crítico em aproximadamente 195 MPa.

Diferentemente do alumínio, o comportamento no PZT foi um pouco diferente: as tensões e o esforço máximo no piezoelétrico se concentraram na face inferior, como visualizado nas Figuras 23 e 24.

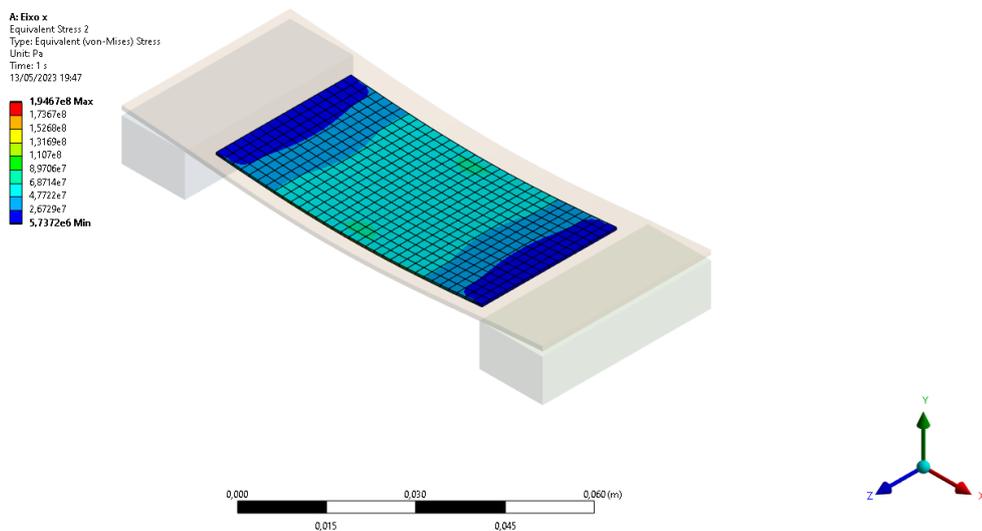


Figura 23 – Estado de tensão na superfície superior do PZT.

Fonte: Os autores.

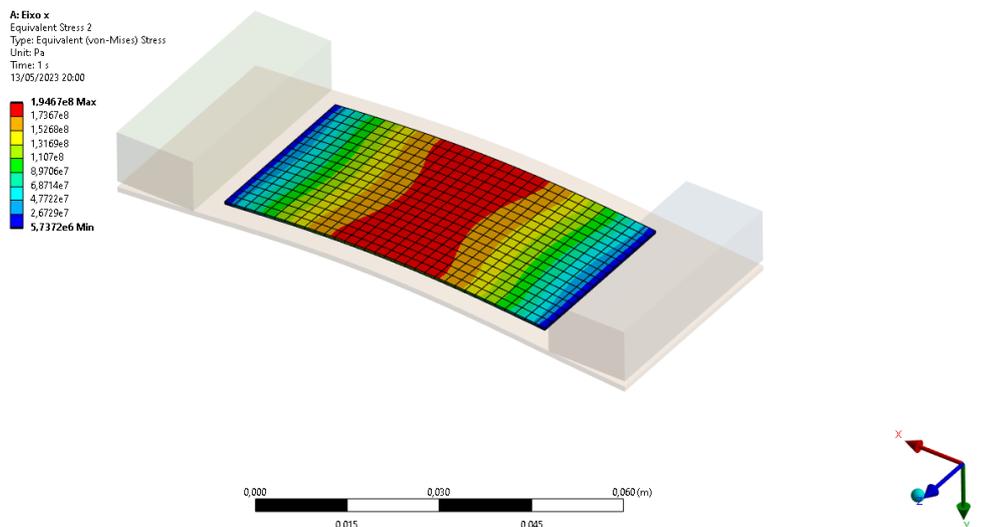


Figura 24 – Tensão máxima equivalente no PZT.

Fonte: Os autores.

Por último, dentre os esforços mecânicos, foi avaliada a deformação gerada no piezoelétrico que, como previsto, foi bem próximo ao do alumínio, com 0,00214 m, ou 2,14 mm, conforme indicado na Figura 25. Essa pequena diferença quando comparada a deformação do alumínio se dá devido a espessura de 1 mm da placa de alumínio.

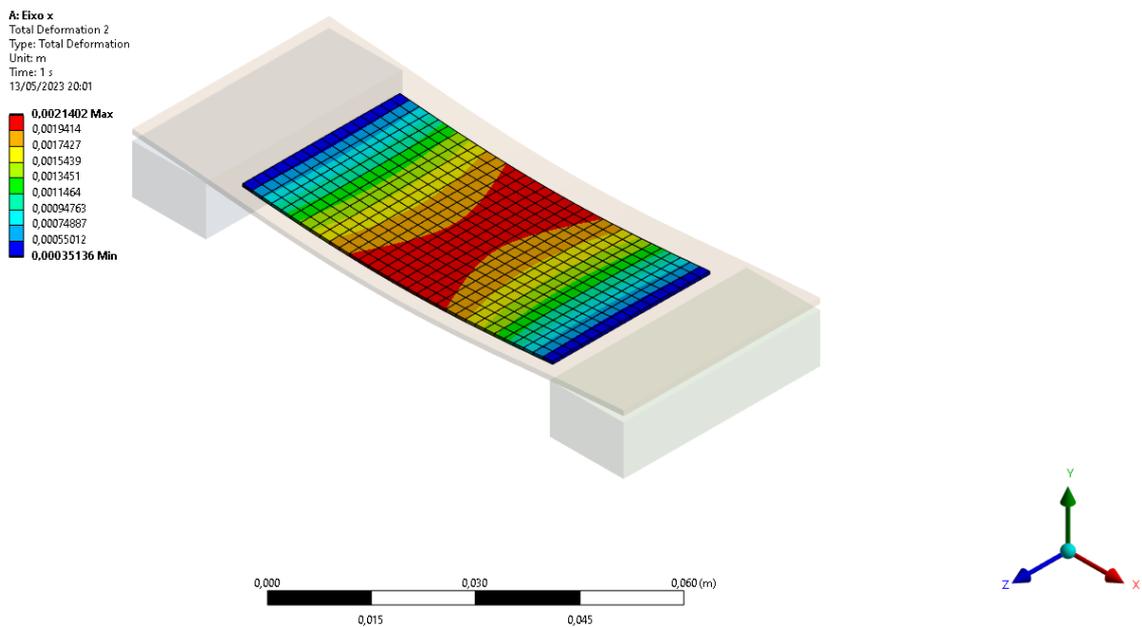


Figura 25 – Deformação máxima no PZT.
Fonte: Os autores.

Por fim, podemos concluir que, devido a esses fatores, a geração de energia apresentaria resultados significativos, mesmo com a alta rigidez do piezocerâmico selecionado, devido a pequena espessura da chapa de alumínio.

Dado todos esses valores obtidos com as análises dos esforços mecânicos para o pior caso possível do sistema alumínio-PZT, foi possível projetar a base/suporte com espaço suficiente para permitir a situação de maior deformação e tensão, como mostrado na Figura 26.

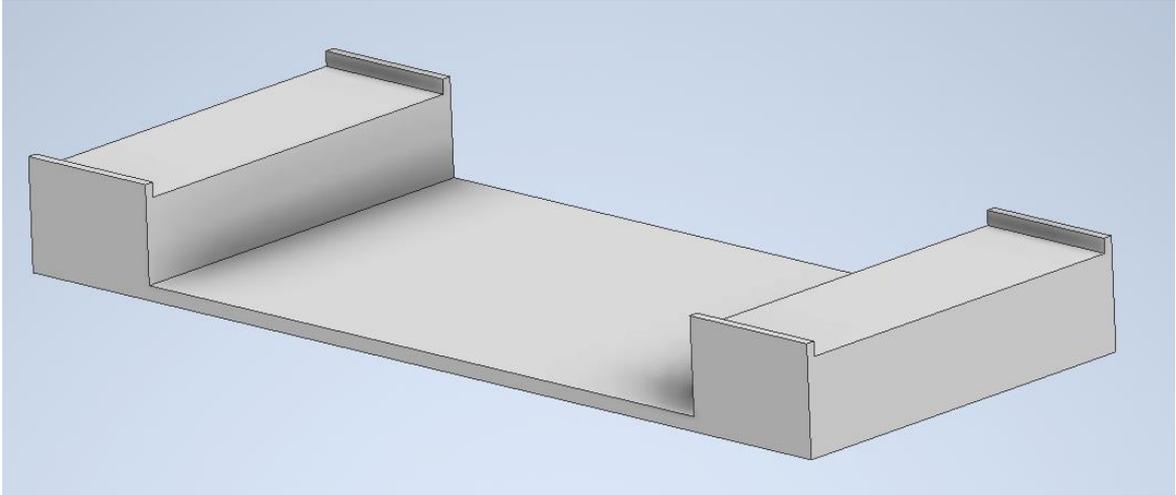


Figura 26 – Desenho 3D do suporte projetado.
Fonte: Os autores.

O projeto da base foi executado no software Autodesk Inventor e maiores detalhes quanto ao suporte projetado podem ser consultados no ANEXO A deste documento, onde é apresentado o desenho técnico desse componente.

Seguindo além das análises de esforço mecânico, foi utilizada a função modal no Ansys para avaliar os possíveis modos de deformação do sistema como um todo, além das frequências de ressonância do sistema.

Nesse sentido, o modo de deformação mais plausível para aplicação pensada, considera o caso mais crítico levado em consideração até agora, com a deformação máxima encontrando-se no centro do sistema, como observado na Figura 27:

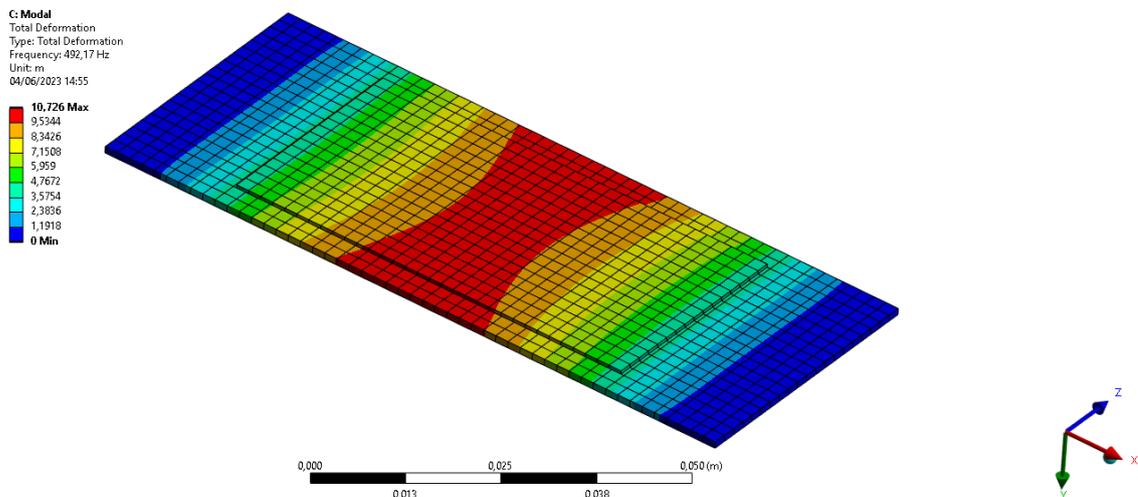


Figura 27 – Frequência de ressonância obtida a partir do modo de deformação crítico.
Fonte: Os autores.

A Figura 27 indica o modo de deformação crítico, no qual foi obtida uma frequência de 492,17 Hz.

Na aplicação deste trabalho, as frequências encontradas serão relativamente baixas em comparação a de ressonância. Com isso para a análise de tensão elétrica gerada, foi utilizado a frequência de 100 Hz, visando aproximar à um estudo acelerado, onde haveria o estímulo de 100 pisadas. Esse valor foi escolhido por encontrar-se distante da frequência de ressonância encontrada, o que impediria de haver um aumento na geração de energia indevido, retornando resultados falsos.

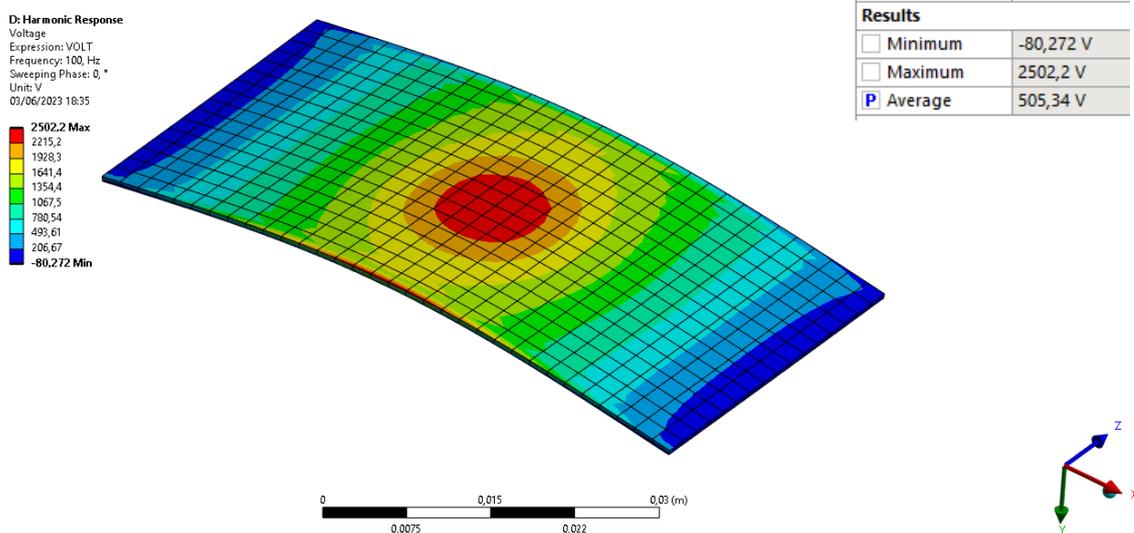


Figura 28 – Resultado de tensão elétrica gerada pelo PZT.
 Fonte: Os autores.

A Figura 28 mostra os valores de tensão elétrica gerada pelo transdutor de PZT para a maior carga analisada, que foi de 500 N, e frequência de 100 Hz. O valor médio encontrado foi de 505,34 V.

4.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Na segunda etapa deste projeto, foram realizados testes experimentais no Laboratório de Materiais e Sistemas Inteligentes (LASEI), do CEFET/RJ, por meio da construção de um protótipo que permitiu avaliar em condições mais próximas das reais os resultados encontrados e fazer comparações com os resultados obtidos na análise de elementos finitos.

Os testes foram realizados com o material piezoelétrico, mais especificamente o PZT-5A, disponibilizado pelo orientador desse projeto e com a compra de uma chapa de alumínio condizente com a projetada e da usinagem de um suporte apropriado para o conjunto em aço.

Para a realização desses testes, a chapa de alumínio foi cortada no intuito de obter algumas chapas menores de acordo com as dimensões projetadas, em uma das quais foi colado em sua parte inferior a placa de PZT-5A.

No que tange aos materiais utilizados, pode-se dividir em materiais do sistema e circuito elétrico.

4.2.1 Materiais do sistema e usinagem

A chapa de alumínio 1100 foi comprada nas dimensões de 300 x 300 x 1 mm (C x L x E) e foi posteriormente cortada com as dimensões de 100 x 40 mm (C x L) para a utilização no protótipo e encaixe no suporte. A chapa foi comprada com dimensão maior que a projetada devido a questões de disponibilidade comercial, de custo e também para caso necessário durante os experimentos práticos em laboratório, haver material sobressalente com as mesmas propriedades. A Figura 29 mostra a chapa de alumínio cortada nas dimensões desejadas.



Figura 29 – Chapa de alumínio cortada.

Fonte: Os autores.

O suporte de aço 1045 foi solicitado e fabricado pela empresa Unifer Mecânica de Precisão dentro das medidas do projeto apresentadas anteriormente com alteração na espessura da base inferior e, conseqüentemente, na altura total. A foto do suporte usinado pode ser visualizada na Figura 30. Maiores detalhes quanto ao suporte usinado podem ser consultados

no ANEXO B deste documento, onde é apresentado o desenho técnico com as alterações desse componente.

Para a realização do estudo acelerado que será apresentado posteriormente, foi necessário um suporte vertical não projetado nas fases teóricas. Porém, respeitando o material escolhido inicialmente visando manter a maior fidedignidade com os resultados, foram utilizados “L” e parafusos em aço para a fixação da chapa de alumínio.

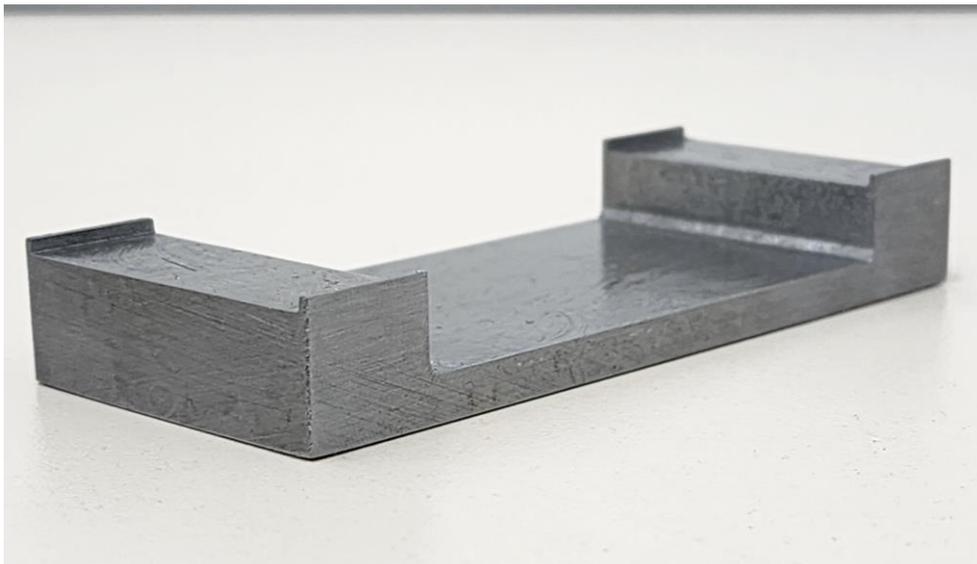


Figura 30 – Suporte de aço usinado.
Fonte: Os autores.

Para a montagem do sistema, a chapa de alumínio e o transdutor de PZT foram colados com uma fita dupla face de espessura desprezível, faltando, assim, somente o circuito elétrico do piezoelétrico para a conclusão do protótipo.

4.2.1.1 Circuito elétrico

Nesta seção, será apresentado o circuito elétrico necessário à geração de energia elétrica por meio da piezoelectricidade, onde serão explicados seus componentes e seu intuito de aumentar a tensão gerada pelo piezoelétrico, otimizando os resultados.

De forma sucinta, pode-se citar alguns dos principais componentes que devem ser utilizados:

- Transdutor piezoelétrico de PZT-5A 63 x 32 x 0,5 mm;
- Placa de *energy harvesting* LTC3588;

- Capacitor eletrolítico 2.200 μF x 35 V;
- Resistor de 220 Ω ;
- Cabos elétricos para conexão dos elementos;
- Botão de pressão/Chave;
- LED;
- Protoboard.

O transdutor utilizado é mostrado na Figura 31, a seguir:

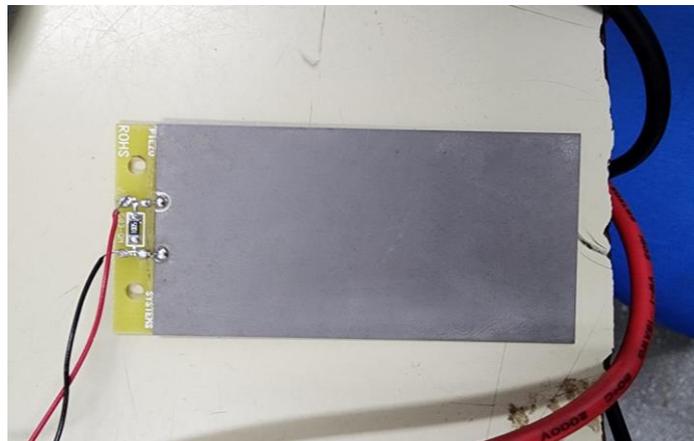


Figura 31 – Transdutor piezoelétrico de PZT utilizado.
Fonte: Os autores.

A placa retificadora LTC3588 e o capacitor utilizado foram comprados pela internet e são mostrados nas Figuras 32 e 33:

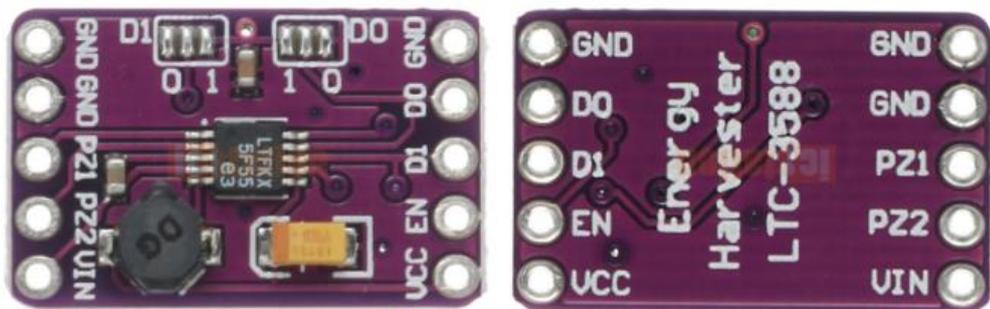
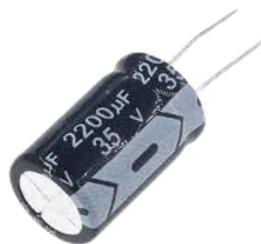


Figura 32 - Placa de energy harvesting LTC3588 utilizada.
Fonte: Os autores.



**Figura 33 – Capacitor eletrolítico de 2200 μ F x 35 V utilizado.
Fonte: Os autores.**

A Tabela 6 resume os itens utilizados para montar o circuito elétrico necessário a colheita de energia oriunda do transdutor piezoelétrico.

Tabela 6 – Itens utilizados na montagem do circuito elétrico.

Item	Quantidade	Descrição
1	1	LED vermelho
2	1	Resistor 220 Ω
3	1	Botão de pressão
4	1	Capacitor eletrolítico, 2200 μ F/35 V
5	1	Placa LTC 3588

Fonte: Os autores.

4.2.2 Equipamentos

Para a medição e registros dos dados do teste prático, foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Sistemas e Estruturas Inteligentes (LASEI) da *National Instruments* descritos abaixo:

- Chassi cDAQ-9174
- Módulo de aquisição de tensão de 16 bit e 16 canais – NI 9220
- Módulo de aquisição de tensão de 12 bit e 8 canais – NI 9221
- Módulo de aquisição de som e vibração com 4 canais – NI 9234

Tais equipamentos foram conectados ao computador e os dados interpretados pelo software *Signal Express*, também da mesma empresa. Na Figura 34 é possível ver o Chassi com seus módulos instalados.



**Figura 34 – Módulos da National Instruments utilizados nos experimentos montados no chassi.
Fonte: Os autores.**

Além dos equipamentos de aquisição de dados, para um estudo acelerado buscando aproximar os resultados do sistema em uso, foi utilizado o *Shaker Model 2025E-HF*, da Modal Shop, observado na Figura 35:



**Figura 35 - Shaker Model 2025E-HF utilizado no experimento acelerado.
Fonte: Os autores.**

4.2.3 Testes práticos

Na simulação prática, como esperado, foi observado que a corrente é gerada instantaneamente ao se exercer pressão na placa piezoelétrica, deformando-a e acendendo o LED a cada pulso. Observou-se, também, que durante o movimento de retorno do transdutor a sua forma inicial, ocorre a geração de corrente no sentido oposto da gerada quando a placa é pressionada, de modo que o LED não acendeu, uma vez que ele tem polarização semelhante a um diodo semiconductor (SOUSA *et al.*, 2018).

O gráfico da Figura 36 mostra a variação do sentido da corrente nos polos do transdutor piezoelétrico a cada pulso.

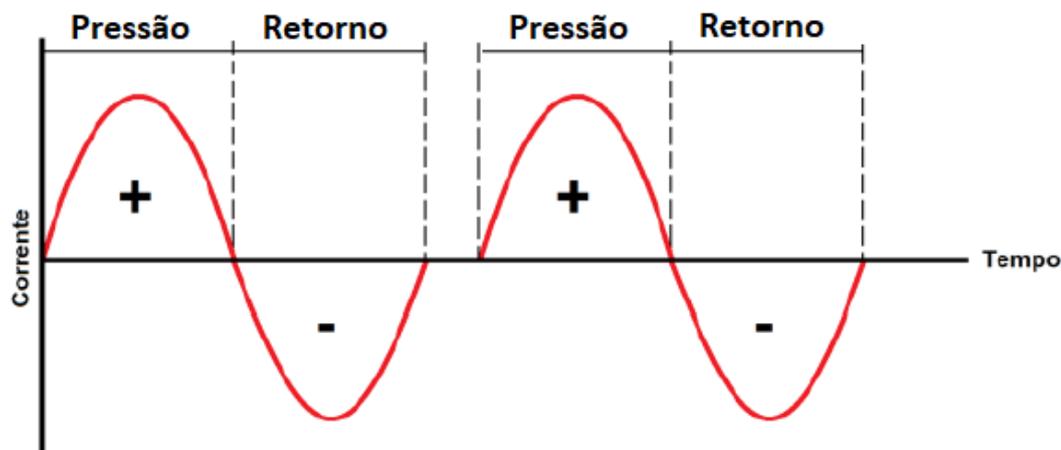


Figura 36 – Corrente elétrica sem retificação.
Fonte: Adaptado de Sousa *et al.* (2018).

Dessa forma, conclui-se que metade da energia gerada é desperdiçada, já que o LED só aproveita um dos semiciclos da corrente, a depender da ligação dos terminais, ou seja, a corrente direta à sua polaridade.

Nesse sentido, faz-se necessário o uso de uma ponte retificadora para aproveitar toda a energia gerada, de modo a converter a corrente alternada produzida pelo piezoelétrico em corrente contínua a ser recebida pelo LED. Esse processo é conhecido como retificação de onda completa e permite a alimentação do LED em sua polarização direta, tanto quando se pressiona o transdutor quanto no seu movimento de retorno a forma inicial, o que permite o aproveitamento total da energia produzida.

A ponte retificadora é composta por diodos semicondutores, que permitem a passagem de corrente em somente um sentido, ou seja, quando a polarização da fonte geradora é direta à sua polarização. A Figura 37 ilustra o comportamento da corrente elétrica ao passar pela ponte retificadora conforme o sentido da polarização varia, facilitando o entendimento da importância da retificação para o melhor aproveitamento da energia gerada pelo transdutor piezoelétrico.

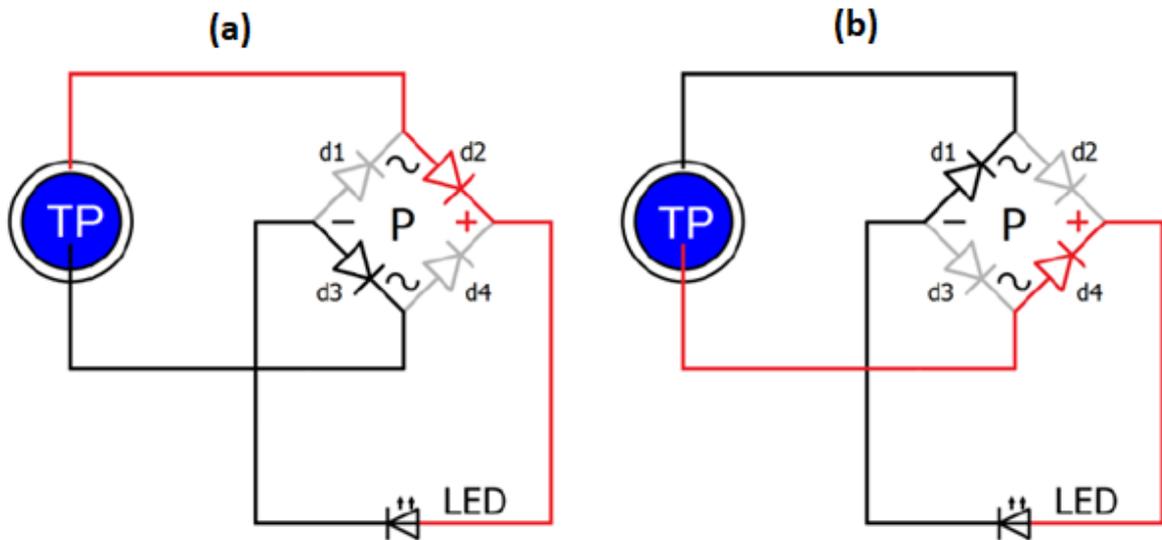


Figura 37 – Diagrama representativo do funcionamento da ponte retificadora.
Fonte: Sousa *et al.* (2018).

Na Figura 37-A, a corrente que sai do piezoelétrico, em vermelho, passa pelo diodo d2, que está diretamente polarizado, e é bloqueada pelos diodos d1 e d4, que estão inversamente polarizados. Após passar pelo LED, a corrente, em preto, passa pelo diodo d3 e retorna para o piezoelétrico.

Na Figura 37-B, quando a polarização do piezoelétrico é invertida, a corrente passa pelo diodo d4 e é bloqueada pelos diodos d2 e d3. Após passar pelo LED, a corrente passa pelo diodo d1 e retorna para o transdutor. Nota-se que independente do sentido da corrente gerada no piezoelétrico, o LED recebe corrente direta à sua polarização.

O gráfico da Figura 38 mostra o efeito da retificação da corrente a cada pulso. Através dele, é possível observar que todos os semiciclos agora são positivos, o que indica que ocorre a retificação de onda completa.

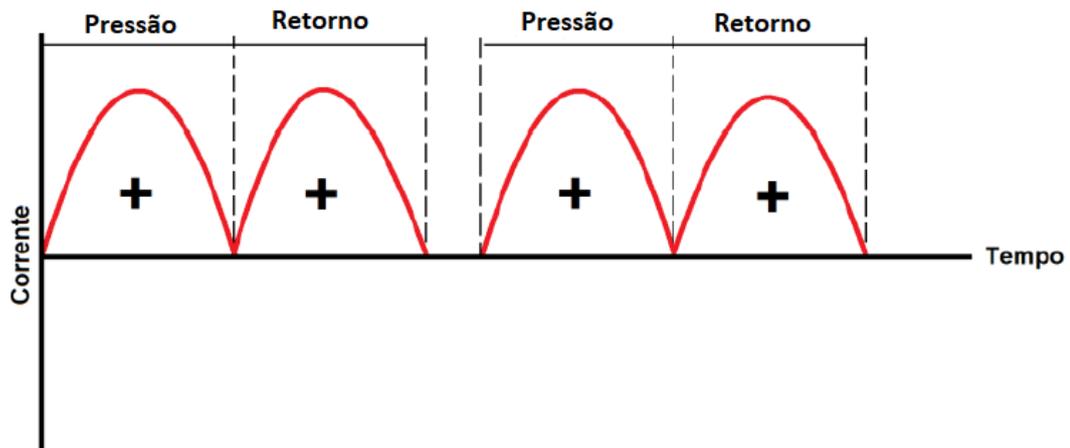


Figura 38 – Corrente elétrica retificada.
Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2018).

No caso deste trabalho, não foi necessário a montagem de uma ponte retificadora com diodos pois ela já vem integrada a placa de *energy harvesting* LTC3588 utilizada, conforme pode ser observado nas Figuras 39-A e 39-B.

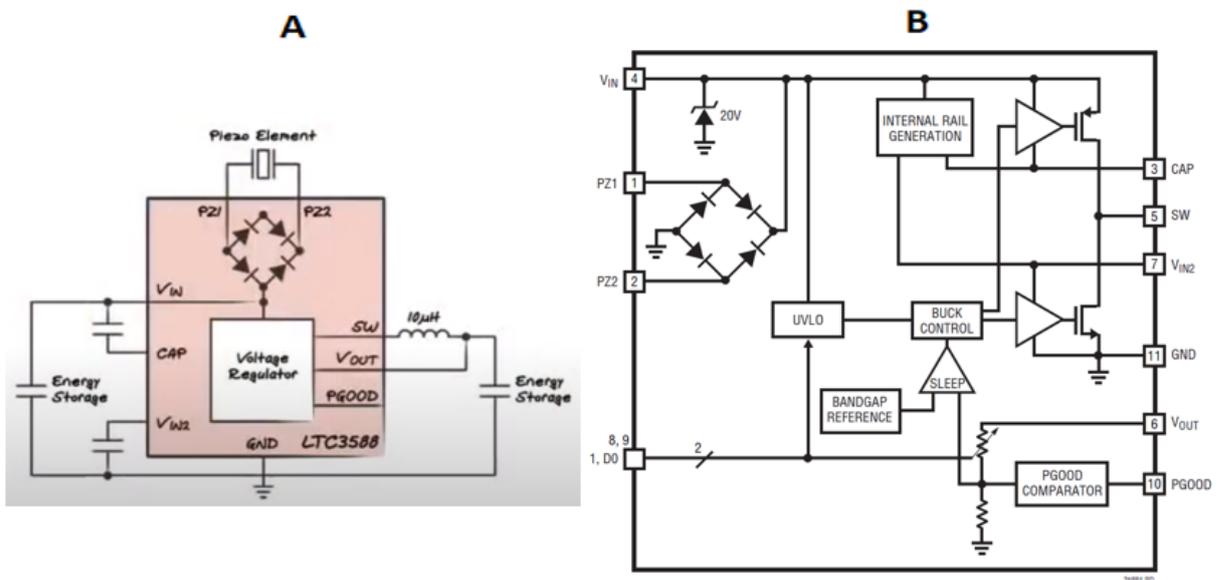


Figura 39 – A: Diagrama esquemático da placa LTC3588. B: Diagrama de bloco da placa LTC3588.
Fonte: Linear Technology (2010).

Mesmo com a retificação da corrente solucionando a questão do desperdício de energia, a geração ainda acontece intermitentemente, em pulsos, sendo possível observar essa variação realizando a ligação direta do circuito transdutor, placa retificadora e LED. Os

intervalos nos quais o LED acende e apaga diminuiu comparativamente ao sistema sem a ponte retificadora, porém ainda é visível a variação.

Com o intuito de solucionar esta questão, foi integrado no circuito um capacitor de 2200 μF . Seu papel será, simultaneamente, armazenar a energia gerada e distribuir de maneira constante para alimentar, no protótipo, o LED. Esta adição resolveu a intermitência do LED e permitiu a continuidade de utilização mesmo sem a excitação contínua do transdutor.

Sendo assim, o protótipo foi montado da seguinte maneira: foi soldado um fio no polo positivo e um no polo negativo do transdutor, essas saídas foram ligadas na placa retificadora, respectivamente nas entradas “PZ1” e “PZ2”. Em seguida, a placa foi colada na chapa de alumínio, e apoiada sobre o suporte. Paralelamente a isso, foi montado o circuito composto por um LED, um capacitor, um resistor e um botão de pressão (interruptor).

Na saída de tensão contínua da placa, indicada por “VCC”, são ligados o LED e o capacitor. Seguindo o circuito, são conectados um botão de pressão após o LED com a função de ser a chave interruptora e, logo em seguida, um resistor de 220 Ω para limitar a corrente elétrica e evitar a queima do LED, que chega ao terra da placa, indicado por “GND”, onde também é ligado o outro terminal do capacitor. O capacitor é ligado em paralelo à fonte de tensão para ser carregado e alimentar o LED de forma constante durante certo período. Dessa forma, ao apertar o botão, a carga armazenada no capacitor é liberada, acendendo o LED.

As Figuras 40 e 41 mostram fotos do circuito montado na protoboard.

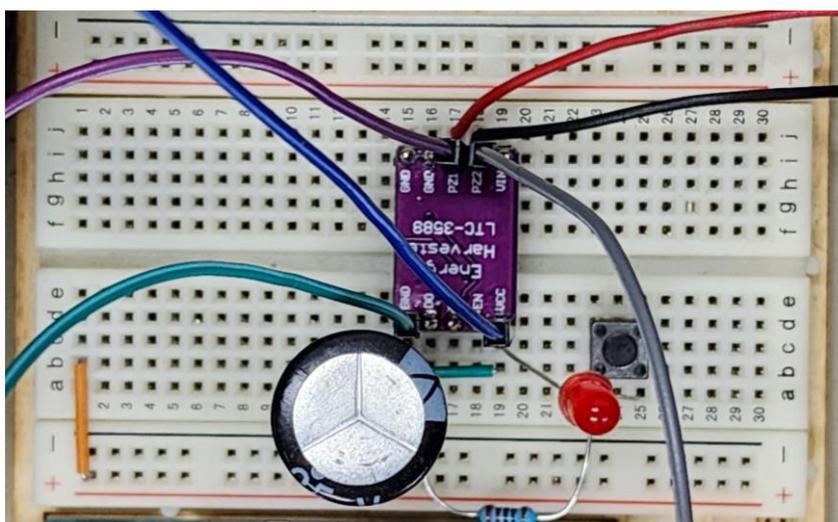


Figura 40 – Vista superior do circuito montado.

Fonte: Os autores.

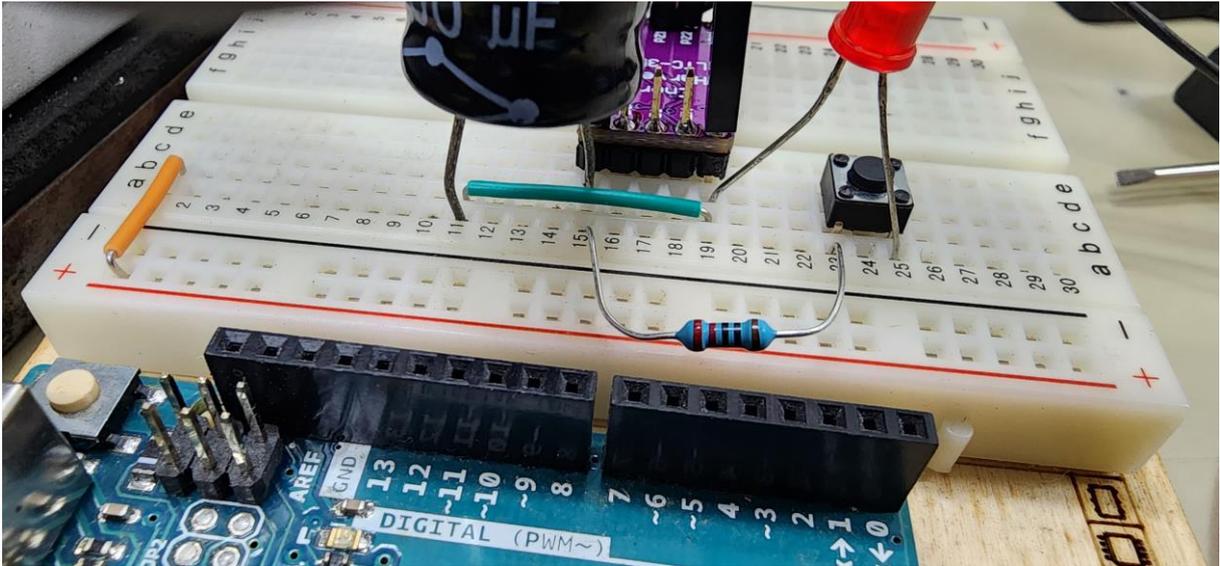


Figura 41 – Vista lateral do circuito montado.
Fonte: Os autores.

As Figuras 42 e 43 mostram, respectivamente, o desenho esquemático do circuito e a montagem dele no software online Tinkercad.

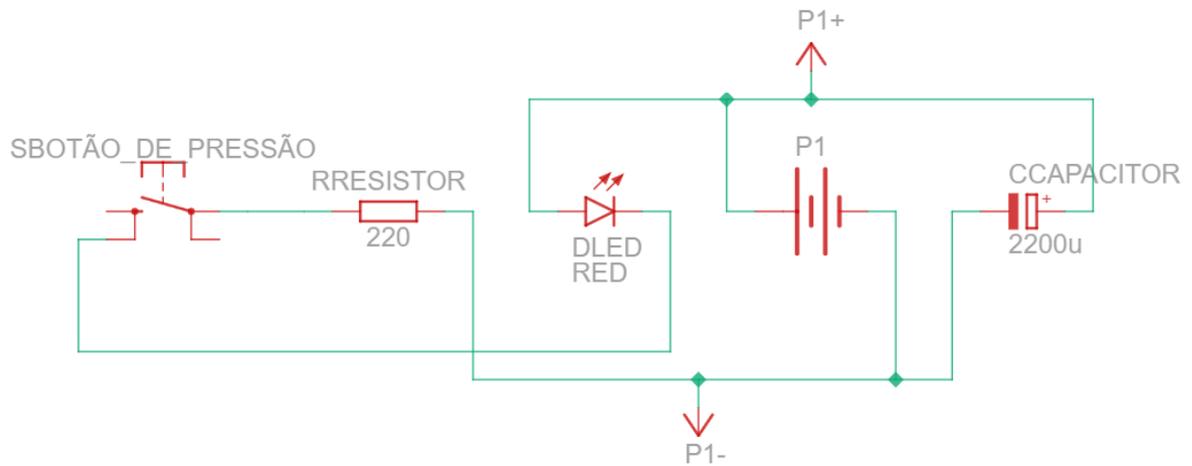


Figura 42 – Desenho esquemático do circuito eletrônico.
Fonte: Os autores.

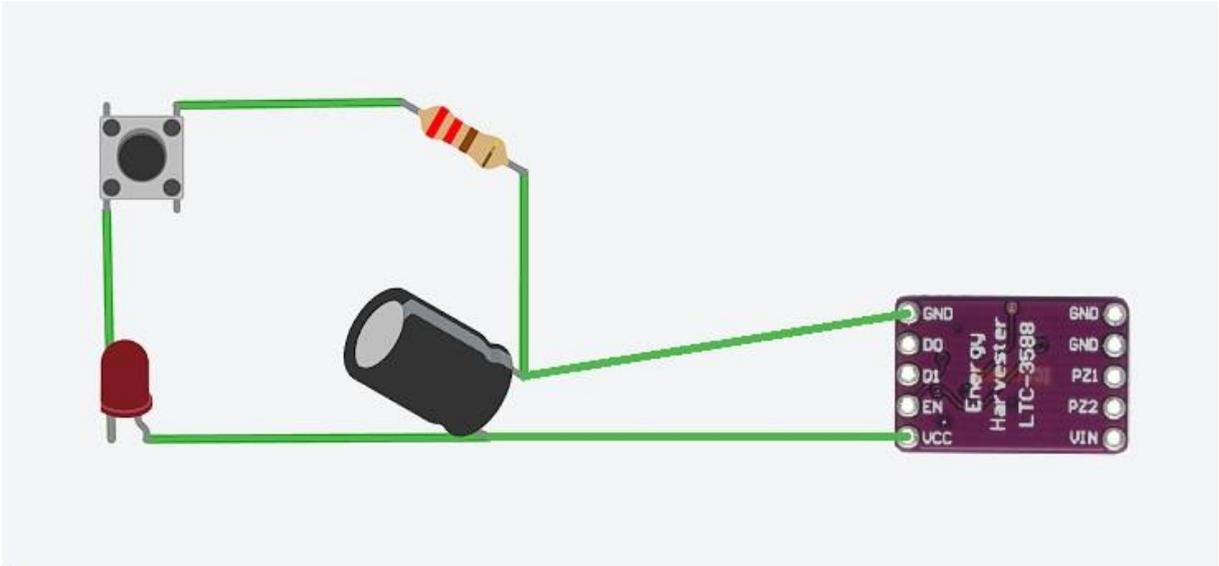


Figura 43 – Ilustração da montagem realizada no Tinkercad.
Fonte: Os autores.

Para acompanhar a geração de tensão e o carregamento do capacitor, as entradas da placa PZ1, PZ2 e GND foram conectadas ao módulo NI 9221, que repassou os dados ao computador e que puderam ser visualizados nos gráficos traçados no software *Signal Express*.

A Figura 44 mostra as conexões no módulo utilizado, enquanto a Figura 45 mostra os gráficos gerados no software.

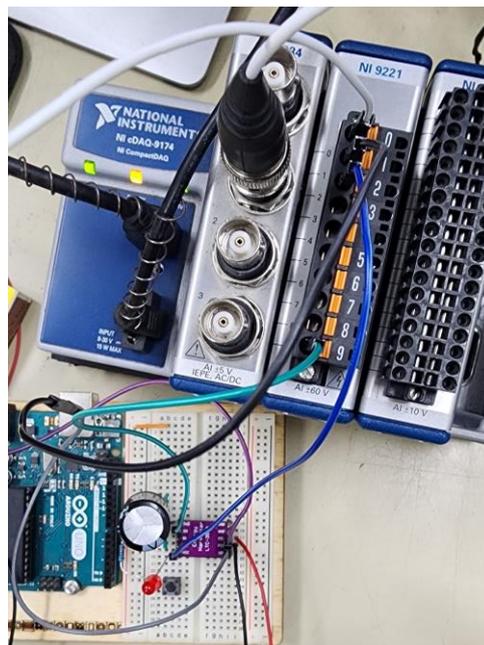
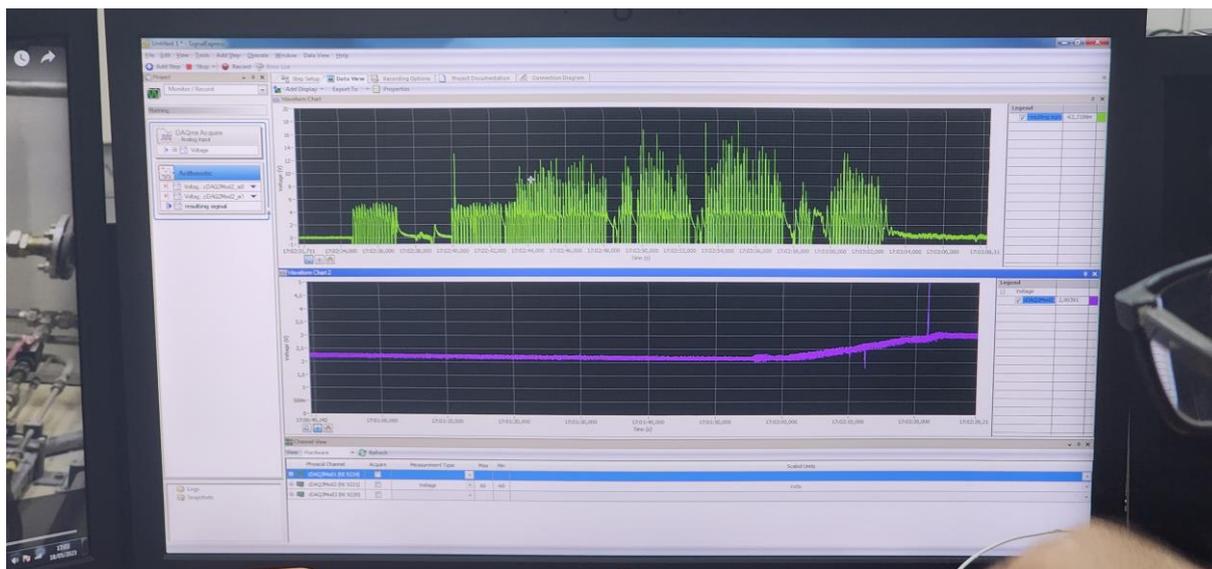


Figura 44 – Circuito conectado ao módulo de aquisição de tensão.
Fonte: Os autores.



**Figura 45 – Gráficos de geração de tensão (acima) e carregamento do capacitor (abaixo) gerados no Signal Express.
Fonte: Os autores.**

O gráfico de cor verde, na parte de cima, mostra a tensão gerada pelo transdutor piezoelétrico já retificada pela placa. O gráfico de cor roxa, na parte de baixo, mostra a tensão no capacitor, de modo que é possível visualizar seu carregamento.

Visando uma melhor otimização do tempo dos experimentos práticos, foi realizada uma análise acelerada com o uso de um *shaker* Model 2025E-HF em uma frequência variável de 100 Hz, zerando e subindo novamente para a frequência inicial. Como é possível observar na Figura 45, foram realizados dois ciclos do *shaker*. As maiores tensões encontram-se próximos ao início e fim de cada ciclo, como esperado, pois, há uma maior quantidade de estímulos num menor período. Na frequência inicial de 100 Hz, pode-se considerar a ação de 100 pisadas no piso piezoelétrico, sendo assim possível avaliar a geração de energia e o tempo de carregamento do capacitor utilizado.

As Figuras 46 e 47 mostram, respectivamente, o gráfico de geração de tensão ao longo do tempo ao se variar a frequência e o gráfico de carregamento do capacitor para o mesmo intervalo de tempo e frequência.

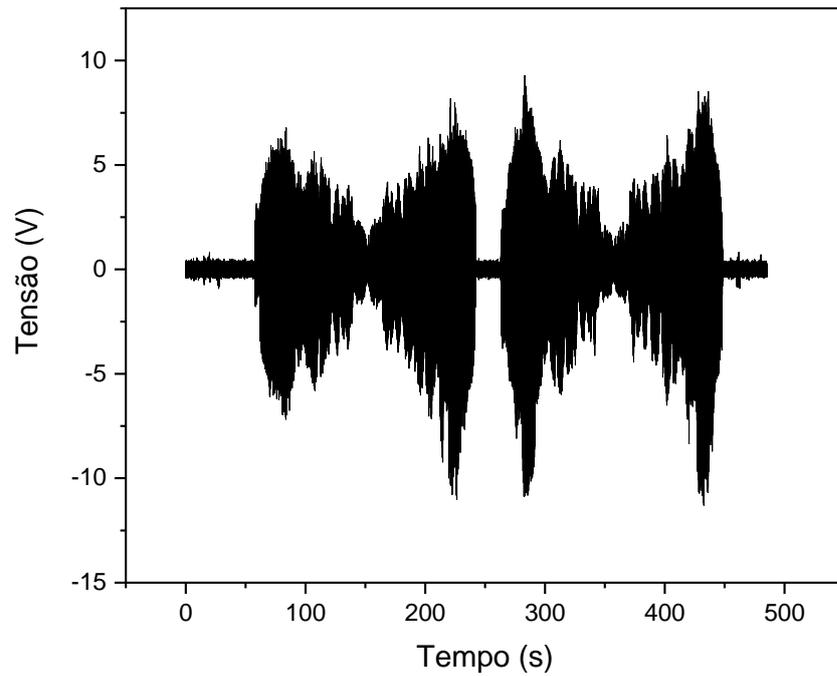


Figura 46 – Geração de tensão elétrica no transdutor de PZT x tempo.
Fonte: Os autores.

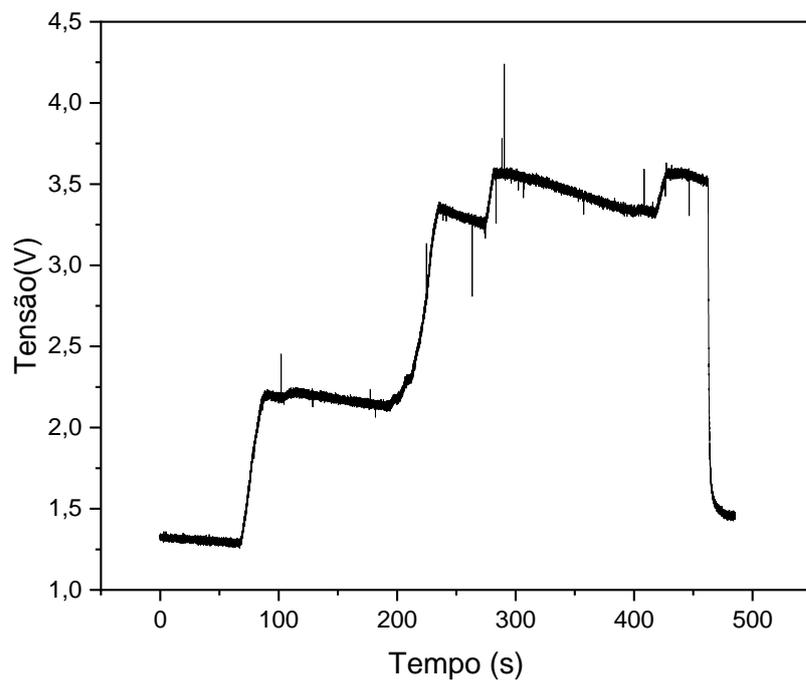


Figura 47 – Gráfico de carregamento do capacitor x tempo.
Fonte: Os autores.

Relacionando os dois gráficos anteriores, é possível aproximar um valor de pisadas para carregar o capacitor por completo.

Considerando a frequência inicial, de 100 Hz, é possível estimar que foram dados 100 passos no intervalo de um segundo, nesse mesmo segundo o capacitor carregou de 1,3 V para 2,3 V, comportamento similar ao que acontece no final do primeiro ciclo, onde a frequência aproxima-se de 100 Hz e o capacitor carrega de 2,3 V para 3,3 V. No segundo ciclo, a subida de carga nos mesmos pontos é menor, porém isso é devido a saída da placa retificadora, que é limitada a um máximo de 3,6 V, sendo esse valor o atingido nos dois momentos onde encontravam-se com 100 Hz.

Outro ponto a ser destacado é que após a descarga do capacitor ao ligar o LED, a tensão nele não zera e, sim, estabiliza-se por volta de 1,3 V com uma descarga lenta comparativamente às cargas, o que diminuiria a quantidade de pisadas em geral para carga completa após o primeiro ciclo de carregamento.

Sendo assim, pode-se considerar que para a primeira carga completa do capacitor seriam necessárias aproximadamente 360 pisadas, e após a descarga dele seriam necessárias aproximadamente 230 pisadas, sendo esse valor crescente quanto mais tempo demorar a ter o próximo estímulo.

Como foi medido apenas tensão elétrica, para obter a potência do transdutor piezoelétrico, faz-se necessário o cálculo da corrente. Para calcular a corrente elétrica gerada, foi utilizada a Lei de Ohm, regida pela equação 3, a seguir:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

Onde:

R = resistência elétrica, em Ohm (Ω);

V = tensão elétrica, em Volt (V);

I = corrente elétrica, em Ampere (A).

Para calcular a potência elétrica, foi utilizada a equação 4, a seguir:

$$P = V \cdot I \quad (4)$$

Onde:

P = potência elétrica, em Watt (W);

V = tensão elétrica, em Volt (V);

I = corrente elétrica, em Ampere (A).

Ressalta-se que foi considerado um circuito fechado com um componente de resistência conhecida, o resistor de 220Ω , e, no caso deste estudo, por se tratar de apenas um elemento piezoelétrico, a ligação pode ser considerada em série.

Nesse sentido, a tensão gerada máxima foi de 3,6 V, valor esse que é limitado devido à saída da placa retificadora. Com isso, a corrente gerada foi calculada em 0,016 A e a potência em 0,0576 W ou 57,6 mW. Os valores estão apresentados na Tabela 7.

Dessa forma, visando uma maior corrente total, na montagem real do piso piezoelétrico optar-se-ia pelo circuito paralelo, uma vez que quando o circuito está em paralelo as correntes são somadas para obter a corrente total, enquanto quando o circuito é em série, a corrente é a mesma. O inverso ocorre para a tensão, ou seja, quando o circuito está em paralelo a tensão é a mesma, e quando está em série, as tensões são somadas para obter a tensão total. (MALVINO e BATES, 2016). Ademais, a escolha pelo circuito em paralelo é respaldada por outros trabalhos que também escolheram o circuito paralelo, sempre com o intuito de se obter mais corrente elétrica, como os de Rezende (2020) e Field (2015).

Tabela 7 – Resultados elétricos de circuito fechado.

Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (mW)
3,6	0,016	57,6

Fonte: Os autores.

4.3 COMPARAÇÃO

Considerando todo o exposto anteriormente, é possível realizar uma comparação direta entre os resultados da simulação no Ansys e os resultados práticos.

Para âmbito de comparação, foram utilizados os mesmos parâmetros na simulação e no teste prático: a espessura da chapa de alumínio de 1 mm, a carga definida de 10 N aplicada no ponto central do conjunto.

Dessa forma, a máxima tensão elétrica gerada pelo piezoelétrico acoplado ao alumínio na simulação numérica foi de aproximadamente 50 V, enquanto a tensão elétrica média foi de cerca de 10 V, como visto na Figura 48.

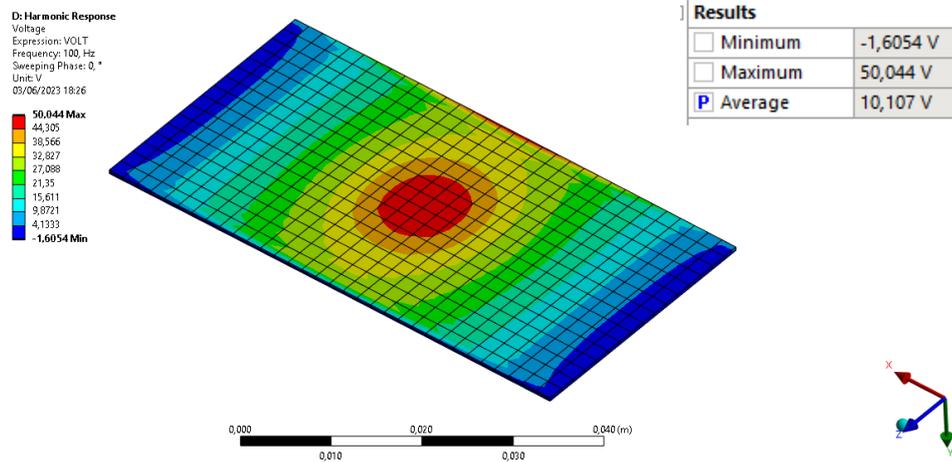


Figura 48 – Resultado de tensão gerada na placa piezoelétrica de PZT.
Fonte: Os autores.

Enquanto isso, a mesma situação foi replicada experimentalmente, utilizando pesos padrão de 200 g, 500 g e 1 kg de massa. Os resultados mostram, como visto no gráfico da Figura 49, que a máxima tensão gerada foi de aproximadamente 25 V, pontos esses encontrados nos momentos de 20 e 40 segundos do gráfico da Figura 49.

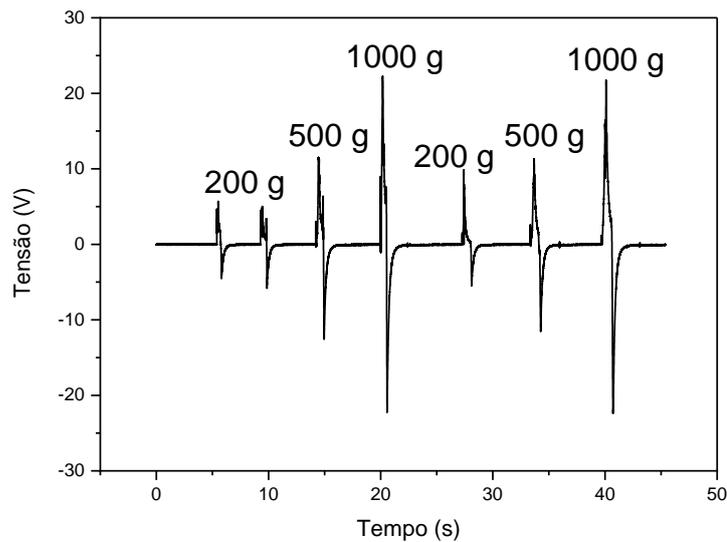


Figura 49 – Gráfico de geração de tensão de circuito aberto para diferentes massas aplicadas ao conjunto PZT/chapa de alumínio.
Fonte: Os autores.

Além disso, o valor médio de tensão elétrica obtido numericamente aproxima-se do resultado numérico observado no trabalho de Valente (2019) e do resultado experimental obtido no trabalho de Souza et al. (2018). Com relação ao valor máximo de tensão elétrica verificado experimentalmente, este foi próximo dos valores obtidos por Rezende (2020) e distantes dos encontrados por Ferreira (2017).

Deve-se ressaltar, contudo, que, apesar dos valores próximos encontrados, as análises realizadas foram diferentes das consideradas neste projeto, assim como as cargas aplicadas e o número de elementos piezoelétricos utilizados, não sendo possível, assim, validar os resultados encontrados. Uma possível explicação para o encontro de valores próximos com uma quantidade diferente de transdutores é a melhor qualidade dos parâmetros eletromecânicos do PZT-5A utilizado neste trabalho, já que ele foi capaz de gerar mais energia mesmo com uma carga menor e a menor quantidade em relação aos demais estudos.

Ressalta-se que, apesar de existirem trabalhos semelhantes, a escassez de trabalhos disponíveis utilizando as mesmas premissas adotadas neste projeto dificulta uma comparação mais precisa e que ajude a validar os resultados obtidos, sendo necessário um estudo futuro mais aprofundado. A literatura apresenta muitos estudos que envolvem a análise de movimentos vibratórios e verificam a geração de energia em função da frequência aplicada, o que não é o caso deste trabalho.

4.4 CÁLCULO ESTIMADO DO TEMPO NECESSÁRIO PARA CARGA DE BATERIAS

Visando verificar a viabilidade da utilização do piso piezoelétrico, foi realizado um cálculo estimado do tempo de carregamento inicial de diferentes tipos de baterias, assim como o número de pisadas necessárias. Para isso, foi utilizada a fórmula da energia armazenada no capacitor, apresentada a seguir:

$$E = \frac{C \times V^2}{2} \quad (5)$$

Onde:

E = energia, em Joule (J);

V = tensão elétrica, em Volt (V);

C = capacitância, em Farad (F).

Nesse sentido, os resultados foram obtidos considerando a ação da passagem de 13 pessoas por minuto, conforme estudo de campo apresentado no item 3.3 deste documento, em uma placa de 1 m², que seria composta por 250 placas piezoelétricas em uma disposição semelhante ao estudo inicialmente realizado no presente projeto. Dessa forma, pode-se considerar a ação de 26 pisadas por minuto, uma vez que uma pessoa acionaria duas vezes o mesmo piso.

Para o cálculo, foi considerada uma ligação em paralelo dos 250 transdutores piezoelétricos no intuito de aumentar a tensão, e, conseqüentemente, a energia. Isso porque nas ligações em paralelo as tensões se somam. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados estimados de carregamento inicial de diferentes tipos de baterias.

Dispositivo	Capacidade	250 placas (1 m ²)	
		Pisadas	Tempo
Bateria LR41	40 mAh	90	3,5 min
Bateria Mi Band 8	180 mAh	1.013	39 min
Bateria Galaxy Watch 3	330 mAh	1.824	1,2 h
Bateria de celular (J5)	2600 mAh	14.371	9,2 h

Fonte: Os autores.

Vale ressaltar que os valores apresentados na Tabela 8 são referentes ao primeiro carregamento e que, uma vez carregadas, a energia armazenada é liberada aos poucos, de modo que as baterias não precisarão ser recarregadas do zero, o que diminui o tempo de carregamento em geral, já que elas são carregadas e descarregadas concomitantemente.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho permite as seguintes conclusões:

A geração de energia do protótipo analisado é baixa. Isso pode ser explicado pela qualidade dos parâmetros eletromecânicos do material piezoelétrico escolhido. Existem diferentes modelos de transdutores com diferentes parâmetros, sendo que os que tem valores melhores são mais caros, sendo inviável financeiramente de serem utilizados para o estudo aqui abordado.

O resultado de tensão na prática foi menor que o teórico. Essa diferença pode ser explicada devido à falta de otimização da geometria da placa utilizada na simulação numérica no Ansys e às diferenças nas propriedades dos elementos piezoelétricos utilizados na teoria e na prática: os parâmetros eletromecânicos do PZT utilizados no software não exatamente os mesmos utilizados do PZT utilizado na prática. Ressalta-se que este trabalho buscou aproximar ao máximo a situação numérica e a prática/real, entretanto, como os valores do transdutor utilizado experimentalmente não eram conhecidos devido à falta do datasheet do fabricante, foram utilizados os valores de Zaman (2021) nas simulações numéricas. O fato de eles não serem iguais justifica essa diferença.

A placa retificadora de colheita de energia limita a tensão de saída. O datasheet do fabricante da placa indica que a máxima tensão elétrica de saída no terminal VCC é limitado a 3,6 V. Isso de fato foi confirmado pelo gráfico do carregamento do capacitor, que estava conectado aos terminais VCC e GND (terra) da placa, o que limita bastante aplicações que requeiram maior tensão, como para iluminar locais do CEFET com lâmpadas, se considerarmos o uso de apenas uma placa. Apesar de ela ser de extrema importância na retificação da tensão oriunda do PZT, ela apresenta essa limitação caso se deseje ter aplicações com maiores exigências de tensão, e, conseqüentemente, de corrente e potência. Uma possível solução para esse problema seria a ligação em série de mais elementos piezoelétricos, cada um com sua placa retificadora, para aumentar a tensão gerada.

Além da placa, o capacitor utilizado armazena pouca carga. Isso é confirmado quando o circuito é fechado, de modo que o LED fica aceso por cerca de 3 segundos apenas. Logo, é possível concluir que o armazenamento também influencia muito na viabilidade do projeto. Idealmente, para que se tenha uma geração mais proveitosa, deve-se utilizar um banco de capacitores ou baterias para armazenar a energia gerada, de forma que, uma vez carregado, a liberação de energia seja lenta e o conjunto sendo constantemente carregado e descarregado.

Com base nos cálculos estimados no item 4.4, conclui-se que o projeto de piso piezoelétrico com 1 m² de área seria viável para aplicações de carregamento de alguns tipos de baterias, as quais poderiam, por exemplo, serem utilizadas em luminárias de emergência no campus Maracanã, do CEFET/RJ, que seriam bastante úteis em casos de queda de luz. Já para aplicações de maior escala, que exijam maiores potência e tensão elétricas, como iluminar por completo alguma sala, laboratório ou outro local instituição, como objetivado inicialmente, pode-se concluir que este projeto seria inviável. Entretanto, sua utilização como complemento energético para aplicações específicas dentro das dependências do CEFET/RJ deve ser considerada.

Deve-se ressaltar, contudo, que, este é um estudo em estágio bem inicial, considerando uma placa de piso de 1 m² apenas, na qual seriam acoplados 250 elementos piezoelétricos. Além disso, com a utilização de armazenamentos mais robustos, como um banco de capacitores ou de baterias, a possibilidade de utilização se expande, uma vez que os valores apresentados são para o carregamento completo inicial. Tendo em vista que, uma vez carregado por completo e como o sistema continuaria em funcionamento, os gastos seriam diminuídos ou até mesmo anulados, estendendo a duração das baterias.

Destaca-se também, que não se pode descartar outros projetos nesse sentido, uma vez que existem outros tipos de materiais piezoelétricos com melhores parâmetros, porém seus preços são muito maiores em comparação ao PZT-5A utilizado. Além disso, futuramente, novos materiais piezoelétricos podem ser sintetizados com melhores parâmetros eletromecânicos do que os hoje disponíveis no mercado, e devem ser estudados circuitos mais robustos de geração e armazenamento dessa energia. Deve-se levar em consideração também que a geração de energia através da piezeletricidade e a colheita de energia é relativamente recente e que vem sendo bastante estudada nos últimos anos, mas que ainda possui um grande espaço para avanço.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final do presente trabalho, foram identificadas algumas possibilidades de melhorias que poderiam ser implementadas em trabalhos futuros, como, por exemplo:

Realizar uma simulação numérica considerando a aplicação da força em uma área com formato próximo ao de um pé humano, como ilustrado na Figura 50.

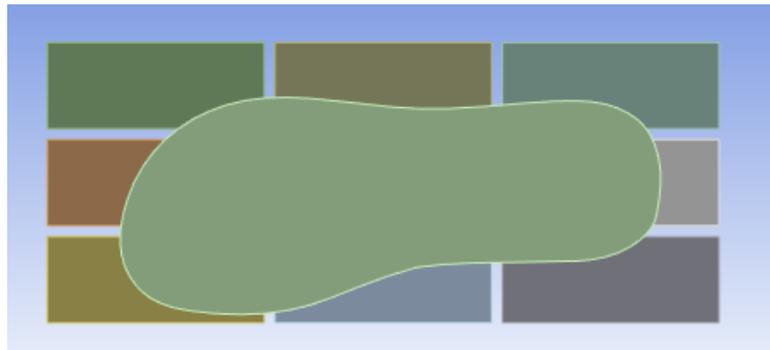


Figura 50 – Sugestão de simulação futura considerando o formato do pé humano.
Fonte: Orientador.

Realizar um estudo para verificar o melhor posicionamento das placas a fim de otimizar a geração de energia;

Projetar ou utilizar um dispositivo específico para aplicar a força sobre o piso piezoelétrico com maior controle e precisão;

Realizar o mesmo estudo prático para um filme de PVDF ou outros materiais piezoelétricos;

Realizar um estudo com mais placas transdutoras piezoelétricas em um piso de maior dimensão, como indicado na Figura 51;

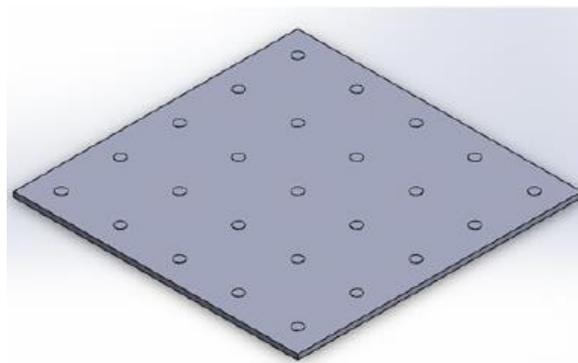


Figura 51 – Conceito de piso com 25 elementos piezoelétricos.
Fonte: Valente (2019).

Testar experimentalmente um piso piezoelétrico montado em locais de grande circulação, até mesmo no CEFET/RJ, para verificar o real potencial de geração;

Realizar um estudo com mais placas transdutoras piezoelétricas, verificando qual é o melhor esquema de ligação para gerar mais energia, se série ou paralelo;

Considerar uma geometria de piso que promova a concentração de tensão em regiões específicas do piso para aumentar a eficiência da colheita de energia;

Realizar um estudo utilizando outras formas de armazenamento de energia;

Realizar uma análise transiente no Ansys utilizando uma modelagem da pisada humana;

Analisar formas de se organizar os fios soldados ao transdutor piezoelétrico.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AI, Rodrigo de Almeida. **Análise numérico-experimental de um sistema não suave para geração de energia elétrica utilizando material piezoeletrico**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2018.
- ARMENDANI, Willian Alves *et al.* Conhecendo a Piezoeletricidade, uma nova forma de geração de energia elétrica. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 1. Vol. 9. pp 314-320., outubro / novembro de 2016. ISSN: 2448-0959
- BHATTACHARYA, Ayan et al. Piezoelectric Energy Harvesting In Automobile Wheels. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 5, n. 5, 2018.
- BRASIL. Senado Federal. **Projeto de Lei do Senado PLS 304/2017**. Altera o Código de Trânsito Brasileiro para proibir a comercialização e locomoção de automóveis movidos a combustíveis fósseis a partir dos termos que estabelece. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/130612>. Acesso em: 31 dez. 2022.
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- DUDHAT, Pratik; LI, Qing; REN, Sijin. ANSYS Simulation of Piezoelectric Patch for Energy Harvesting. In: **2019 ASEE Zone I Conference & Workshop**. 2019.
- EIRAS, J. A. **Materiais piezoeletricos**. São Paulo: AlphaMidia Assessoria Fonográfica, 2004. cap. 2, 34 p.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2022**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br>. Acesso em: 31 dez. 2022.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Matriz Energética e Elétrica**. 2022. Disponível em: [http:// https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica](http://https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica). Acesso em: 31 dez. 2022.
- ERTURK, Alper; INMAN, Daniel J. **Piezoelectric energy harvesting**. John Wiley & Sons, 2011. p. 1-18.
- FERREIRA, André Luiz Gomes. **Plataforma energética a partir de discos piezoeletricos**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia da Computação) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2015.

- FERREIRA, Luiz Fernando Suzarte Silva. **Sistema de geração de energia via sensores piezoelétricos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2017.
- FIELD, Emily *et al.* **PECS - Design of a Self-Sustaining , Affordable Energy Generating System for Airports**. 2015. Roger Williams University, Bristol, 2015.
- FREITAS, Ricardo Luiz Barros de. **Fabricação, caracterização e aplicações do compósito PZT/PVDF**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.
- GASPAROTTO, G. *et al.* Síntese e caracterização da cerâmica PZT dopada com íons bário. **Cerâmica**, v. 49, p. 110-115, 2003.
- GUSAROV, Boris. **PVDF piezoelectric polymers: characterization and application to thermal energy harvesting**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Université Grenoble Alpes, Grenoble, 2015.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2010
- LEO, Donald J. **Engineering analysis of smart material systems**. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2007.
- LI, Weijie *et al.* Finite-element analysis of an electromechanical impedance–based corrosion sensor with experimental verification. **Journal of Aerospace Engineering**, v. 32, n. 3, p. 04019012, 2019.
- LINEAR TECHNOLOGY. **LTC3588-1 datasheet**. 2010. Disponível em: www.linear.com/LTC3588-1. Acesso em: 18 mai. 2023.
- LUNA, TIAGO FERRARI *et al.* Barreiras para transição de carros elétricos: uma análise do cenário brasileiro. **XXI Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**. 2019. ISSN: 2359-1048
- MALVINO, Albert P.; BATES, David J. **Eletrônica-Vol. 2: 8ª Edição**. McGraw Hill Brasil, 2016.
- ODEGARD, Gregory M. Constitutive modeling of piezoelectric polymer composites. **Acta materialia**, v. 52, n. 18, p. 5315-5330, 2004.
- PALHA, Carlos Alberto Oliveira Fernandes. **Desempenho de materiais piezoelétricos para aplicações rodoviárias**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Braga, 2012.

PEREIRA, Antônio Henrique Alves. Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades. **ATCP Engenharia Física**, São Carlos, 2010.

PRECISION ACOUSTICS. **PVdF**. Disponível em:

<https://www.acoustics.co.uk/product/PVDF/#:~:text=Piezo%2DElectric%20PVDF-,PVDF%20is%20one%20of%20the%20most%20widely%20known%20piezo%2Dpolymers,the%20production%20of%20ultrasonic%20sensors>. Acesso em: 12 dez. 2022.

RAMADAN, Khaled S.; SAMEOTO, Dan; EVOY, Sthephane. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers. **Smart Materials and Structures**, v. 23, n. 3, p. 033001, 2014.

REZENDE, Ludmila Mecias de. **Geração de energia através da piezoeletricidade**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2020.

SILVA, Larissa Pereira da. **Estimativa de geração de energia por tapete piezoeletrico em múltiplas camadas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Faculdades Doctum de Caratinga, Caratinga, 2019.

SILVA, Patrick Kazmierczak da. **Geração de energia através do efeito piezoeletrico inserido no concreto translúcido aplicado em faixas de segurança**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2018.

SOUSA, Leandro Moreira de; CLEMENTE, Raphael de Souza; MELLO, Samuel Ferreira. Geração de energia através da piezoeletricidade. **3º Congresso Internacional de Pesquisa, Ensino e Extensão**. 2018.

VALENTE, Mike Pessanha. **Projeto de dispositivo piezoeletrico para geração de energia**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

VIVES, Antonio Arnau. **Piezoelectric Transducers and Applications**. 2. ed. Valencia: Springer, 2008.

WAQAR, Sania; WANG, Lijing; JOHN, Sabu. Piezoelectric energy harvesting from intelligent textiles. In: **Electronic textiles**. Woodhead Publishing, 2015. p. 173-197.

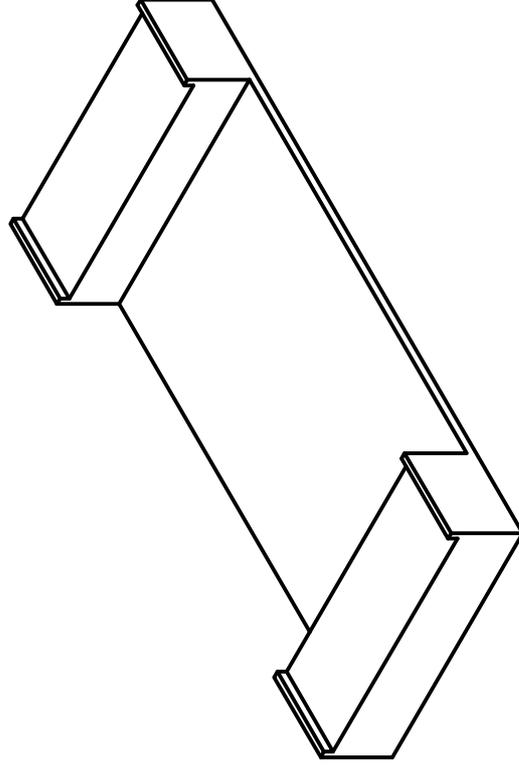
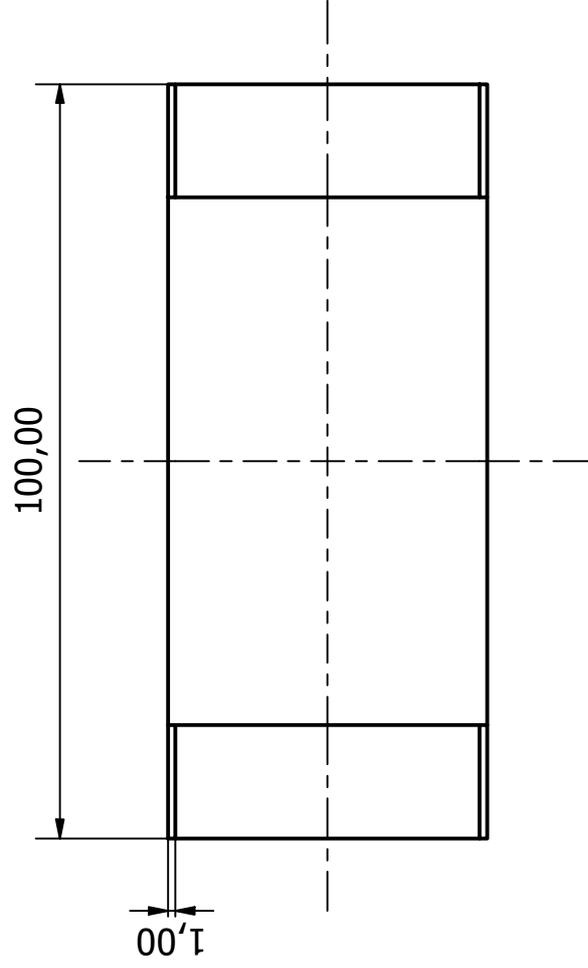
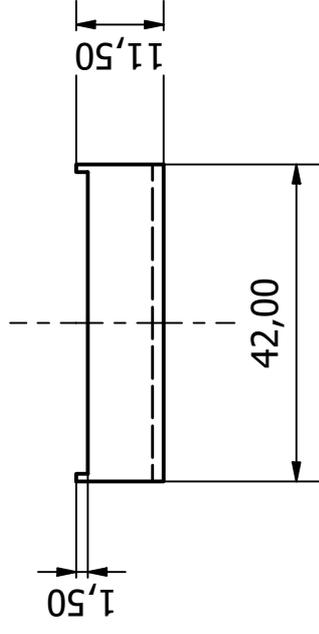
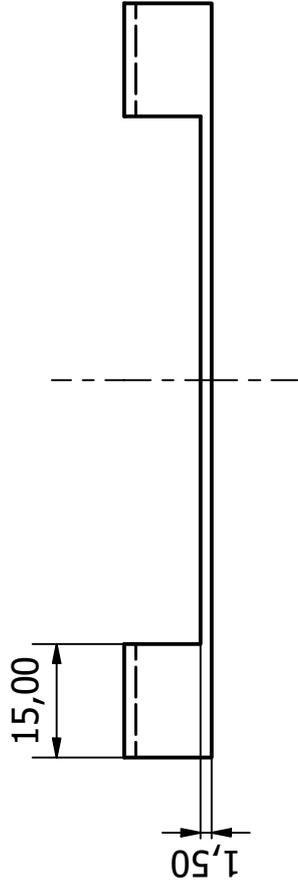
XIE, Linfang *et al.* Properties and applications of flexible poly (vinylidene fluoride)-based piezoelectric materials. **Crystals**, v. 11, n. 6, p. 644, 2021.

ZAMAN, Izzuddin. **Harmonic Analysis and Voltage Response of Piezoelectric Energy Harvester using Ansys Workbench**. 2021. Disponível em:

https://www.youtube.com/watch?v=S_5QaQURR98&t=263s. Acesso em: 15 set. 2022.

ZHAO, Jingjing; YOU, Zheng. A shoe-embedded piezoelectric energy harvester for wearable sensors. **Sensors**, v. 14, n. 7, p. 12497-12510, 2014.

ANEXO A - Desenho técnico do suporte projetado



Aluno Daniel Utsch, Fabio Ramos e Lucas Carramona

Prof Paulo Câmara

Data 13/05/2023

Esc. 1 : 1

Título
Suporte

Unidade mm

Número

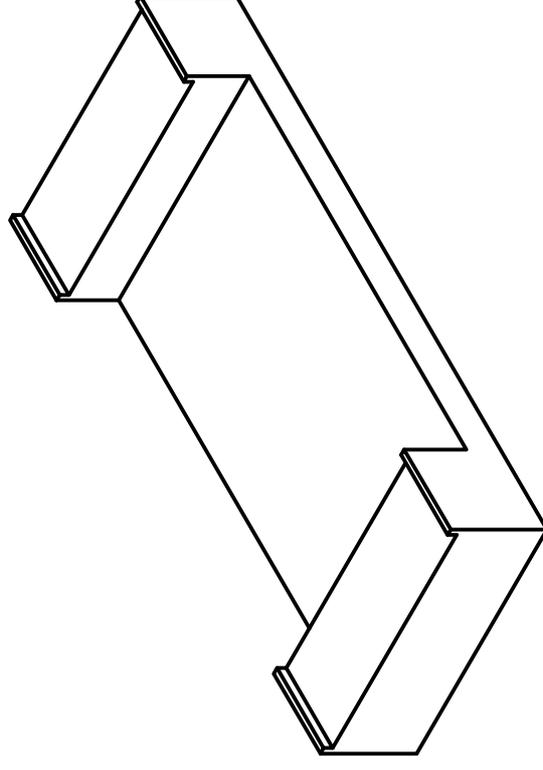
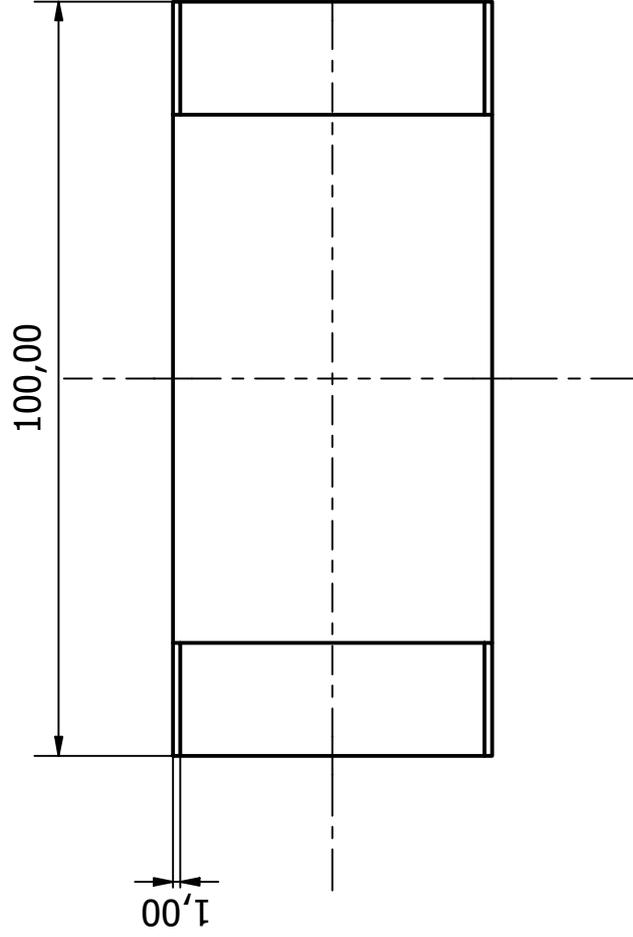
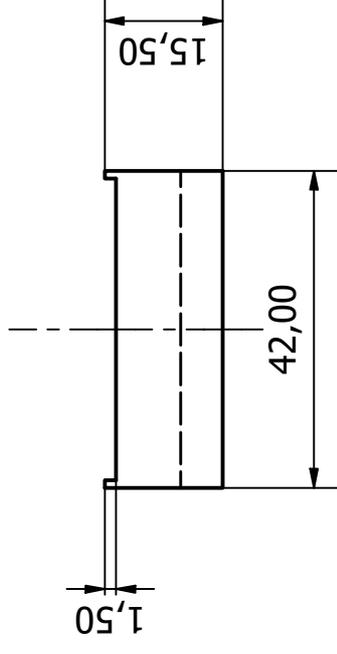
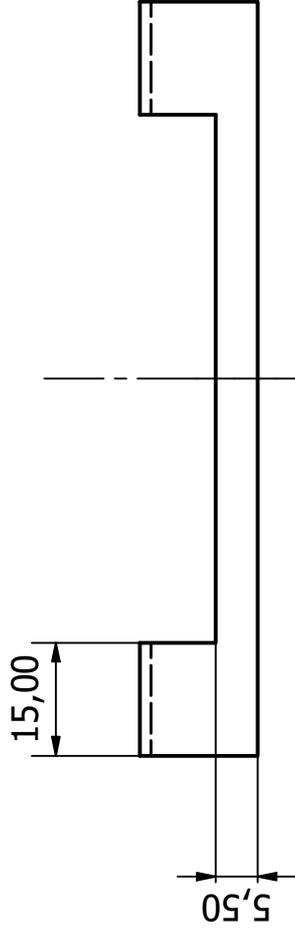
1

Número do desenho

CEFET/RJ

Folha nº
1

ANEXO B - Desenho técnico do suporte usinado



Aluno	Daniel Utsch, Fabio Ramos e Lucas Carramona		
Prof	Paulo Câmara		
Data	17/06/2023		
Esc. 1 : 1	Título	Suporte usinado	

 CEFET/RJ		Unidade	Número	Folha nº
		mm		1
		Número do desenho		