



**UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DO  
MARANHÃO**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**EMILY MARIA MONTE PEREIRA**

**INVESTIGAÇÃO E APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA NA  
MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EM VIBRATIONAL ENERGY HARVESTERS**

**SÃO LUÍS - MA**

**2021**

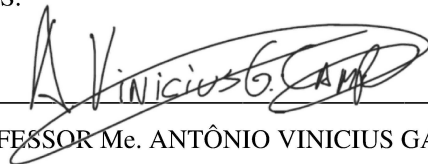
**EMILY MARIA MONTE PEREIRA**

**INVESTIGAÇÃO E APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA NA  
MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EM VIBRATIONAL ENERGY HARVESTERS**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Me. Antônio Vinicius Garcia Campos

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELA ALUNA EMILY MARIA MONTE PEREIRA, E ORIENTADA PELO PROFESSOR Me. ANTÔNIO VINICIUS GARCIA CAMPOS.



A handwritten signature in black ink, reading "Antônio Vinicius Garcia Campos", is written over a horizontal line. The signature is stylized and includes a large flourish at the end.

PROFESSOR Me. ANTÔNIO VINICIUS GARCIA  
CAMPOS

**SÃO LUÍS - MA**

**2021**

Pereira, Emily Maria Monte.

Investigação e aplicação da otimização topológica na microgeração de energia em vibrational energy harvesters / Emily Maria Monte Pereira. – São Luís, 2021.

66 f

TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2021.

Orientadora: Prof. Me. Antônio Vinicius Garcia Campos.

1.Microsistemas eletromecânicos. 2.Otimização Topológica. 3.Energy harvesters. I.Título.

CDU: 621.31

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO

**INVESTIGAÇÃO E APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA NA  
MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EM VIBRATIONAL ENERGY  
HARVESTERS**

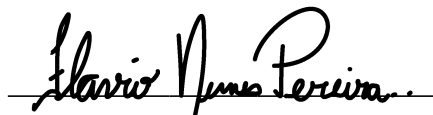
Autor: Emily Maria Monte Pereira

Orientador: Prof. Me. Antônio Vinicius Garcia Campos

A Banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:



Prof. Me. Antônio Vinicius Garcia Campos.



Prof. Dr. Flávio Nunes Pereira



Prof. Me. Denner Robert Rodrigues Guilhon

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís, 07 de dezembro de 2021

## DEDICATÓRIA

---

*A meu bom Deus, que nunca desistiu de mim e escutou a cada oração silenciosa do meu coração.  
A meus pais, cuja proteção nunca cessa e cujos ensinamentos mais que em palavras, pude ver de atos e exemplos. E a meus irmãos, a quem tenho seus conselhos como preciosidades que devem ser guardadas e as quais estimo com profunda gratidão. A todos vocês por terem me moldado e encaminhado até esse momento.*

## AGRADECIMENTOS

---

Antes que qualquer um ou qualquer coisa, Àquele que tudo dá sem nada pedir em troca. Gostaria de agradecer a Deus, Nosso Senhor, pela dádiva da vida. E nessa vida, poder ser agraciada pelo amor e alegria das pessoas que Ele me presenteou. Pelo amor de Sua Mãe, Nossa Senhora, que sei que zela e cuida de mim constantemente e cuja proteção nunca falhou. Por nunca me deixar desistir e me sustentar a cada degrau dessa trajetória.

À minha família. À minha mãe, Eudênia Monte, a quem devo gratidão eterna pelo zelo e proteção que somente uma mãe é capaz de dar. Sinto seu calor em cada preparo de alimento, cada abraço, cada conversa, sempre com a certeza de que nunca deixaria nada faltar a cada um de seus filhos, mesmo que significasse tirar de si mesma para nos dar. Certamente, não a mereço. A meu pai, Everaldo Pereira, que proveu por nossa família e nos protegeu em seus braços, cujo esforço hoje compreendo melhor ao trabalhar graças às oportunidades deixadas pelo seu suor. A meus irmãos, Eudeanny e Elvys. Agradeço por serem figuras que representem amizade e proteção ao mesmo tempo. Com vocês posso sorrir e buscar por conselhos que não buscaria de mais ninguém. Vocês foram e continuam sendo extremamente importantes na formação da pessoa que sou hoje. Hoje vejo que nada sou, além de pedaços de vocês quatro. Os amo profundamente e serei eternamente grata por tantas vezes que renunciaram algo para si em função da proteção e amor que me guardaram por toda a vida.

A minha grande família, tios e primos. Por desde muito cedo, vibrarem por minhas vitórias e por mesmo de longe se fazerem presente. Foram e sempre serão meus primeiros amigos, com quem sei que posso contar. A meus avós, *Paizinho, Mãezinha, Vô Nilo e Vô Alta*, por ensinarem a meus pais e serem patriarcas e matriarcas de nossas famílias. Os valores que carrego no peito são graças a vocês. Aos mais novos integrantes, Noah e Líria, sinto um amor imensurável por vocês. Gratidão por me ensinarem que a vida deve ser vivida com sorrisos e abraços “de quebrar a costela”, que devemos aproveitar a companhia um do outro para gargalhar das pequenas coisas e nunca deixarmos de ter um coração de criança.

A minhas primas. Anairda, minha primeira e melhor amiga. Cuja amizade e esperteza me impulsionaram mesmo em tão tenra idade. Hoje, ainda que maduras pelo tempo e experiência, ainda posso lembrar das brincadeiras em tardes quentes, das aulas – mesmo que por pouco tempo – que dividimos e das histórias que escrevemos e compartilharemos para sempre. A Kellyane, cuja amizade sinto ser fortalecida a cada nova experiência compartilhada, cada desafio que enfrentamos podemos sentir a torcida uma e da outra e a alegria de cada vitória. A Myrlla e Mírian, gratidão pela

conexão que dividimos, por aos 22 anos poder me fazerem sentir como 14. Mesmo de longe sinto nossa amizade e quando nos encontramos é como se nunca tivesse havido distância em primeiro lugar. A todas vocês, minha gratidão por se manterem ao meu lado e tomarem meu partido em qualquer circunstância, por serem uma conexão de linha indireta com Deus e imagem de Nossa Senhora na minha vida.

A meus amigos da juventude que levarei para a vida toda, Adara, Aécio, Sabrina, Eduardo, Sarah, João Guilherme e Igor. Minha companhia diária durante anos, com que partilhei anos de estudo envoltos de sorrisos, brincadeiras, implicâncias e aprendizagem. Hoje me inspiro em ver a vitória de cada um, com orgulho e carinho ao perceber como a vida adulta cai bem nos ombros das crianças que todos nós fomos. Gratidão pela amizade e irmandade.

Aos amigos que pude cativar na faculdade. A Hemelly, Laís, Adriana, Gustavo e Diolly, por serem companhias leves e ajudarem a diminuir a carga da graduação. Grata pelo companheirismo nesses 5 anos e por estenderem a mão quando precisei. A veterana Vivian Gabrielle, pelos conselhos e camaradagem. Você é inspiração e modelo de engenheira que quero seguir. A Lucas e Levi, cuja amizade atravessa os muros da faculdade, com quem posso dividir momentos de descontração e fraternidade.

Em especial, a dois grandes amigos, que tornaram essa jornada tão prazerosa de caminhar ao lado. Gratidão a Rodrigo Costa, que desde o dia 1 pude sentir a presença de Jesus Cristo, cuja amizade estimo grandemente, e quem vejo como exemplo de maturidade e perseverança. Obrigada pela amizade e companheirismo. Gratidão a Alexandre Serpa, cujo carinho e admiração crescem a cada dia. Seu amadurecimento e senso de responsabilidade me enchem de orgulho e seu lado brincalhão e inocente me cobrem de ternura. Sinto como é singular nossa amizade e sincero nosso companheirismo. Obrigada pela linda amizade que cultivamos.

Gratidão a todos os professores que tornaram esse momento singular uma realidade. Desde àqueles presentes na minha educação básica, no Lar da Providência, passando pelos grandes nomes do Colégio Marista até os mestres da Universidade Estadual do Maranhão. A Socorrinha, Aparecida, Jeane, João Fonseca, Aninger, Ir. Alexandre, Pedro Neto, Valdemar, Denner, Flávio Nunes e tantos outros que fizeram parte da minha formação e do meu crescimento. Se hoje posso escolher que caminho tomar foi graças a vocês.

Gratidão especial ao meu orientador Prof. Me. Antônio Vinicius Garcia. Pela paciência e dedicação ao longo de um ano de Iniciação Científica, e mesmo antes disso pelos ensinamentos e constante busca de aperfeiçoamento e zelo singular pelos seus alunos. Você é exemplo de Mestre e professor, sua dedicação é incomparável e sua paciência e persistência é digna de louvor. Obrigada por não desistir de sua aluna e me guiar durante esse caminho, não estaria onde estou sem sua

liderança.

Obrigada ao projeto especial Carcará Rocket Design, Nathalia Vidal e tantos membros que seguem o legado, por primeiro me ensinarem sobre trabalho em equipe, liderança, aerodesign e tantos conceitos concretos ou não que carrego comigo na minha formação profissional.

Ao curso de Engenharia Mecânica e sua coordenação, por zelarem por seus alunos e os liderarem para alçarem grandes voos, formando profissionais de caráter e engenheiros de valor.

Ao PIBIC e PIBIT, por me permitirem cavar mais fundo no domínio científico. Seu incentivo e valorização do conhecimento tornam reais sonhos que antes podiam somente ser idealizados. E novamente, ao professor Flávio Nunes, por ter acreditado nessa oportunidade e ter me acolhido como sua bolsista.

A Universidade Estadual do Maranhão, por proporcionar os meios e ferramentas que formam os profissionais que compõem a nossa sociedade. Fundamental e imensurável é o impacto de tamanha instituição na qualidade e vida das pessoas que por aí passam.

Finalmente, ao mais recente e impactante degrau da minha jornada rumo à formação profissional. A Montisol Manutenção e Fabricação e todo seu corpo profissional, Felipe Fiche, Athos Zammataru, Tereza e Ribamar Farias, e em especial a Veneza Viegas. Grata pelas lições diárias, ensinamentos profissionais e tantos mais. Carrego comigo aprendizagens e experiência que adquiro a cada novo dia trabalhado. Obrigada pela confiança e apoio, e por acreditar no meu potencial.



*“Busquem, portanto, em primeiro lugar o Reino de Deus e a sua justiça, e todas essas coisas serão acrescentadas. Por isso, não se preocupem com o amanhã, pois o amanhã trará as suas próprias preocupações. Para cada dia bastam as suas dificuldades”.*

*Mateus 6.33-34*

## RESUMO

Esse projeto visa trazer explorações e análises a cerca de um microdispositivo do tipo MEMS (microsistemas eletromecânicos acoplados a dispositivos dinâmicos – para o inglês “*Microelectromechanical Systems*”) acoplado a materiais piezoelétricos, com o objetivo de desenvolvimento do mesmo para a geração de energia por meio de excitações vibro-mecânicas utilizando otimização topológica. Essa pesquisa se faz necessária diante da busca por novas alternativas de geração de energia elétrica focada em novas soluções mais eficientes e inovadoras, principalmente no que tange a geração de energia de baixa potência, suficiente para suprir a demanda de alguns sistemas eletrônicos. Sistemas como comunicação remota ou sensores sem fio que tem baixo consumo de potência pode ser beneficiados. Esse projeto tem como objetivo principal a pesquisa e o desenvolvimento de uma estrutura de microgeração eletromecânica com materiais piezoelétricos, para a conversão da energia vibracional em energia elétrica (energy harvesters), utilizando da otimização topológica uma ferramenta que auxilie na otimização da deformação a fim de que a vibração gerada possa transformar quantidades de energia satisfatórias. O trabalho será dividido em pesquisas numéricas para a determinação de uma geometria ótima para o dispositivo, e acompanhará testes e experimentos em bancadas, para a determinação de geração de energia do dispositivo.

**Palavras-chaves:** *Microsistemas eletromecânicos; otimização topológica; energy harvesters.*

## ABSTRACT

This project aims to bring explorations and analyzes about a microdevice designated MEMS – “Microelectromechanical Systems, coupled to piezoelectric materials, with the purpose of developing it for the generation of energy through vibro-mechanical excitations. This research is necessary in front of the search for new alternatives for electric power generation focused on new, more efficient and innovative solutions, especially with regard to the generation of low-power energy, sufficient to meet the demand of some electronic systems. Systems like remote communication or wireless sensors that have low power consumption can be benefited. This project has as its main objective the research and development of an structure of electromechanical microgeneration with piezoelectric materials for the conversion of vibrational energy into electrical energy (energy harvesters), using topological optimization as a tool that helps in the optimization of the deformation so that the generated vibration can transform satisfactory amounts of energy. The work will be divided into numerical research to determine an optimal geometry for the device, and will follow tests and experiments on benches, to determine the device's energy generation.

**Key-words:** *Electromechanical microsystems, topological optimization, energy harvesters.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 Fator de ampliação de um sistema não amortecido .....   | 22 |
| Figura 2.2 Esquema de dispositivo MEMS para geração de energia por meio do vibrational energy harvesters.....  | 24 |
| Figura 2.3 Tipos de geradores piezoelétricos, unimorfo (acima) e bimorfo (abaixo).....   | 25 |
| Figura 2.4 Estrutura de mola cônica em um sistema de nó.....   | 27 |
| Figura 2.5 Definição dos domínios sólidos ( $\Omega_{s1}$ ) para o material 1 e ( $\Omega_{s1}$ ) para o material 2, e o domínio vazio ( $\Omega_{s1}$ ), aplicado em uma estrutura deformável na otimização topológica..... | 29 |
| Figura 2.6 Resultado obtido de otimização topológica em chapa.....   | 29 |
| Figura 3.1 Suporte e força inicial .....   | 34 |
| Figura 3.2 Metodologia da análise .....  | 35 |
| Figura 3.3 Esquemático conceitual do dispositivo MEMS proposto, sem escala.....  | 36 |
| Figura 3.4 Esquemático conceitual do experimento proposto, sem escala .....  | 37 |
| Figura 3.5 Experimento proposto .....  | 38 |
| Figura 3.6 Diagrama com ponte retificadora de diodos .....   | 38 |
| Figura 3.7 Esquema de ligação ponte retificadora composta de quatro diodos.....  | 38 |
| Figura 3.8 Protoboard experimental .....   | 40 |
| Figura 3.9 Geometria 1D, barra 920 mm, sem escala .....  | 40 |
| Figura 3.10 Perfil da viga, sem escala .....   | 41 |
| Figura 4.1 Resultado análise modal da viga experimental .....  | 42 |
| Figura 4.2 Frequências encontradas para a viga experimental.....   | 42 |
| Figura 4.3 Frequência de excitação, modelo experimental .....  | 43 |
| Figura 4.4 Dados colhidos pelo experimento.....  | 44 |
| Figura 4.5 Dados colhidos pelo experimento .....   | 45 |
| Figura 4.6 Dimensões da geometria inicial.....   | 45 |
| Figura 4.7 Condições de contorno da análise modal inicial .....  | 46 |
| Figura 4.8 Frequências naturais do objeto inicial .....  | 46 |
| Figura 4.9 Primeiro modo de vibração.....  | 47 |
| Figura 4.10 Critérios da otimização topológica modal .....   | 47 |
| Figura 4.11 Topologia otimizada para maximizar primeira frequência.....  | 48 |
| Figura 4.12 Condições de restrição para análise modal .....  | 48 |
| Figura 4.13 Novas frequências naturais .....   | 49 |
| Figura 4.14 Primeiro modo de vibração da topologia ótima .....   | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.15 Condições de restrição para análise estática inicial .....          | 50 |
| Figura 4.16 Deslocamento máximo da topologia inicial.....                       | 50 |
| Figura 4.17 Tensão de Von-Mises da topologia inicial .....                      | 50 |
| Figura 4.18 Condições de restrição para otimização topológica.....              | 51 |
| Figura 4.19 Geometria ótima para minimização da flexibilidade.....              | 51 |
| Figura 4.20 Deslocamento máximo da topologia ótima .....                        | 52 |
| Figura 4.21 Tensão máxima (Von-Mises).....                                      | 52 |
| Figura 4.22 Condições de restrição para análise estática .....                  | 53 |
| Figura 4.23 Deslocamento máximo da topologia ótima .....                        | 53 |
| Figura 4.24 Tensão máxima da topologia ótima .....                              | 54 |
| Figura 4.25 Dimensões da geometria inicial .....                                | 54 |
| Figura 4.26 Áreas de exclusão .....   | 55 |
| Figura 4.27 Deformação da análise modal na geometria inicial .....              | 55 |
| Figura 4.28 Frequências naturais do modelo de viga inicial.....                 | 56 |
| Figura 4.29 Geometria ótima .....   | 56 |
| Figura 4.30 Resultado da análise modal para geometria ótima .....               | 57 |
| Figura 4.31 Frequências naturais dos modos de vibração do modelo otimizado..... | 57 |
| Figura 4.32 Resultados da análise estática na geometria inicial .....           | 58 |
| Figura 4.33 Geometria ótima do modelo estático .....                            | 58 |
| Figura 4.34 Resultados da análise estática na geometria otimizada .....         | 59 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 4.1 Resultados das análises computacionais .....          | 59 |
| Tabela 4.2 Resultados das análises estáticas .....               | 60 |
| Tabela 4.3 Resultados computacionais para o modelo de viga ..... | 61 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUMO.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                     | <b>17</b> |
| 1.1. Motivação.....  | 17        |
| 1.2. Objetivos.....  | 18        |
| 1.2.1. Geral.....  | 18        |
| 1.2.2. Específicos.....                                      | 19        |
| <b>2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....</b>                      | <b>20</b> |
| 2.1. Vibração.....   | 20        |
| 2.2. Vibrational energy harvesters.....                      | 23        |
| 2.2.1. Materiais piezoelétricos.....                         | 25        |
| 2.2.2. Aplicação de materiais piezoelétricos.....            | 26        |
| 2.3. Otimização topológica.....                              | 28        |
| 2.3.1. Manufatura aditiva.....                               | 31        |
| <b>3 METODOLOGIA.....</b>                                    | <b>32</b> |
| 3.1. Análise da otimização topológica.....                   | 32        |
| 3.1.1. Construção do modelo.....                             | 32        |
| 3.1.2. Realização da análise modal e estática.....           | 34        |
| 3.2. Bancada experimental.....                               | 35        |
| 3.2.1. Validação do modelo experimental.....                 | 36        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                        | <b>42</b> |
| 4.1. Validação do modelo experimental.....                   | 42        |
| 4.1.1. Coleta de dados.....                                  | 43        |
| 4.2. Análises da placa fina.....                             | 45        |
| 4.2.1. Construção do modelo.....                             | 45        |
| 4.2.2. Análise modal inicial.....                            | 46        |
| 4.2.3. Otimização topológica modal.....                      | 47        |
| 4.2.4. Análise modal da topologia otimizada.....             | 48        |
| 4.2.5. Análise estática inicial.....                         | 49        |
| 4.2.6. Otimização topológica estática.....                   | 51        |
| 4.2.7. Análise estática da topologia de estrutura ótima..... | 52        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.2.8.   | Análise estática de topologia otimizada modal..... | 52        |
| 4.3.     | Análises da viga sólida.....                       | 54        |
| 4.3.1.   | Construção do modelo.....                          | 54        |
| 4.3.2.   | Análise modal inicial.....                         | 55        |
| 4.3.3.   | Otimização topológica modal.....                   | 56        |
| 4.3.4.   | Análise modal da topologia otimizada.....          | 57        |
| 4.3.5.   | Análise estática inicial.....                      | 57        |
| 4.3.6.   | Otimização topológica estática.....                | 58        |
| 4.3.7.   | Análise estática de topologia otimizada modal..... | 58        |
| 4.4.     | Discussões.....                                    | 59        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                              | <b>62</b> |
| 5.1.     | Projetos futuros.....                              | 62        |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                            | <b>64</b> |



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação

A dependência mundial da humanidade relacionadas à exploração e utilização de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis e o crescente consumo energético mundial, leva a população científica a severas preocupações pertinentes a sua escassez e aos malefícios que seus usos duradouros trazem ao ecossistema. O que leva ao entendimento de que é necessário acelerar os esforços do coletivo em buscar uma diversificação da matriz energética, passando a produzir energia a partir de diferentes fontes alternativas e renováveis (RANGEL, 2014).

Dessa forma, nos últimos anos, muitas pesquisas e inovações têm avançado no que tange a área de energias renováveis e limpas, que consistem em captar a energia disponível no ambiente. Pode-se citar a energia de fontes como solar e eólica, que vem crescendo a cada ano.

A geração de energia de fontes renováveis tem sido um grande desafio para a sociedade, pois em muitos casos é dependente de alta tecnologia e alto investimento financeiro de governos e de capital privado. Há um grande desafio sobre a produção de energia renovável, sobre sua utilização eficiente e sobre as tecnologias de armazenamento seguro, sem que haja danos ambientais, (CHUNG et al., 2011). Mas, um ramo da inovação sobre produção de energia que também vem sendo alvo de inúmeras pesquisas e patentes é a geração de eletricidade por microssistemas eletromecânicos acoplados a dispositivos dinâmicos, os chamados MEMS, acrônimo do termo em inglês para *Microelectromechanical Systems*.

O avanço em fontes renováveis, está interligado a pesquisas em diferentes formas de sua obtenção, desde a produção em grande quantidade, até em pequenos dispositivos autônomos. O grande ganho por trás dos investimentos em fontes de energia renovável é maior do que os benefícios econômicos, está também em ganhos sociais (HEINICKE, 2015).

As fontes minerais de combustíveis, maior fonte de geração de energia no mundo, de onde são extraídos o petróleo e o carvão mineral, estão em declínio e, isso tem se materializado em uma

sociedade de baixo uso de carbono (TSUCHIYA et al., 2012). Dessa forma, nos últimos anos, houve uma crescente curva em pesquisas para o desenvolvimento de novas fontes de origem não minerais, como é o caso da energia solar, eólica e biomassa. Mas, uma outra fonte que também tem sido alvo de inúmeros trabalhos é na área da energia a base da vibração mecânica, que por meio da conversão de dispositivos a base de materiais piezoelétricos, que é uma propriedade de certas cerâmicas produzirem energia ao sofrer deformação volumétrica.

As propriedades especiais destes tipos de materiais têm chamado a atenção de pesquisadores na área de fontes alternativas de geração de energia, (TSUCHIYA; MORIYAMA; IWAMORI, 2016). São eles, sistemas autoalimentados, que se caracterizam por disporem de fontes de alimentação sem fio, o que lhes dão vantagens semelhantes aos das comunicações sem fio no que tange a portabilidade, além de reduzirem a instalação ao eliminar a fiação (MITCHESON apud RANGEL, 2014).

Segundo Rangel, 2014, essa nova tendência de miniaturização, mobilidade e baixo consumo de energia resultou em um aumento nas pesquisas e investimentos relacionados ao conceito de *Energy Harvesting* (“coleta de energia”) viabilizando a evolução de sistemas de captação de energia num âmbito de microescala, em outras palavras, mecanismos capazes de transformar alguma energia disponível no ambiente em uma quantidade de energia elétrica utilizável, que tem potencial para ser armazenada ou ser diretamente consumida por uma determinada carga.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Geral**

O objetivo principal desta proposta é a pesquisa e o desenvolvimento de um protótipo de microgeração eletromecânica com materiais piezoelétricos, para a conversão da energia vibracional em energia elétrica utilizando otimização topológica. A estrutura do desenvolvimento desde trabalho de pesquisa possui as etapas de levantamento bibliográfico, desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliem no projeto e a consolidação por meio de testes com o objetivo de detecção da potencialização da vibração por meio da otimização topológica para a conversão da energia elétrica por meio da vibração mecânica.

### 1.2.2. Específicos

- Verificar a bibliografia, visando maior conhecimento sobre o fenômeno de microgeração elétrica e sobre *vibrational energy harvesters*;
- Levantar acervos técnicos e bibliográficos sobre materiais piezoelétricos;
- Desenvolver ferramenta computacional baseado em otimização topológica para o desenvolvimento do dispositivo MEMS;
- Realizar testes e ensaios em bancadas apropriadas para a verificação da conversão da energia vibracional mecânica em energia elétrica;

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

### 2.1.Vibração

Muitas atividades humanas envolvem problemas dinâmicos, ou seja, problemas que são transitórios ou dependente do tempo. Um dos problemas mais complexos na engenharia envolve movimentos cíclicos, que se repetem em um certo período, este fenômeno é chamado de vibração mecânica. Pode-se encontrar a vibração pelo simples escutar, onde o escutar não é nada mais que a vibração dos tímpanos humanos, no andar (movimento oscilatório de pernas e mãos) e no falar (movimento oscilatório da laringe), por exemplo. A importância do seu estudo se torna cada vez mais evidente no nosso cotidiano (RAO, 2008).

Estruturas ou componentes de máquinas sujeitas à vibração podem falhar devido à fadiga do material resultante das variações cíclicas da tensão induzida. Além disso, sempre que a frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincidir com a frequência de vibração da excitação externa, ocorre um fenômeno conhecido com ressonância que resulta em deflexões excessivas e, possivelmente, falha (RAO, 2008).

Todavia, apesar de seus efeitos destrutivos, a vibração pode ser utilizada a favor da humanidade em diversas aplicações industriais ou de consumo. A vibração é usada em larga escala na indústria atualmente, como em esteiras transportadoras, processos de usinagem e simulações de terremotos, por exemplo (RAO, 2008). Todavia, uma fonte de energia que tem recebido uma grande atenção nos últimos anos é a energia cinética, na forma de vibração mecânica, que pode ser encontrada em sistemas biológicos assim como em máquinas e bens domésticos, estruturas em movimento (veículos), além de estar presente em prédios, pontes e pisos (KHALIGH apud RANGEL, 2014), ou seja, estruturas sujeitas a tensões e/ou deformações mecânicas. Diversos mecanismos eletromagnéticos, eletrostáticos e piezoelétricos estão sendo investigados para a produção de alguns miliwatts a partir da vibração (RANGEL, 2014).

A vibração é dissipada ao ambiente por meio de energia mecânica de movimento, como no fenômeno do movimento de um pêndulo ao ar livre, que em um certo espaço de tempo, seu movimento é cessado. Dessa forma, como é uma energia mecânica transmitida ao ambiente, pode-se capturar a vibração e transformá-la em energia elétrica, por meio dos dispositivos MEMS (microssistemas eletromecânicos acoplados a dispositivos dinâmicos – para o inglês

“*Microelectromechanical Systems*”) (TANAKA et al., 2017).

A equação que representa a vibração livre de um sistema, segundo RAO, 2008, pode ser vista como a equação homogênea a seguir:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.1)$$

Onde tem-se a massa ( $m$ ), aceleração ( $\ddot{x}$ ), coeficiente de amortecimento viscoso ( $c$ ), velocidade ( $\dot{x}$ ), coeficiente de rigidez ( $k$ ) e deslocamento ( $x$ ).

Já, se uma força  $F(t)$  agir sobre um sistema viscosamente amortecido (Vibração excitada harmonicamente), a equação de movimento obtida pela segunda lei de Newton pode ser vista da seguinte forma (RAO, 2008):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.2)$$

Neste trabalho aplica-se o conceito de vibração harmônica, ou seja, um movimento cíclico que se repete em um certo período.

Dessa maneira, considera-se um sistema não amortecido sujeito a uma força harmônica. Assim, se uma força  $F(t) = F_0 \cos \omega t$  agir sobre a massa  $m$  de um sistema não amortecido, a solução homogênea para a equação de movimento, Equação (2.2), reduzida pode ser dada por (RAO, 2008):

$$x_{ht} = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t \quad (2.3)$$

Onde a frequência natural do sistema é (RAO, 2008):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.4)$$

Considerando que  $X$  é uma constante que denota a amplitude máxima de  $x_p(t)$ , onde  $\delta_{st} = \frac{F_0}{k}$  denota a deflexão da massa sob uma força  $F_0$ , e usando as condições iniciais  $x(t=0)=x_0$  e  $\dot{x}(t=0) = \dot{x}_0$ , a máxima amplitude  $X$  pode ser expressa como:

$$\frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.5)$$

Sendo  $\delta_{st}$  definido como a deflexão estática.

A razão das frequências  $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)$ , conhecida como  $r$ , é mostrada na Figura 2.1. Com essa figura pode-se constatar três tipos de resposta do sistema.

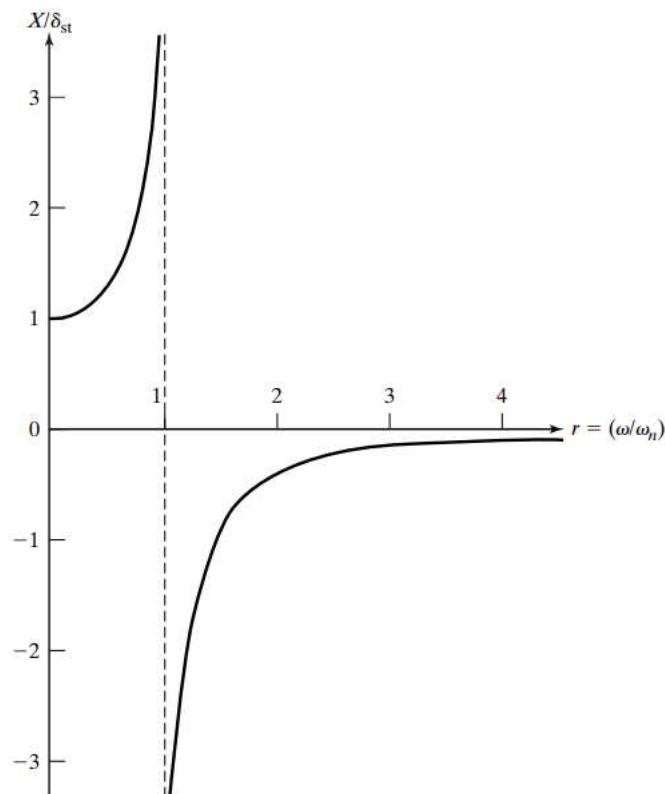


Figura 2.1 Fator de ampliação de um sistema não amortecido (RAO, 2008)

São elas: Quando  $0 < r < 1$  (diz-se que a resposta harmônica do sistema está em fase com a força externa); quando  $r > 1$  (onde a resposta do sistema a uma força harmônica de frequência muito alta é próxima de zero), e quando  $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) = 1$ , a amplitude  $X$  dada pela Equação 2.5 torna-se infinita. Essa condição para qual a frequência forçante  $\omega$  é igual à frequência natural do sistema  $\omega_n$ , é denominada *ressonância*. Para determinar a resposta para essa condição é determinada a seguinte equação (RAO, 2008):

$$x(t) = x_0 \cos \omega_n t + \frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \sin \omega_n t + \delta_{St} \left[ \frac{\cos \omega t - \cos \omega_n t}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right] \quad (2.6)$$

Assim, conclui-se que sob uma excitação harmônica, a resposta do sistema também será harmônica. Se a frequência de excitação coincidir com a frequência natural do sistema, a resposta do sistema será muito grande. Essa condição – *ressonância* – normalmente, deve ser evitada, para evitar falha do sistema (RAO, 2008).

## 2.2. *Vibrational Energy Harvesters*

A robótica tem ganhado espaço em pesquisas e inovações e é cada vez mais comum o surgimento de uma nova aplicação para um sistema autônomo, destacando-se aplicações na área da medicina, nuclear, segurança e monitoramento, entre outros. Estes dispositivos são capacitados de sistemas integrados e sensores, todos controlados por um sistema *onboard*, e para seu funcionamento é necessária uma quantidade certa de energia (TODARO et al., 2017). Uma alternativa para a geração de energia para estes dispositivos é o uso a geração de energia por meio do chamado *vibrational energy harvesters* (captação de energia vibracional), que nada mais é do que um sistema que usa a transformação da energia de vibração mecânica em energia elétrica, por meio dos materiais piezoelétricos (OKAYASU et al., 2012).

As duas abordagens mais promissoras para a captação de energia cinética são os métodos de transdução eletromagnética e piezoelétrica. Nas técnicas de geração e captação de energia conhecida como *Energy Harvesting* existem quatro aplicações principais para a colheita de energia, o piezoelétrico, a eletromagnética, a termoelétrica e a fotovoltaica (SODANO et al., SWALLOW et al., REID et al., ROWE et al., LEE et al., apud PERLINGEIRO et al., 2016). Para esse projeto o foco será na colheita de energia piezoelétrica. O material piezoelétrico construído por cerâmica de titanato zirconato de chumbo, PZT, é conhecido por ser o mais utilizado para transformar as vibrações mecânicas em uma forma utilizável de energia (PERLINGEIRO et al., 2016). Todavia, trata-se de um material frágil, apresentando limitações a deformações.

Esta técnica tem sido alvo de inúmeros trabalhos, principalmente para aplicações de pequeno porte. Esta alternativa pode ser utilizada como uma forma de geração direta de energia, sem a necessidade de baterias ou sistemas de armazenamento elétrico (ANDOSCA et al., 2012).

Na Figura 2.2 é apresentado um esquema de um MEMS, onde usa-se o funcionamento do *vibrational energy harvesters* de materiais piezoelétricos para geração de energia elétrica. Considerando a fonte de energia (vibracional), esta é a geometria mais comum utilizada. Constituída de uma viga retangular ou *cantilever*, onde uma das extremidades se encontra fixa (em alguns casos conectada a uma fonte de vibração) enquanto a outra extremidade permanece livre (RAMADASS et al., apud PERELINGEIRO et al., 2016).

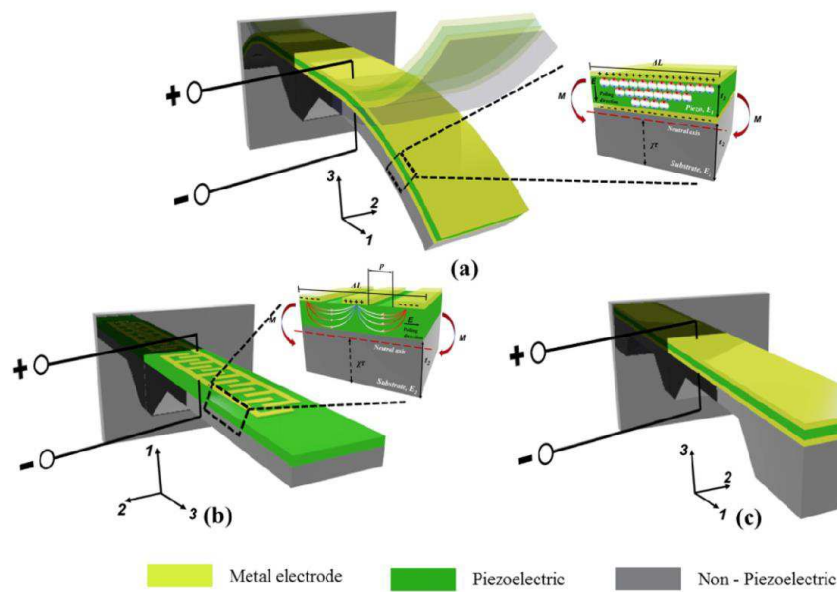


Figura 2.2 Esquema de dispositivo MEMS para geração de energia por meio do vibrational energy harvesters. (TODARO et al., 2017)

Segundo PERLINGEIRO et al., 2016, o dispositivo pode ser composto por somente uma camada piezoelétrica (*piezoelectric inimorph beam*), ou composta por duas camadas (*bimorth cantiléver beam*), que podem ser vistos na Figura 2.3, a seguir:



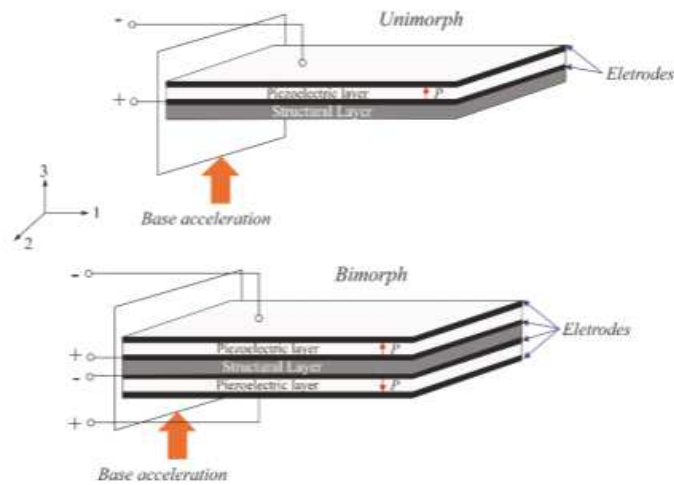


Figura 2.3 Tipos de geradores piezoelétricos, unimorfo (acima) e bimorfo (abaixo) (PERLINGEIRO et al., 2016)

Os bi-morfos são os mais utilizados já que fornecem maiores valores de energia de saída. Algumas razões levaram a estas configurações baseadas em vigas para conversores piezoelétricos, são elas: a energia convertida é diretamente relacionada com a deformação média da viga, frequências de ressonância relativamente baixas, deformação média relativamente alta para uma entrada de força e um fácil processo para fabricação de dispositivos de tamanho reduzido (PERLINGEIRO et al., 2016).

Segundo Perlingeiro, 2016, os principais materiais inteligentes são os materiais piezoelétricos, os materiais magnetostritivos e os fluidos eletro-magneto reológicos (apud Lagoudas, 2008; Priya and Inman, 2009). Usualmente, esta classe de materiais é utilizada como sensores e atuadores nos “sistemas inteligentes”. Possui características adaptativas, modificando suas propriedades físicas e formas a partir da imposição de um campo elétrico, magnético, temperatura ou carregamentos mecânicos (PERLINGEIRO, 2016).

### 2.2.1. Materiais piezoelétricos

Dentre as formas de captação de energia cinética, de acordo com Khaligh, 2010 (apud RANGEL, 2014), os métodos de transdução eletromagnética e piezoelétrica são as duas abordagens mais promissoras. Dito isso, os transdutores de vibração com tecnologia piezoelétrica têm sido explorados de forma mais ativa, se caracterizando como uma tecnologia mais madura, com diversas pesquisas em andamento e publicações efetivadas, que demonstram que os materiais piezoelétricos

são candidatos mais adequados para transformar de forma proveitosa e ágil tensão mecânica em energia elétrica, sem qualquer fonte adicional podendo suportar uma grande quantidade de tensão mecânica além de possuir flexibilidade quanto ao tipo de material piezoelétrico a ser utilizado (RANGEL, 2014).

Para melhor estudá-los é preciso saber que os materiais piezo, tem a capacidade de produzir energia por meio da variação do volume sólido, ou seja, ao deformar surge um campo de potencial elétrico e, com isso pode-se produzir corrente elétrica. Com o avanço da tecnologia de fabricação, tem sido cada vez mais comum o surgimento de dispositivos menores em escala dimensional, e devido ao seu reduzido tamanho, consomem uma menor quantidade de energia para seu funcionamento (TODARO et al., 2017).

Através de uma tensão mecânica, os materiais que possuem a propriedade de piezoeletricidade, se tornam eletricamente polarizados, isso é chamado de efeito direto, o inverso também é possível, quando colocado em uma diferença de potencial (DDP), sofrem uma deformação mecânica. Esses são os chamados materiais piezoelétricos. Alguns compósitos cerâmicos que conseguem produzir um potencial são os derivados do  $PbZrO_3$  (zirconato de chumbo) e  $PbTiO_3$  (titanato de chumbo) conhecidos como PZT (Lead Zirconate Titanate). O desenvolvimento desses materiais cerâmicos policristalinos ampliou as aplicações na área de engenharia, graças às propriedades desses novos materiais. (PERLINGEIRO, 2016).

De modo grosseiro, a piezoeletricidade é a capacidade de alguns materiais de gerar tensão elétrica quando sofrem um esforço mecânico (PERLINGEIRO et al., 2016). A expressão “piezo” origina-se da palavra grega que significa pressão. Estudos mostram, também, que assim como a geração de eletricidade por meio da deformação é viável, o contrário também pode acontecer. É possível também, a criação de uma deformação mecânica em resposta a aplicação de tensão elétrica. Dessa forma, aparece o conceito de geração ou colheita de energia (Energy harvesting) (PERLINGEIRO et al., 2016).

### **2.2.2. Aplicação de materiais piezoelétricos**

O artigo publicado em 2021 por Kankana Paul, Amann e Roy, trás um estudo sobre coletores de energia de banda larga não linear de alta densidade de potência usando novas arquiteturas de

mola cônica em um sistema de nó de sensor sem fio autônomo. Essas estruturas de mola exibem uma força de restauração não linear decorrente da distribuição atípica de tensões que pode ser ajustada adicionalmente pela alteração da razão de conicidade na estrutura (Figura 2.4) (KANKANA., et al, 2021).

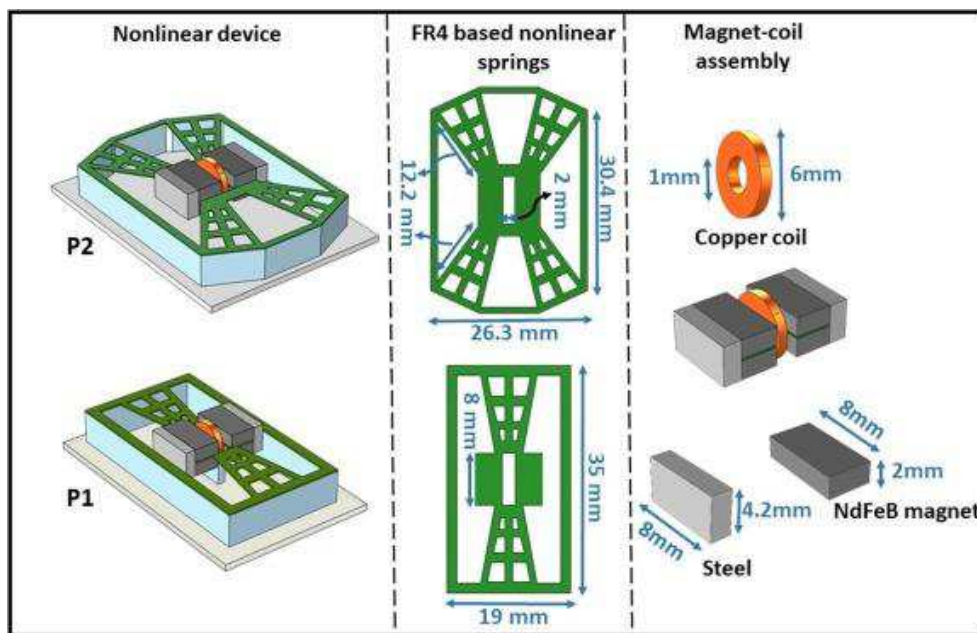


Figura 2.4 Estrutura de mola cônica em um sistema de nó (KANKANA., et al. 2021)

O dispositivo não linear foi utilizado para alimentar um nó de sensor sem fio que relata os parâmetros físicos vitais (umidade, temperatura), permitindo um sistema de aquisição de dados remoto resiliente (KANKANA., et al. 2021).

Neste artigo, a não linearidade monoestável foi incorporada aos coletores de energia por meio de interação magnética. Todavia, nessas estruturas, o pré-requisito de ímãs externos adiciona complexidade à sua implementação. O ímpeto para maximizar a produção de energia eliminada de uma pequena pegada (semelhante à de um nó sensor) levou a pesquisa para melhorar o desempenho do VEH, modificando as geometrias associadas (KANKANA., et al. 2021).

O afunilamento na arquitetura da mola permite, ajustar o grau de não linearidade, utilizando a distribuição atípica de tensões de tais estruturas geométricas. Isso aumenta a densidade de potência do VEH substancialmente em comparação com o sistema tradicional (KANKANA., et al. 2021).

### 2.3. Otimização topológica

Os dispositivos MEMS possuem grande aplicação na área de microgeração de energia elétrica. Devido ser um dispositivo de pequeno porte, é necessário que seja leve e eficiente do ponto de vista estrutural, ou seja, a estrutura deve ser a mais resistente possível com a menor massa possível. Existem várias técnicas que podem ser utilizadas para obter um design ótimo, uma das mais aplicáveis e mais difundidas é a otimização topológica, que permite ao projetista determinar a melhor distribuição de material dentro do domínio estrutural (SIGMUND; MAUTE, 2013).

Existem três abordagens influentes em problemas de otimização estrutural. Os métodos são diferenciados pelo tipo de resultado obtido.

São elas a Otimização Paramétrica ou Dimensional, a Otimização de Forma e a Otimização Topológica. Na otimização paramétrica as variáveis consideradas são parâmetros geométricos ou dimensionais. Aqui a forma e a tipologia da estrutura são mantidas fixas visto que o processo busca obter, por exemplo, a melhor área da seção transversal de modo que se obtenha a maximização da rigidez com o menor volume de material. Já a otimização de forma, apresenta a forma como variável, em que o contorno dos segmentos e a posição dos furos são modificados segundo a função objetivo (CAMPOS, 2018).

A Otimização Topológica, por sua vez, trabalha com o domínio fixo para encontrar a solução. O material deve ser distribuído dentro do domínio de acordo com a função objetivo e um conjunto de restrições impostas. Vazios são criados dentro do domínio que representa a ausência de material. Isso faz com que a função objetivo seja melhorada a cada interação (CAMPOS, 2018). Dito isso, essa é a abordagem sobre qual será o foco deste trabalho.

A otimização topológica consiste em encontrar a distribuição ótima de material dentro de um domínio específico para o projeto (GIMENES et al., 2017). Essa distribuição de material consiste em determinar em quais pontos do domínio conterão material isotrópico e quais pontos estarão vazios (BENDSOE apud GIMENES et al., 2017).

A Figura 2.5 apresenta uma estrutura genérica, onde podem ser apresentadas as regiões mais

relevantes da análise de otimização topológica. Consiste em um domínio sólido, onde na análise considerada, podem existir um material sólido rígido ( $\Omega_{s1}$ ) e um material sólido flexível ( $\Omega_{s2}$ ), e a região de domínio vazio ( $\Omega_v$ ) sem material.

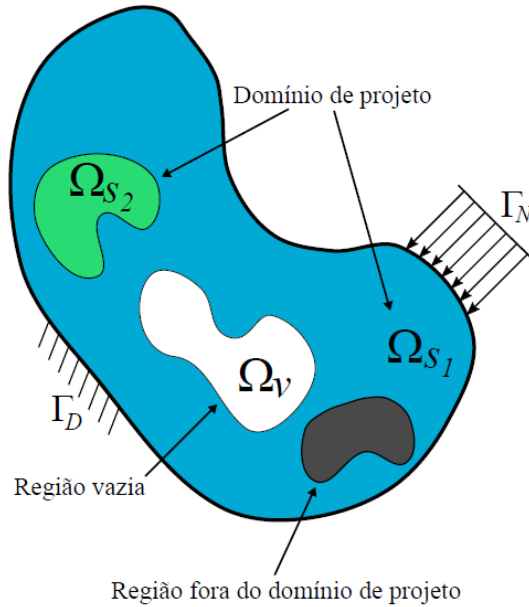


Figura 2.5 Definição dos domínios sólidos ( $\Omega_{s1}$ ) para o material 1 e ( $\Omega_{s2}$ ) para o material 2, e o domínio vazio ( $\Omega_v$ ), aplicado em uma estrutura deformável na otimização topológica (CAMPOS, 2018).

Os dispositivos MEMS são projetados para aplicações como sensores, atuadores e circuitos integrados. Nesta área, acopla-se a eletromecânica, dinâmica, eletrostática e os materiais piezoelétricos. É natural que projetos multi-físicos possuem complexidade e inovação para aplicações modernas, dessa forma a aplicabilidade eficiente dos dispositivos MEMS só é possível por meio da otimização topológica (Figura 2.6).

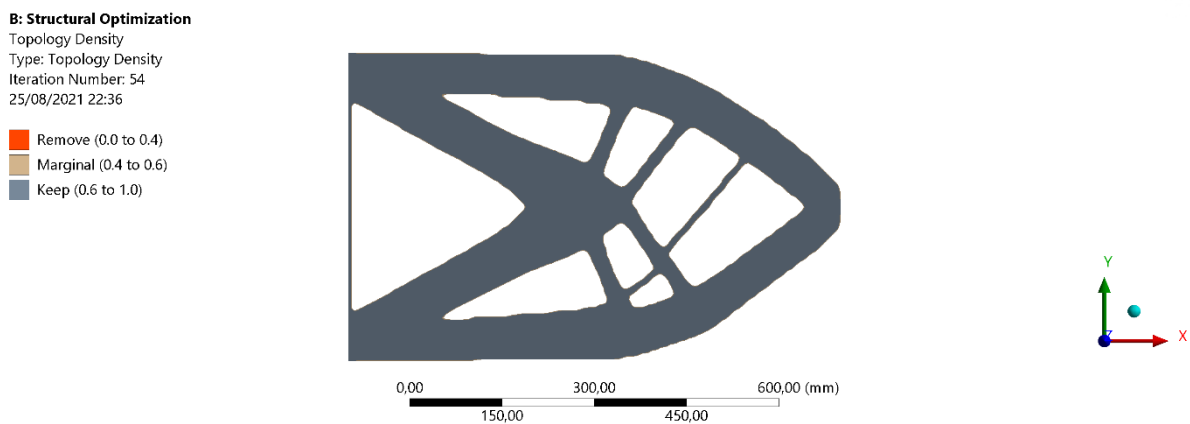


Figura 2.6 Resultado obtido de otimização topológica em chapa (AUTORA, 2021)

Neste trabalho são considerados os problemas de maximização da frequência natural e problema de maximização de rigidez. Todo o método de otimização aqui contido é o mesmo implementado pelo ANSYS para obter as topologias apresentadas no capítulo dos resultados.

Na otimização topológica para maximizar a rigidez, minimiza-se a energia de deformação total (compliance), e resolve-se o sistema pela discretização por elementos finitos utilizando-se a equação de equilíbrio estático, Equação 2.7, para determinar os deslocamentos da estrutura, (XIE; STEVEN, 1997 apud CAMPOS, 2018).

$$Ku = f \quad (2.7)$$

Onde  $\mathbf{K}$  é a matriz de rigidez global. O vetor de carga é dado por  $f$  e o vetor de deslocamento é dado por  $u$ .

Pode-se definir o problema padrão de otimização para maximizar a rigidez de estrutura como:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } C &= \frac{1}{2} f^T u \quad (\text{Função objetiva}) \\ \text{Sujeito a } V^* - \sum_{i=1}^n V_i x_i &= 0 \quad (\text{Restrição de volume}) \\ \text{e } Ku &= f \quad (\text{Equação de equilíbrio}) \end{aligned}$$

A função objetiva  $C$  é conhecida como *compliance*, e é a energia de deformação de uma estrutura, ou sua flexibilidade média.

Vê-se  $\mathbf{f}$  e  $\mathbf{u}$  como os vetores de carga e de deslocamento, respectivamente e  $\mathbf{K}$  é a matriz de rigidez global.  $V^*$  é o volume inicial do domínio do projeto,  $V_i$  é o volume do  $i$ -ésimo elemento e  $\mathbf{n}$  é o número total de elementos dentro do domínio de otimização.

Para o objetivo de maximizar a frequência natural, o domínio de projeto é analisado por meio do problema de vibrações livres. Usa-se a Equação 2.8. para determinação das frequências e dos modos naturais da estrutura. O objetivo de maximizar a frequência natural deve-se ao fato de que uma estrutura com um alto valor de frequência fundamental tende a ser razoavelmente mais rígida para qualquer carga concebível, dessa forma maximizar a primeira frequência natural resulta em um projeto que é também aceitável para as cargas estáticas (BENDSOE; SIGMUND, 2003 apud

CAMPOS, 2018).

$$(K - w_n^2 M)\Theta = 0 \quad (2.8)$$

onde,  $\mathbf{M}$  é matriz de massa global da estrutura,  $w_n^2$  é o autovalor e  $\Theta$  é o autovetor.

Pode-se formular um problema de otimização topológica para maximização da frequência natural  $w_n$  de uma estrutura em vibrações livres como segue,

*Maximizar*  $w_n$  (Função objetiva)

*Sujeito a*  $V^* - \sum_{i=1}^n V_i x_i = 0$  (Restrição de volume)

E  $(K - w_n^2 M)\Theta = 0$  (Problema de autovalor)

### 2.3.1. Manufatura aditiva

A fabricação aditiva amadureceu nos últimos anos, e com isso é possível construir mecanismos e peças cada vez mais complexas. Destaca-se a impressão 3D de polímeros que é muito difundida atualmente, e a impressão de metais e cerâmicas. Muitos trabalhos foram desenvolvidos com os temas sobre MEMS, *vibrational energy harvesters* e a fabricação aditiva, destaca-se os trabalhos de (CHEN et al., 2016), (KIM et al., 2014) e (KULLMANN et al., 2012).

## **3 METODOLOGIA**

Com base nos temas estudados, pretende-se iniciar esta pesquisa por meio do levantamento bibliográfico atual da área, principalmente no que tange a microgeração elétrica de energia por meio da vibração mecânica. Inicialmente será realizado uma pesquisa bibliográfico sobre o tema *vibrational energy harvesters* e sobre materiais com propriedades piezoelétricas.

O tema de vibrações mecânicas em estruturas é de vital importância ao projeto, pois os conceitos sobre ressonância e excitações forçadas são aplicados na teoria de harvesters (MELLO; SALAS; SILVA, 2012). Após esta etapa, pretende-se realizar o levantamento bibliográfico sobre a microgeração de eletricidade e sobre os dispositivos MEMS utilizando otimização topológica.

### **3.1. Análise da otimização topológica**

#### **3.1.1. Construção do modelo**

A construção de modelos e simulações é uma técnica de fundamental importância na fase inicial da pesquisa. Dessa maneira pode ser reduzido os problemas que podem surgir se usados somente o método de tentativa e erro, já que os modelos numéricos confiáveis fornecerão informações importantes para a construção do protótipo experimental (SHOUTO apud RANGEL, 2014). Para esse projeto serão construídas duas geometrias, uma chapa e uma viga, que gerarão resultados que poderão ser considerados ao final das análises.

Para que seja possível realizar a análise modal do dispositivo sob vibrações excitantes, é necessário verificar sua integridade estrutural por meio da modelagem numérica do corpo sólido. Pretende-se aplicar a análise por elementos finitos no dispositivo, devido ser um método robusto e muito utilizado para análises estruturais. Para que isso seja possível, pretende-se utilizar o pacote comercial Ansys, que possui muitas ferramentas para esta finalidade.

Após a análise e feito os estudos dos resultados, poderão ser determinadas estratégias de configurações físicas que permitam uma maior geração de energia elétrica para cada parâmetro geométrico, e uma compreensão física de como cada parâmetro afeta a energia gerada é obtida. Dessa maneira, a modelagem de um sistema gerador não fornece apenas a quantidade de potência



de saída, mas também permite o aperfeiçoamento geométrico de um determinado sistema.

Estudos como a análise modal serão fundamentais para o projeto. Essa análise determina as características de vibração (frequências naturais e modos de vibração) da nossa estrutura. A análise pode servir como ponto de partida para análises mais detalhadas como a harmônica e a transiente. No projeto da estrutura para as condições de carregamento dinâmico as frequências naturais e modos de vibração são parâmetros importantíssimos (ANSYS 14, 2011).

Após a etapa de verificação da estrutura pretende-se aplicar o método da otimização topológica para projetar um dispositivo com o menor peso possível sem prejuízos a sua resistência mecânica que atenda a necessidade de maximização da primeira frequência natural. Pretende-se aplicar a ferramenta de otimização topológica do pacote Ansys, devido a sua estabilidade computacional e a integração com ferramentas para tratamento e impressão 3D, (“Topology Weight & Load Optimization Software | Ansys”, [s.d.]).

De acordo com Rangel (2014), o mecanismo presente na maioria dos trabalhos científicos publicados na área de captação de energia piezoelétrica consta que a maior amplitude de vibração da viga ocorre quando excitada em uma de suas frequências naturais, fazendo com que o sistema entre em ressonância e que a sua extremidade livre atinja o maior nível de deslocamento, enquanto, a região próxima a extremidade engastada sofre os maiores níveis de deformação.

Após a definição das geometrias iniciais, duas análises devem ser feitas a fim de introduzir a otimização topológica. São elas a Análise Estrutural Estática e a Análise Modal. A Análise Estrutural Estática nos dará resultados indicando deformações, assim como deslocamento e outros indicativos, que a viga deve suportar ao serem inseridas forças e informações externas. Essa análise ao ser seguida por uma otimização topológica, deverá ter como objetivo minimizar a flexibilidade do modelo. Em outras palavras, o modelo deverá suportar a mesma quantidade de energia exercida sobre ele, com uma quantidade “x” de material retirado dele. Para esse caso essa quantidade será de 50% da massa inicial. Para essa análise estrutural estática foram inseridas aos modelos condições iniciais, como é possível ver na Figura 3.1. (a) para a chapa e, a seguir, foi inserida uma força inicial de 1000N no componente Y, sendo a suas condições de limite o “remote displacement”, localizado nas arestas laterais. Essa condição é vantajosa em relação à fixação regular, já que um comportamento de deformação pode ser adicionado à entidade atribuída e uma condição de rotação

que pode ser aplicada à atribuição (SIMSCALE, 2020). Para a viga (Figura 3.1 (b)), a força inicial é inserida na componente X, com total de 1000N, e suporte fixo na face inferior.

O material utilizado para todas as análises será o aço estrutural.

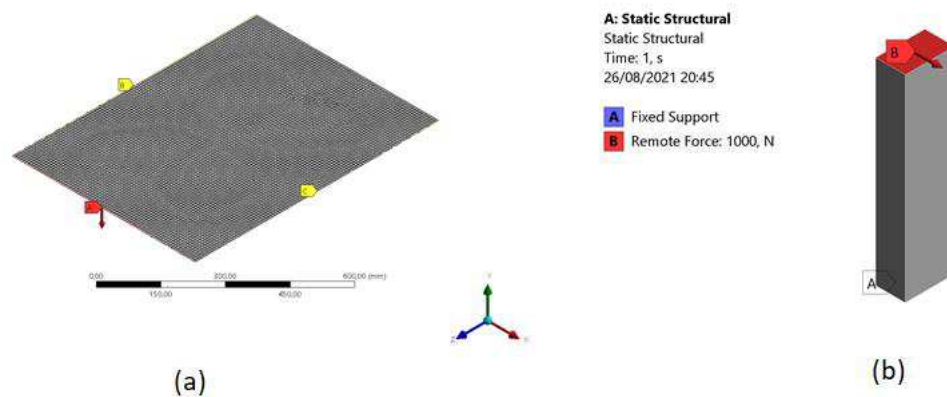


Figura 3.1 Suporte e força inicial (AUTORA, 2021)

Após a realização da análise são gerados os valores de deformação e a tensão equivalente. Feita a análise é possível gerar a otimização topológica desse modelo.

### 3.1.2. Realização da análise modal e estática

A análise modal inicial deve nos dar valores de frequências naturais e modos de vibração do nosso modelo inicial. Para isso uma malha foi gerada, gerando um total de 7.427 elementos e 7.603 nós para chapa e 11.390 elementos e 51.686 nós para a viga.

A análise utiliza a mesma geometria, malha, ponto fixo e material da análise estrutural. A seguir, uma representação gráfica dos passos seguidos no Ansys para a realização dessas análises (Figura 3.2).

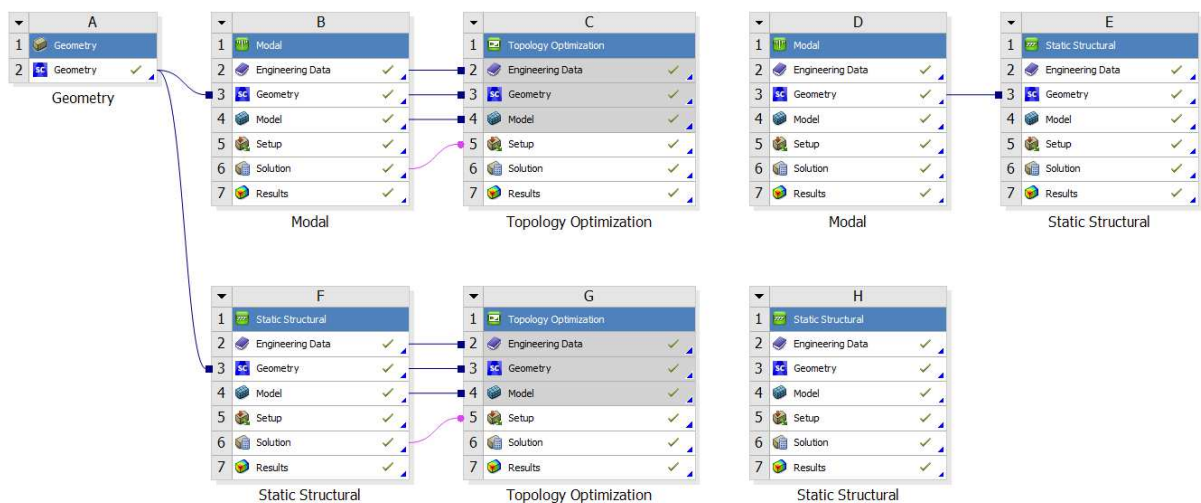


Figura 3.2 Metodologia da análise (AUTORA, 2021)

Simplificando o que foi abordado anteriormente, pode-se dizer que a análise seguirá os seguintes passos:

- Criação da geometria inicial para a chapa e viga
- Análise modal da mesma e conhecimento dos seus modos de vibração e frequências naturais
- Otimização topológica a partir da análise modal, que terá como objetivo maximizar o primeiro modo de vibração enquanto retira 50% da massa do objeto
- A geometria gerada será exportada e então será feita uma segunda análise modal, dessa maneira os dados extraídos dela podem ser comparados à primeira realizada
- Será realizada uma análise estrutural no corpo otimizado para verificar a sua integridade em relação à estrutura original, que deve ser analisada em “F”.
- A geometria original passa pela análise estrutural
- Essa análise é utilizada para gerar uma geometria otimizada em relação a minimizar a “compliance”, como foi explicada a “minimizar a flexibilidade”, enquanto retira 50% da massa.
- Irá exportar essa geometria e verificar sua integridade em relação a estrutura original.

### 3.2. Bancada experimental

Após a definição do formato do dispositivo MEMS, a próxima etapa é a fabricação por meio

da impressão 3D. Uma vez possuindo o dispositivo, será aplicado uma película de material piezoelétrico, e ambos postos em bancadas para testes. A Figura 3.3 ilustra por meio de um esquemático o funcionamento do dispositivo MEMS. Pretende-se fixar o dispositivo e acoplar uma placa piezoelétrica para que seja possível gerar deformação por meio da excitação vibracional, e assim gerar energia elétrica.

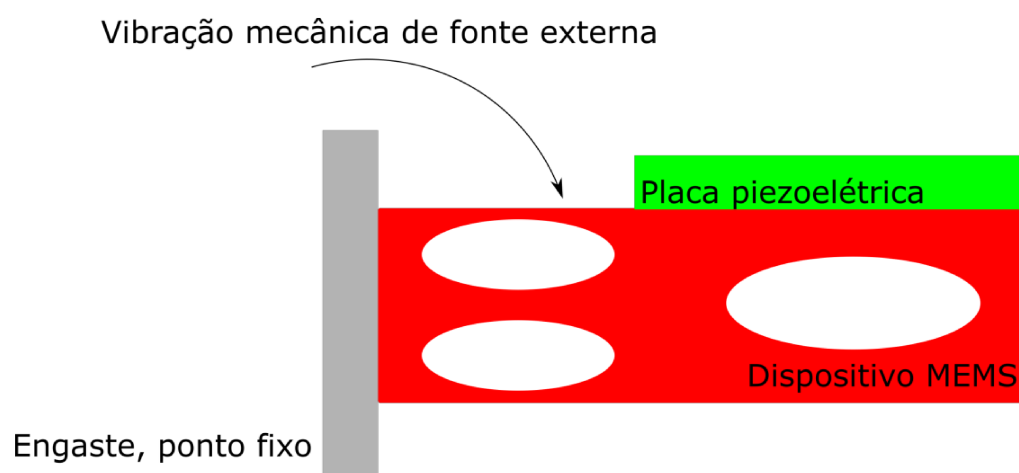


Figura 3.3 Esquemático conceitual do dispositivo MEMS proposto, sem escala (Autores, 2021)

Com os ensaios e testes será possível verificar se o dispositivo é capaz de gerar eletricidade a partir de vibração mecânica, e assim ser possível melhorar o protótipo para aumentar sua eficiência. Estes resultados podem gerar publicações na área e patentes sobre o dispositivo.

### 3.2.1. Validação do modelo experimental

A bancada experimental seguirá o conceito esquematizado (Figura 3.4) mostrado anteriormente, onde há o objetivo de captura das informações geradas pela excitação do objeto. Primeiramente, da barra engastada não otimizada (1), que servirá como guia para o trabalho posterior. Essa primeira construção, trará a validação de que o modelo numérico exibe resultados condizentes com a realidade, e que o experimento se comporta como o esperado.

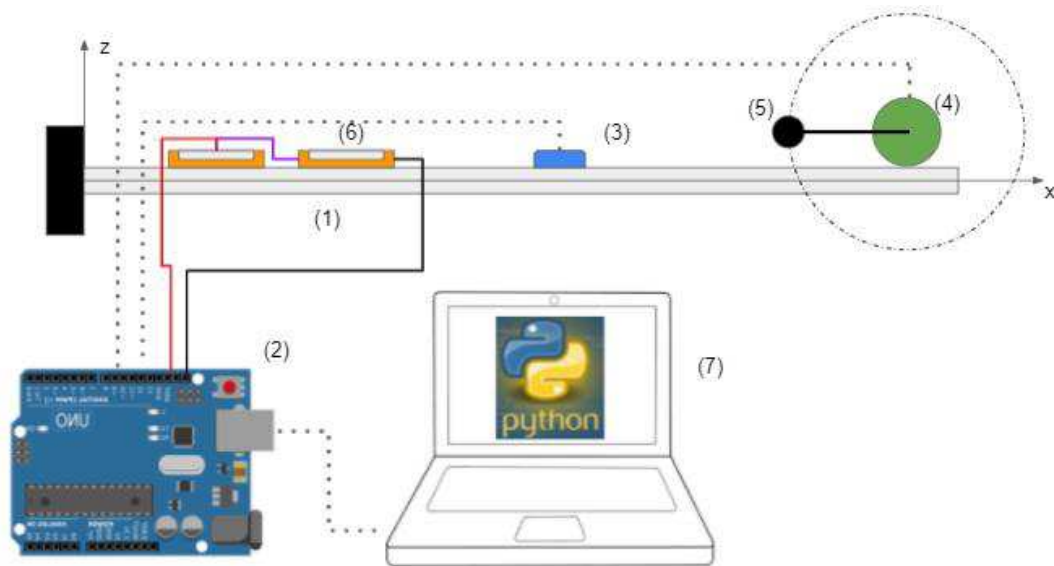


Figura 3.4 Esquemático conceitual do experimento proposto, sem escala (Autores, 2021)

Este experimento, como visto no esquema anterior, conta com uma plataforma de prototipagem, Placa Arduino Mega (2), que irá interagir com o ambiente por meio de hardware e software, e conectado ao computador, receberá e enviará informações, para leitura e tratamento pelo software implementado no Python (7). Por meio do acelerômetro Adxl335 (3), é possível medir a aceleração ou vibração sobre o experimento.

Da mesma maneira é possível interagir com os dados gerados pelos sensores piezoelétricos (6). Mas diferente dos acelerômetros, os sensores piezoelétricos deverão gerar uma diferença de potencial (ddp), demonstrando a microgeração de energia através da vibração.

Dessa maneira é necessário que se confirme que os dados gerados pela bancada experimental condizem com o esperado pelo modelo numérico.

Para efeito de excitação é utilizado um pequeno motor DC (4) que conta com uma massa excêntrica (5).

Assim, o modelo experimental pode ser visto da seguinte maneira ao ser construído (Figura 3.5):



Figura 3.5 Experimento proposto (Autores, 2021)

Acoplada à placa arduíno estará a protoboard, como pode ser vista no diagrama a seguir (Figura 3.6):

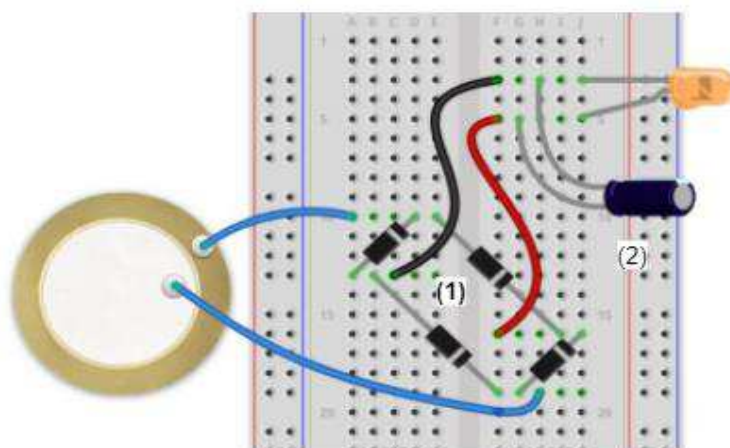


Figura 3.6 Diagrama com ponte retificadora de diodos (Autores, 2021)

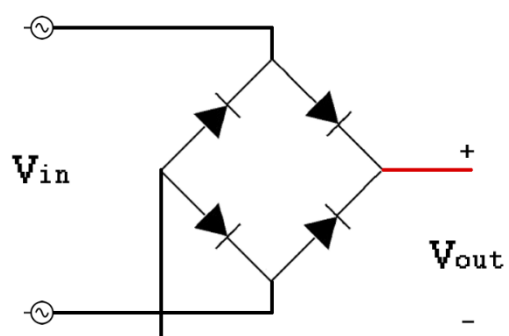


Figura 3.7 Esquema de ligação ponte retificadora composta de quatro diodos (USINA INFO, c2021)

A ponte retificadora de diodos (Figura 3.7), vista pelos elementos em preto no diagrama (1), servirá, em poucas palavras, para alinhar a corrente, ou seja, tensão contínua. Isso é necessário devido ao fato de que a célula piezoelétrica é tracionada e comprimida para gerar energia através de suas deformações. Isso gera tensões negativas. O que faz da tensão gerada uma tensão alternada. Todavia, a maior parte dos aparelhos eletrônicos precisa de corrente contínua para funcionar, e é por isso que a fonte retificadora é necessária.

A tensão contínua é aquela que o fluxo de elétrons flui em um único sentido (mas não necessariamente constante) durante seu período de geração. Nossa ponte retificadora alinhou a corrente com a ajuda de diodos. Diodos são componentes eletrônicos que conduzem eletricidade em apenas um sentido. Sabendo que só haverá corrente elétrica se a tensão do anodo for maior que a do catodo, os diodos estão ligados entre si assumindo posições estratégicas.

Para tensão permanecer continua na saída é necessário utilizar um capacitor (2) em paralelos aos diodos. Dessa maneira, o capacitor irá armazenar cargas elétricas num campo elétrico, acumulando um desequilíbrio interno de carga elétrica, e no momento que a tensão começar a descer, então será o capacitor que enviará sua energia para alimentar o circuito. Dessa forma, a tensão de saída será contínua.

Logo poderá ser encaminhada ao LED que acenderá ao receber energia. Na figura 3.8 a seguir, é possível ver o modelo de protoboard montada com o sistema indicado no diagrama anterior, assim como o multímetro que deverá ser usado para as leituras de tensão gerada.

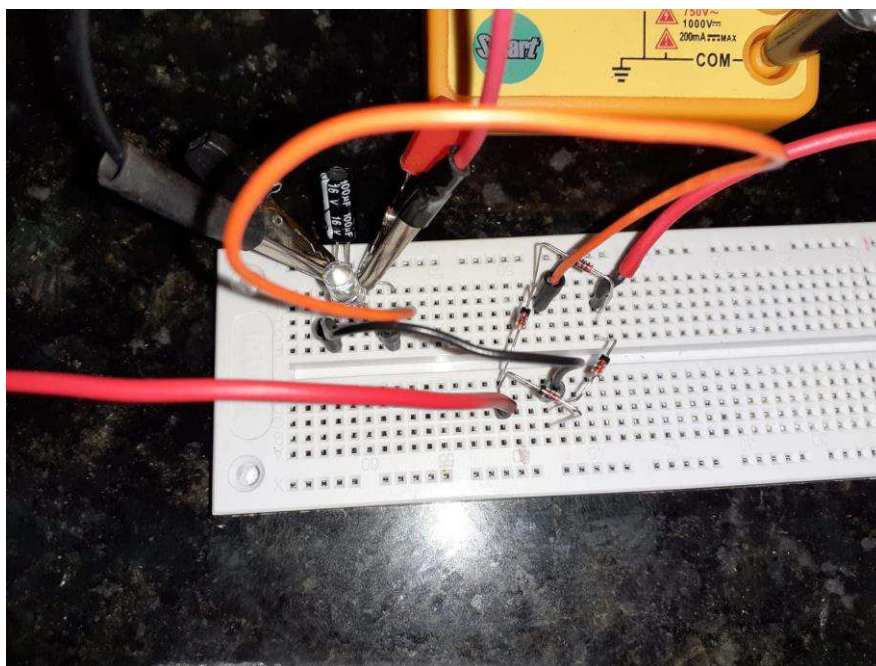


Figura 3.8 Protoboard experimental (Autores, 2021).

A seguir, na figura 3.9, vê-se a geometria para análise 1D da barra de 920 mm, que será analisada para comparações com o modelo experimental.

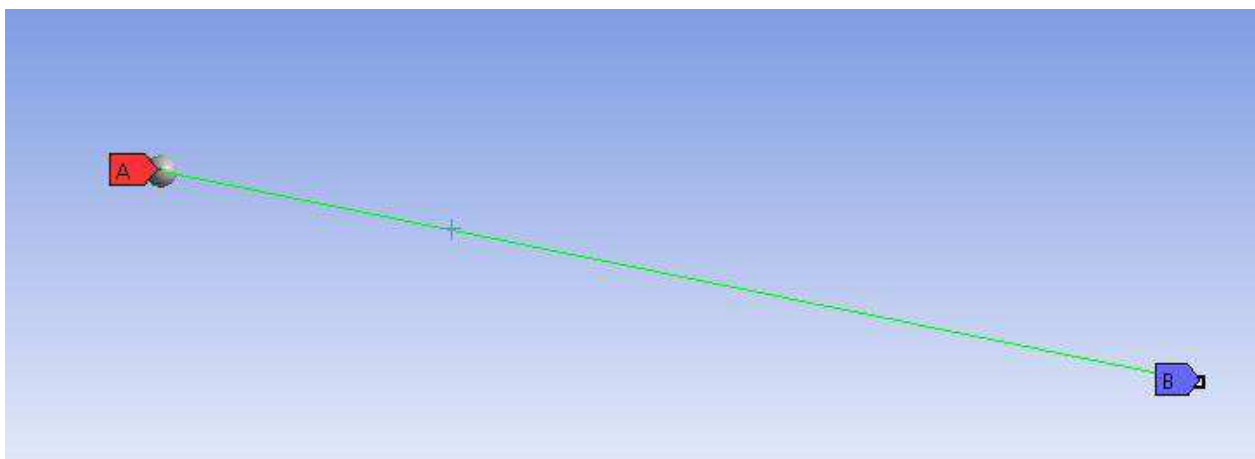


Figura 3.9 Geometria 1D, barra 920 mm, sem escala (Autores, 2021)

Para essa validação será feita uma Análise Modal. Tal análise nos reportará os dados das frequências naturais da barra em questão, assim como seus modos de vibração.

Para que possa ser corretamente comparada à análise experimental, suas medidas e dados



devem condizer com a realidade do modelo. Dessa maneira, no ponto A, visto na Figura 3.7, anterior, tem-se o ponto de massa, referente ao motor que excitará o sistema. Assim, o ponto fixado na extremidade recebe o valor de 50 gramas (0,05kg), referente ao motor. O ponto B, por sua vez, refere-se ao suporte fixo, indicando o engaste do sistema.

A análise conta com a inserção do material, e seguindo o modelo real, é inserido a Liga de Alumínio (Alluminium Alloy) como o material da viga.

Para que a análise 1D aconteça o mais próximo possível do modelo físico, é crucial que seja criado um perfil para a vida. Como é visto na figura a seguir, Figura 3.10, vê-se o perfil criado.

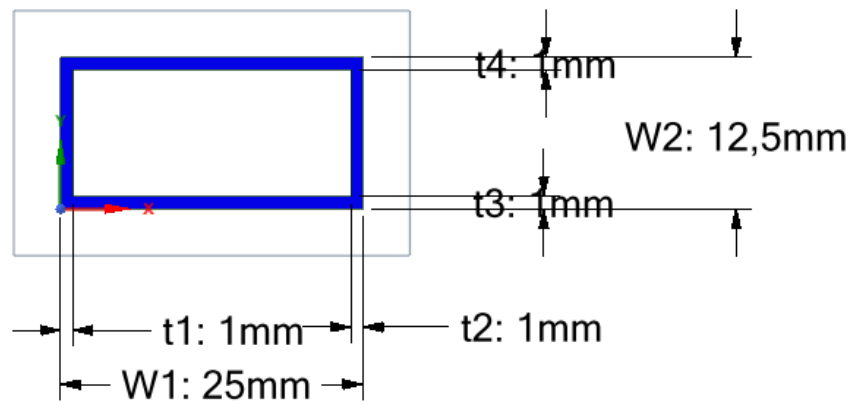


Figura 3.10 Perfil da viga, sem escala (Autores, 2021)

Dessa maneira, ao criar a geometria, inserir o perfil e adicionar os pontos de massa e suporte fixo, de maneira que esteja de acordo com o modelo experimental, basta criar a malha desejada para que a análise possa ser feita. Para essa análise foi criada uma malha de 0,16mm.

Ao final da Análise Modal feita no Ansys, é calculada as frequências naturais do corpo em estudo, assim como seus modos de vibração. Esses valores poderão ser comparados aos valores encontrados na bancada experimental, e será possível validar esse modelo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Validação do modelo experimental

A análise modal realizada com o modelo representado na seção “3.2.1. Validação do modelo experimental”, mostra o seguinte resultado, indicado na Figura 4.1.

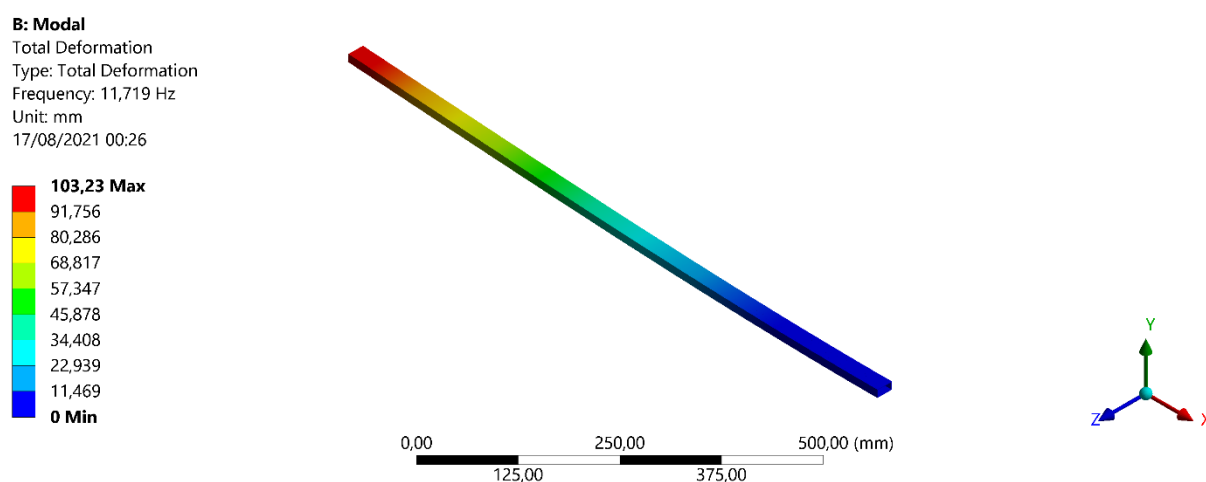


Figura 4.1 Resultado análise modal da viga experimental (Autores, 2021)

Essa análise resultou nas seguintes frequências, Figura 4.2.

|   | Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz] |
|---|------|--|
| 1 | 1.   | 11,719   |
| 2 | 2.   | 20,439   |
| 3 | 3.   | 85,555   |
| 4 | 4.   | 149,09   |
| 5 | 5.   | 253,15   |
| 6 | 6.   | 440,42   |

Figura 4.2 Frequências encontradas para a viga experimental (Autores, 2021)

Esses valores se tornam base para a análise experimental.

Tal análise, como abordado anteriormente na seção “3.2.1. Validação do modelo experimental”, com a ajuda do arduíno e dos acelerômetros indica a vibração do sistema

experimental.

Com a ajuda do software implantado em Python e utilizando a transformada de Fourier é possível que um sinal no tempo (enviado pelos acelerômetros e dispositivos piezoelétricos) seja convertido em espectro de frequência. Dessa forma é possível que os dados que são enviados aos Python pelo arduíno em formato TXT, possam ser analisados, calculados e gerando os gráficos a seguir (Figura 4.3.):

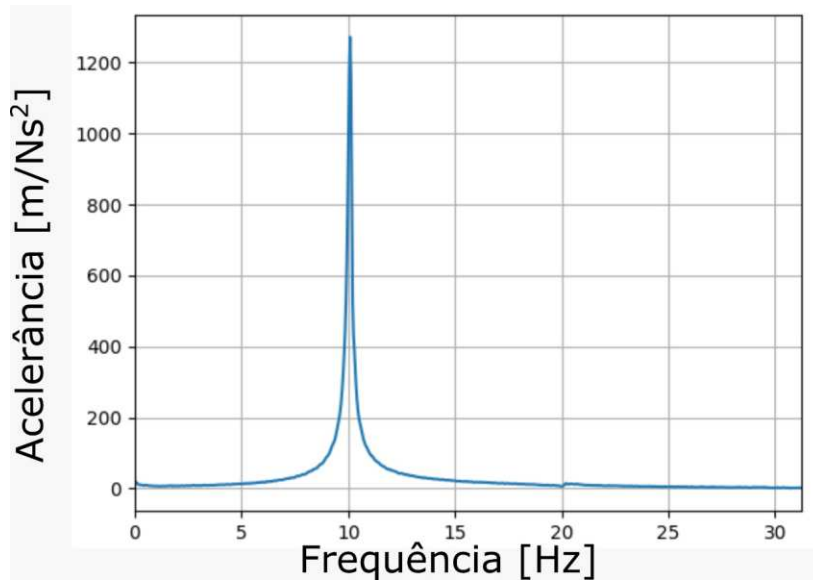


Figura 4.3 Frequência de excitação, modelo experimental (Autores, 2021)

No gráfico gerado é possível notar que a frequência de maior amplitude é aquela próxima ao valor de 10 Hz, com uma tendência ao lado direito da linha média. Isso indica que a frequência onde há maior amplitude no modelo experimental é também a frequência natural indicada pelo primeiro modo de vibração do modelo numérico.

Esse fato valida o modelo experimental, e o habilita para as demais análises.

Visto que a análise numérica realizada no ANSYS indicou frequência natural da viga semelhante àquela indicada pelo modelo experimental (aproximadamente 10 Hz), validando o experimento, basta saber se a vibração gerada é suficiente para gerar energia.

#### 4.1.1. Coleta de dados

Utilizando os acelerômetros e dispositivos piezoelétricos é possível determinar a aceleração gerada pelo modelo, assim como a geração de energia (Figura 4.4 e 4.5):

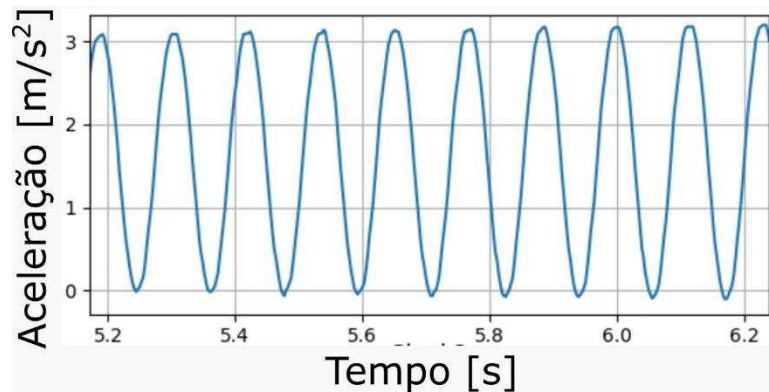


Figura 4.4 Dados de aceleração colhidos pelo experimento (Autores, 2021)

Na Figura 4.4, é possível visualizar o alcance da aceleração em Z. Estando em uma faixa que vai de 0 a 3 m/s<sup>2</sup>, aproximadamente.

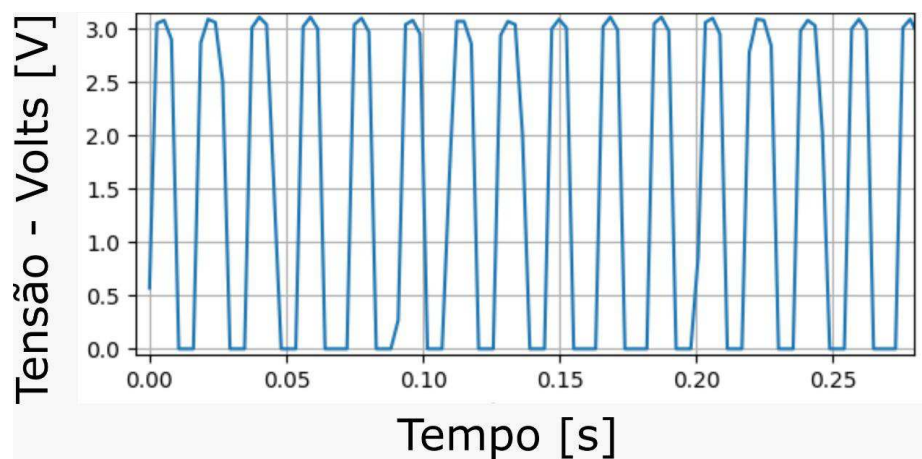


Figura 4.5 Dados de tensão colhidos pelo experimento (Autores, 2021)

Já Figura 4.5, vê-se a tensão gerada nos terminais dos piezos em série. Esse gráfico indica que há sim a microgeração de energia pelo modelo, visto que há geração de até 3 Volts, aproximadamente.

Foi adicionado ao experimento, como visto anteriormente, luz LED e multímetro ao sistema (Figura 4.5). Juntos eles corroboram para a confirmação de geração de energia.

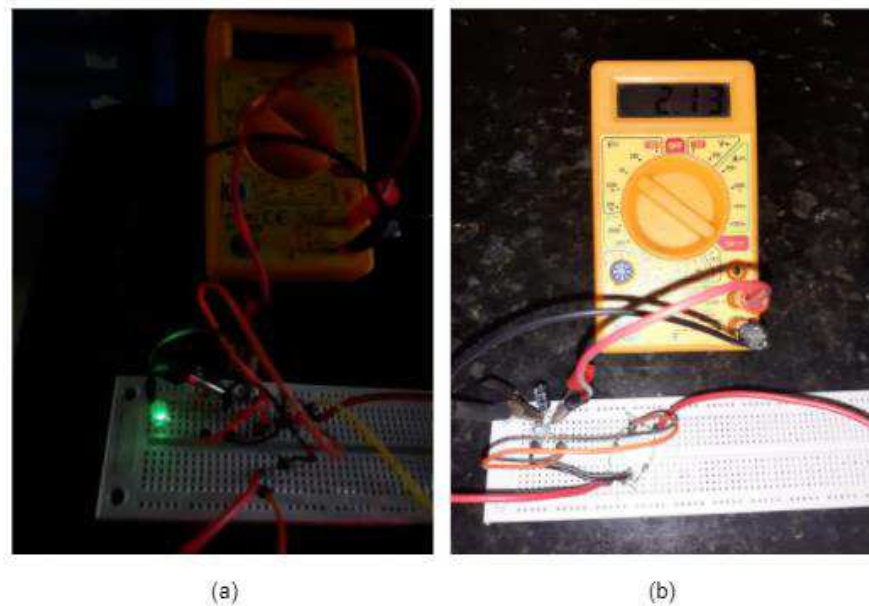


Figura 4.5 Dados colhidos pelo experimento (Autores, 2021)

Na figura 4.5. (a), vê-se o acendimento da luz LED, indicando que há geração de energia. Já em (b), vê-se a indicação no visor do multímetro. Nele é possível ver que são aferidos 2,13 Volts ao sistema. Confirmando o alcance já calculado anteriormente.

## 4.2. Análises da Placa Fina

### 4.2.1. Construção do modelo

Para esse objetivo foi escolhido uma geometria do tipo chapa, retangular. Como é possível ver na Figura 4.6 a seguir, ela deve possuir uma altura de 4 mm, comprimento de 800 mm e 600 mm de largura.

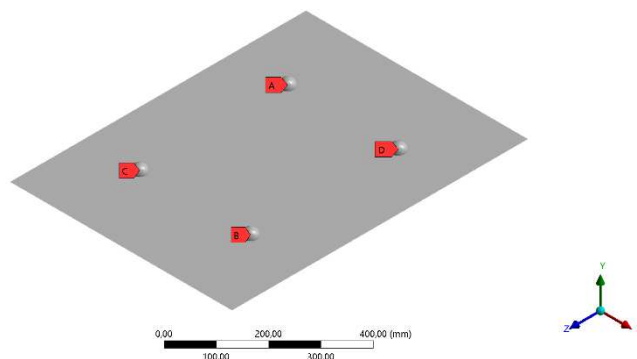


Figura 4.6 Dimensões da geometria inicial (Autores, 2021)

É possível observar, ainda, que foram inseridos à geometria quatro pontos de massa. Eles deverão simular o comportamento das peças piezoelétricas situadas na chapa.

#### 4.2.2. Análise Modal Inicial

Essa análise determinará os modos de vibração e as frequências naturais do objeto de estudo. Para isso algumas condições foram inseridas ao nosso estudo, são elas: os pontos de massa representando as peças piezoelétricas e a fixação, indicada pelo “Remote displacement”, “A” e “B”, localizadas nas arestas laterais (Figura 4.7). Como mencionado, essa prática se deve à possibilidade de inserir rotação à análise.

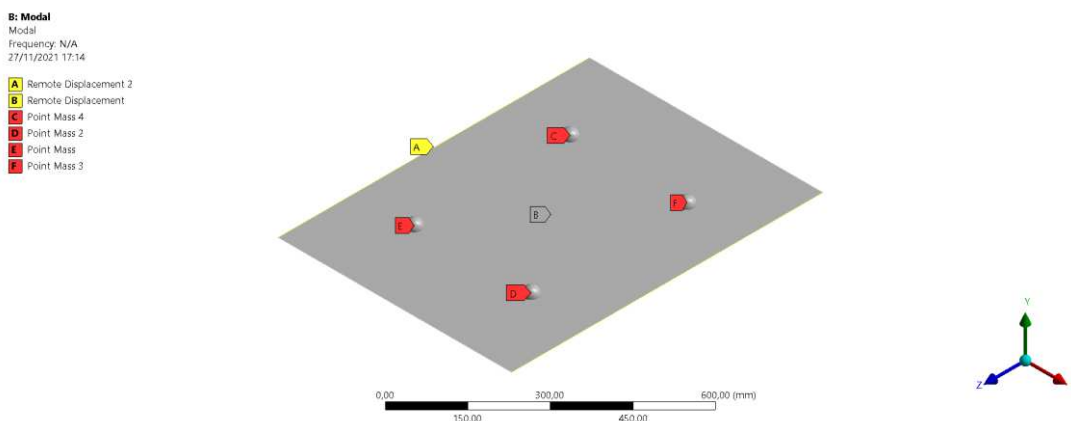


Figura 4.7 Condições de contorno da análise modal inicial (Autores, 2021).

A análise gerou as seguintes frequências naturais (Figura 4.8):

|   | Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz] |
|---|------|--|
| 1 | 1.   | 16,605   |
| 2 | 2.   | 24,916   |
| 3 | 3.   | 30,801   |
| 4 | 4.   | 48,078   |
| 5 | 5.   | 53,795   |
| 6 | 6.   | 65,977   |

Figura 4.8 Frequências naturais do objeto inicial (Autores, 2021)

Encontrada a primeira frequência natural com o valor de 16,605 Hz.

Na figura 4.9, a seguir, é possível visualizar a representação do primeiro modo de vibração:

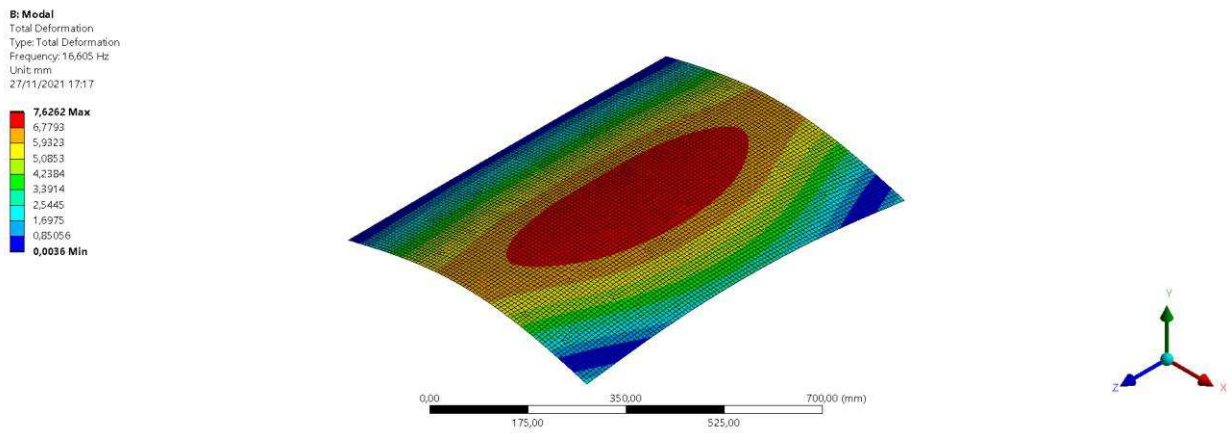


Figura 4.9 Primeiro modo de vibração (Autores, 2021)

### 4.2.3. Otimização topológica modal

Essa otimização seguiu os seguintes critérios (Figura 4.10):

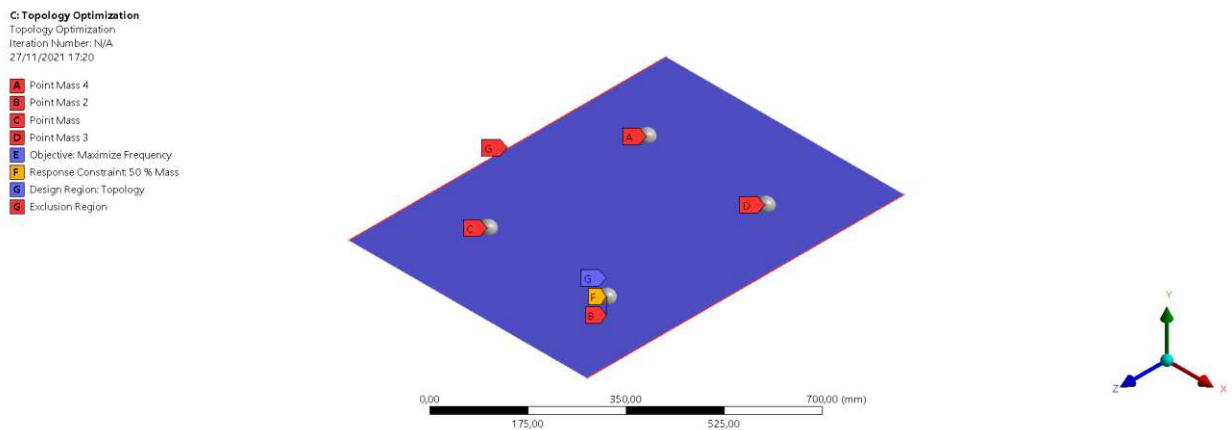


Figura 4.10 Critérios da otimização topológica modal (Autores, 2021)

Seguindo os mesmos critérios da análise modal, nessa otimização estão inseridos: quatro pontos de massa representando as peças piezoelétricas, com o objetivo de maximizar a primeira frequência natural, com a restrição para retirar 50% da massa total e, ainda, com a exclusão da região “G”, ou seja, as arestas laterais.

Essa otimização gerou a seguinte topologia (Figura 4.11):

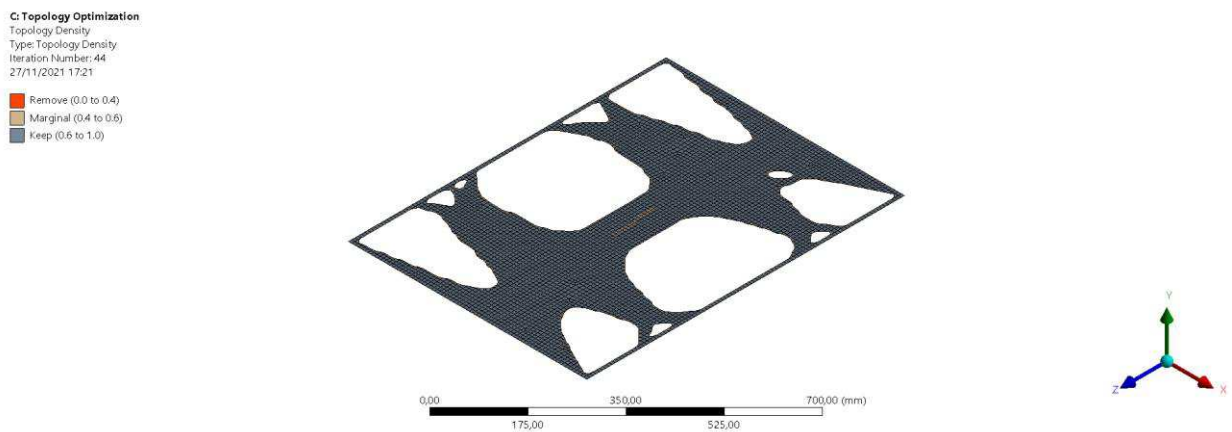


Figura 4.11 Topologia otimizada para maximizar primeira frequência (Autores, 2021)

Essa geometria deve ser aquela responsável por ter maior alcance de amplitude quanto à sua vibração. Dessa maneira, os piezoeleros posicionados na sua superfície podem gerar mais DDP.

Após a geração da geometria ótima de acordo com o objetivo empregado a ela, é necessário avaliar se os resultados alcançados por ela condizem com o esperado. Para isso foram realizadas análises, estática e modal, na geometria final.

#### 4.2.4. Análise modal da topologia otimizada

A topologia otimizada foi exportada em formato a ser realizada uma nova análise, a fim de conhecer os novos valores de frequência natural e modos de vibração. A seguir, as condições que restringem esse modelo, se comportando de maneira similar às análises anteriores, a fim de uma comparação assertiva (Figura 4.12):

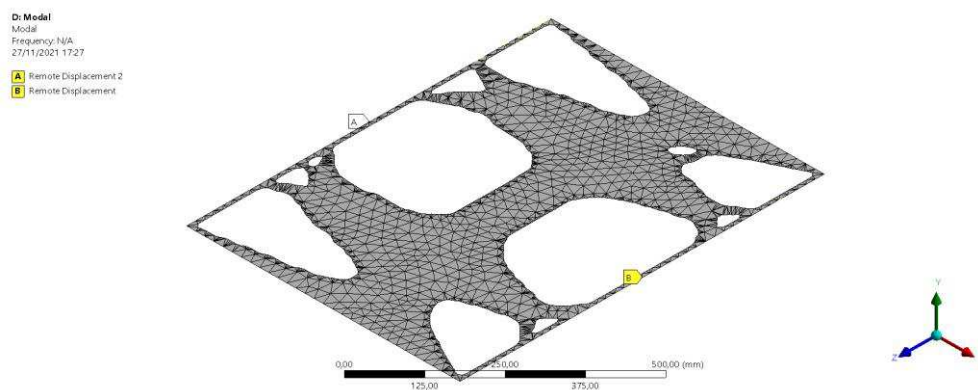


Figura 4.12 Condições de restrição para análise modal (Autores, 2021)



A seguir, na Figura 4.13, é possível visualizar as novas frequências encontradas a partir da análise na topologia otimizada.

|   | Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz] |
|---|------|--|
| 1 | 1.   | 19,881   |
| 2 | 2.   | 27,033   |
| 3 | 3.   | 27,36  |
| 4 | 4.   | 63,615   |
| 5 | 5.   | 67,303   |
| 6 | 6.   | 88,49  |

Figura 4.13 Novas frequências naturais (Autores, 2021)

É possível notar um aumento das frequências naturais dos modos de vibração, ao comparar com o modelo inicial. Vê-se na figura 4.14, a seguir, o resultado da análise modal da geometria ótima para o primeiro modo de vibração:

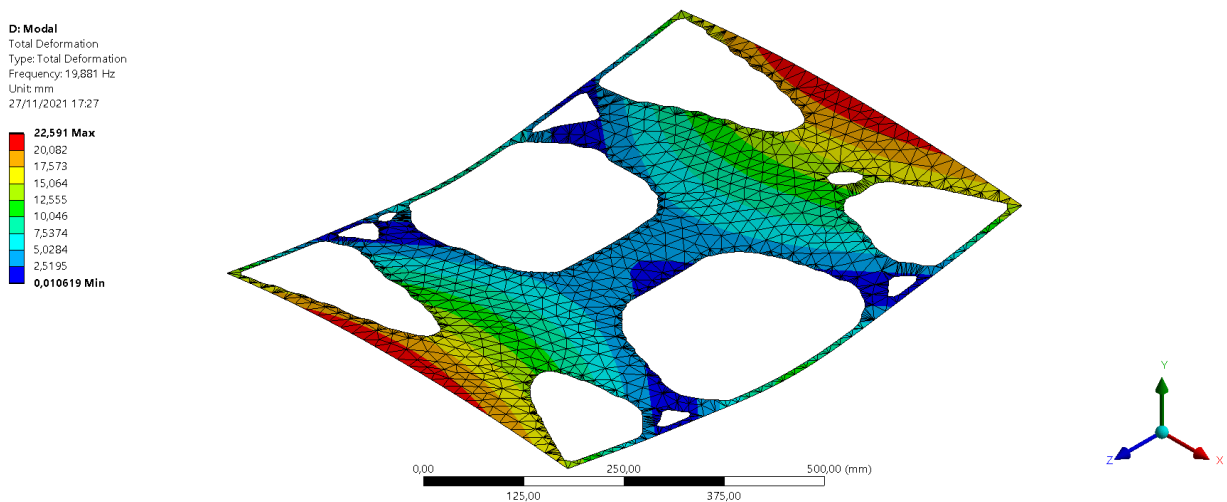


Figura 4.14 Primeiro modo de vibração da topologia ótima (Autores, 2021)

#### 4.2.5. Análise estática inicial

Essa análise tem como objetivo dar informações acerca da integridade estrutural do objeto em análise antes da otimização da sua topologia. Na Figura 4.15, a seguir, é possível identificar a força de 1000N na componente Y, na direção negativa, enquanto as condições de restrição são similares às análises anteriores, restringindo o movimento, com exceção da rotação em Z, que se encontra livre.

**F: Static Structural**  
 Static Structural  
 Time: 1, s  
 27/11/2021 20:45

**A** Force: 1000, N  
**B** Remote Displacement  
**C** Remote Displacement Z

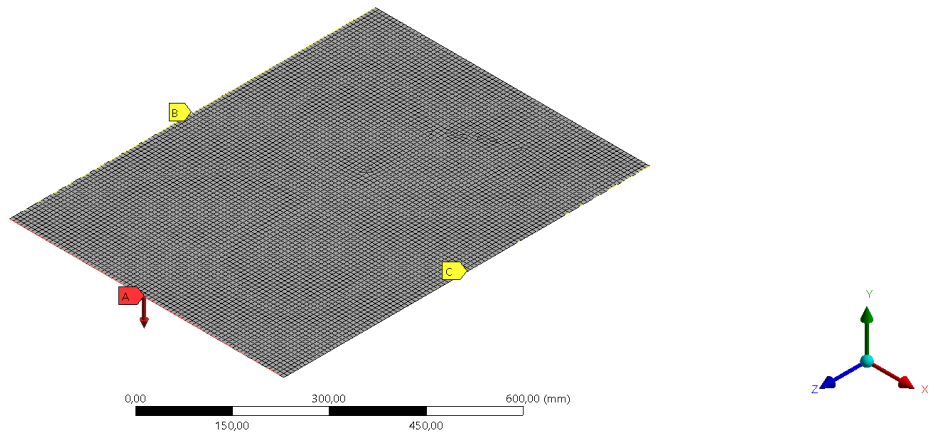


Figura 4.15 Condições de restrição para análise estática inicial (Autores, 2021)

Essa interação gerou um deslocamento máximo de 18,398 mm (Figura 4.16). E tensão máxima (von-mises) de 102,08 MPa, com média de 65,035 MPa (Figura 4.17).

**F: Static Structural**  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 1  
 27/11/2021 20:52

**18,398 Max**  
 16,354  
 14,31  
 12,265  
 10,221  
 8,177  
 6,1328  
 4,0886  
 2,0444  
**0,00014731 Min**

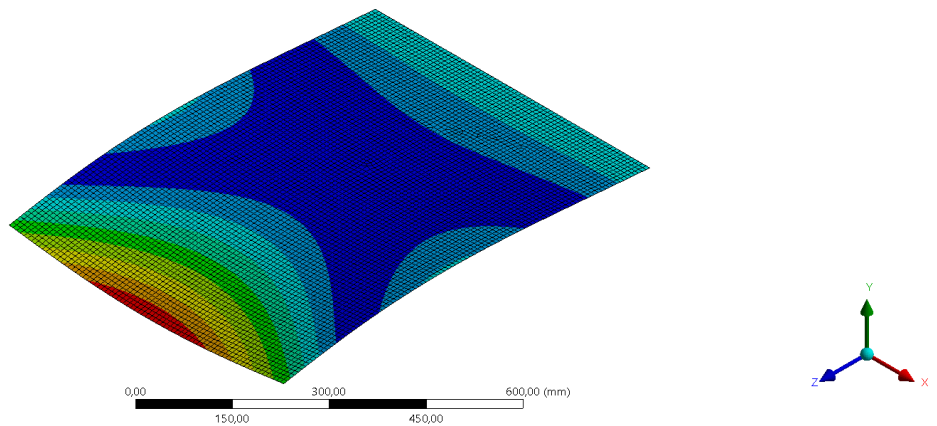


Figura 4.16 Deslocamento máximo da topologia inicial (Autores, 2021)

**F: Static Structural**  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 27/11/2021 20:54

**102,08 Max**  
 90,88  
 79,683  
 68,487  
 57,29  
 46,094  
 34,897  
 23,701  
 12,504  
**1,3078 Min**

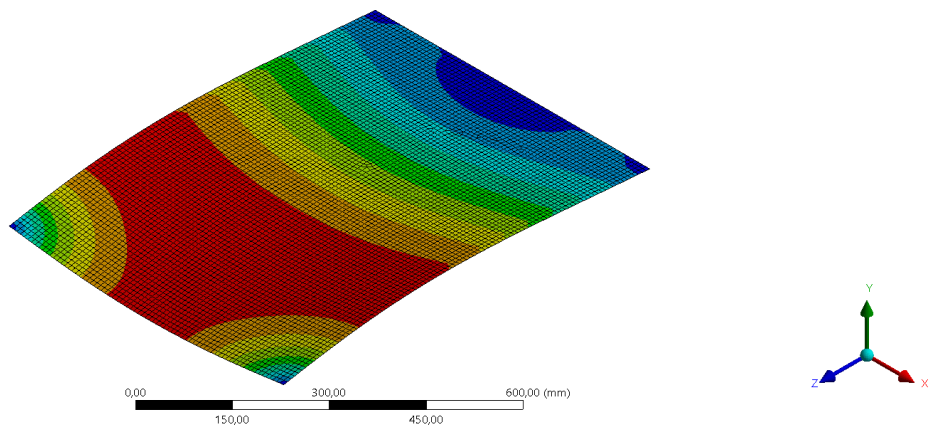


Figura 4.17 Tensão de Von-Mises da topologia inicial (Autores, 2021)

#### 4.2.6. Otimização topológica estática

A otimização que teve como objetivo minimizar a “compliance”, ou seja, a flexibilidade e diminuir em 50% a massa inicial, pode ter suas condições vistas na Figura 4.18, a seguir:

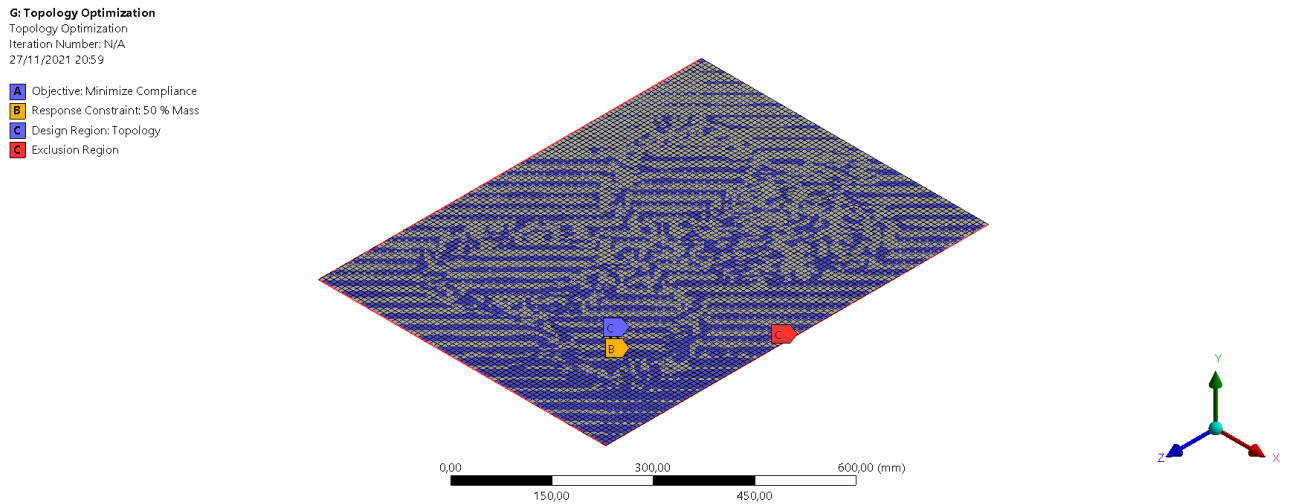


Figura 4.18 Condições de restrição para otimização topológica (Autores, 2021)

Obteve geometria ótima como pode ser visto na Figura 4.19, a seguir:

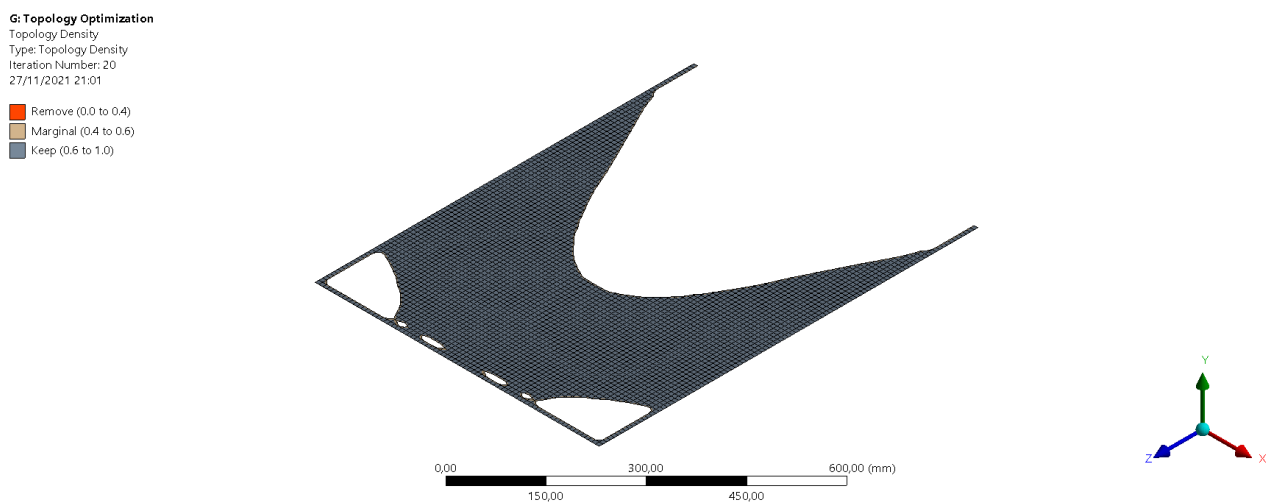


Figura 4.19 Geometria ótima para minimização da flexibilidade (Autores, 2021)

A seguir, foi realizada a análise da geometria ótima em relação ao seu desempenho estrutural ótimo.

#### 4.2.7. Análise estática da topologia de estrutura ótima

Na Figura 4.20, onde vê-se o resultado para o deslocamento total, sendo o máximo de 26,487 mm. Assim, na Figura 4.21, vê-se a tensão de Von-Mises, sendo a máxima de 182,35 MPa.

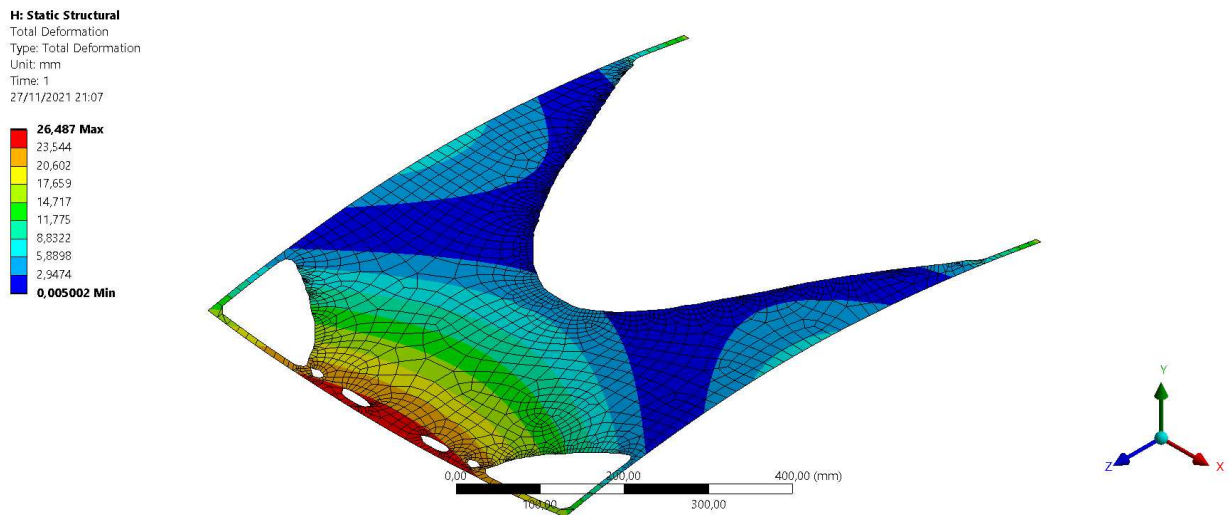


Figura 4.20 Deslocamento máximo da topologia ótima (Autores, 2021)

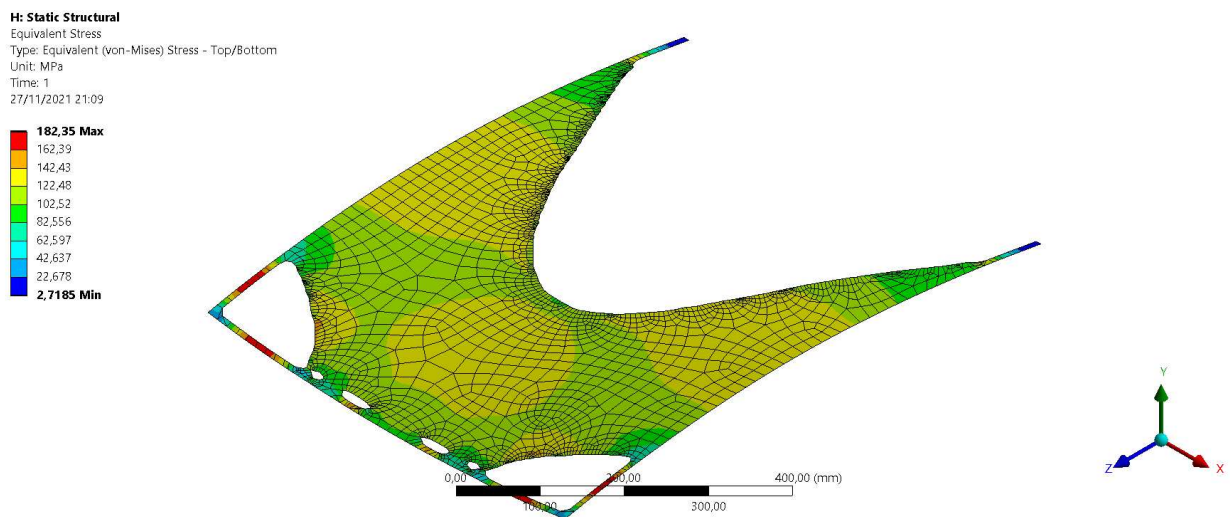


Figura 4.21 Tensão máxima (Von-Mises) (Autores, 2021)

#### 4.2.8. Análise estática de topologia otimizada modal

Por fim, para melhor compreensão do resultado que as otimizações fazem aos objetos, foi realizada a análise estática para identificar o deslocamento e tensões encontradas na topologia que foi otimizada para maximizar a primeira frequência natural (Figura 4.22).

**E: Static Structural**  
Static Structural  
Time: 1, s  
27/11/2021 21:15

**A** Remote Displacement 2  
**B** Force: 1000, N  
**C** Remote Displacement

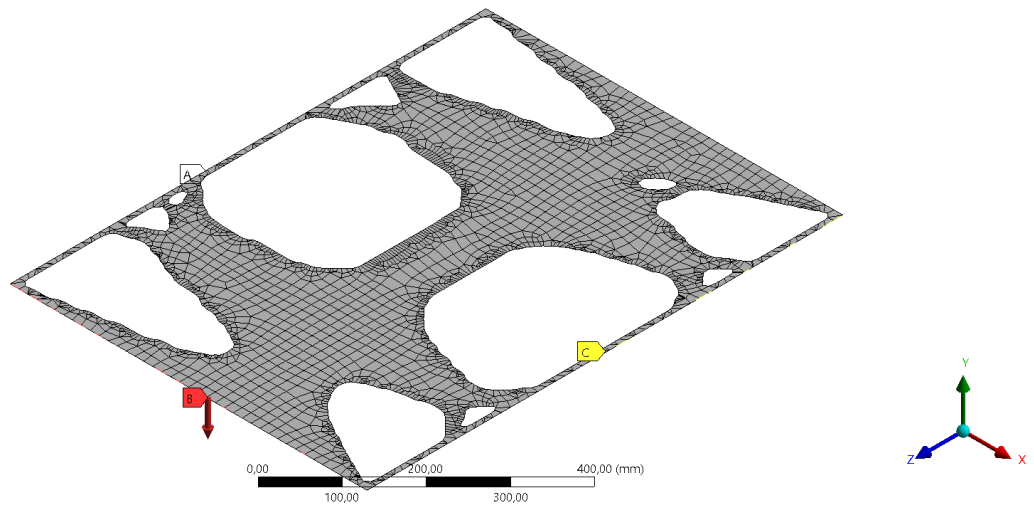


Figura 4.22 Condições de restrição para análise estática (Autores, 2021)

Na figura anterior, é possível identificar as mesmas restrições impostas às análises estáticas anteriores, a fim de uma melhor compreensão da estrutura ótima.

A seguir, vê-se na Figura 4.23, o deslocamento máximo de 89,36 mm, sendo o deslocamento médio de 15,461 mm e na Figura 4.24, a tensão máxima de Von-mises encontrada, sendo ela de 2430,6 MPa, e a média de 170,34 MPa.

**E: Static Structural**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
27/11/2021 21:17

**89,36 Max**  
79,431  
69,502  
59,574  
49,645  
39,716  
29,788  
19,859  
9,9305  
**0,0018231 Min**

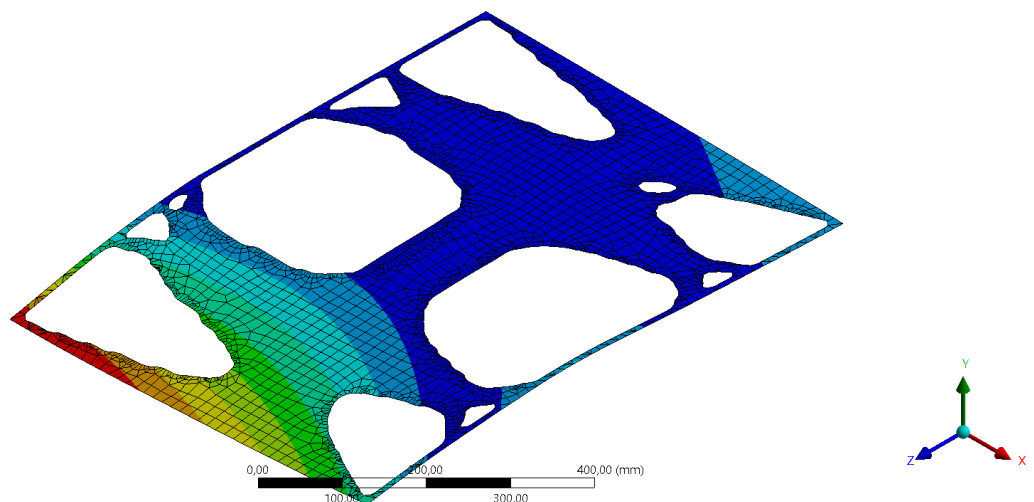


Figura 4.23 Deslocamento máximo da topologia ótima (Autores, 2021)

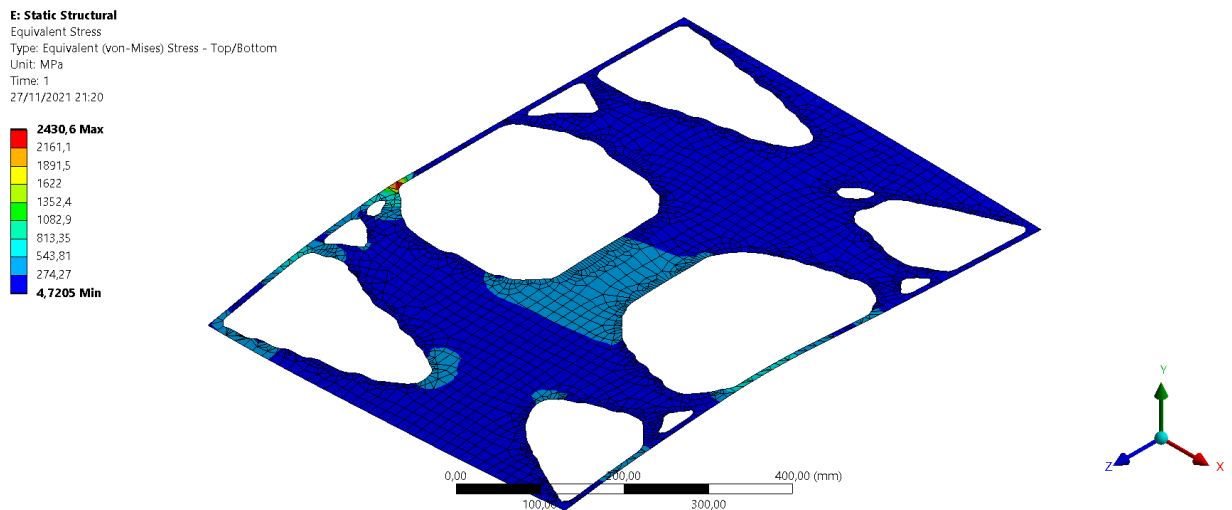


Figura 4.24 Tensão máxima da topologia ótima (Autores, 2021)

### 4.3. Análises da Viga Sólida

#### 4.3.1. Construção do modelo

Para esse objetivo foi escolhido uma geometria do tipo viga, retangular. Como é possível ver na figura 4.6 a seguir, ela deve possuir uma altura de 200 mm, comprimento de 50 mm e 30 mm de largura.

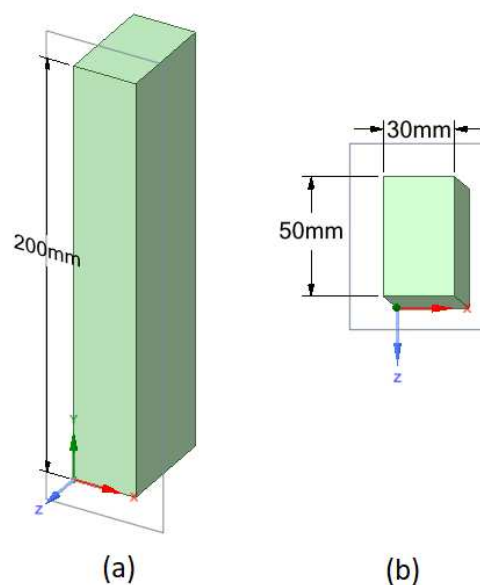


Figura 4.25 Dimensões da geometria inicial (Autores, 2021)

Na figura 4.25 (a), é possível ter uma visão isométrica da peça. Sua altura de 200 mm foi

escolhida por ser o máximo que uma impressora 3D comercial pode alcançar, para fins de impressão. Já na figura 4.25 (b), vista superior, vê-se sua largura e comprimento de 30 e 50 mm, respectivamente.

Como visto na seção “1.4. Otimização topológica”, há a necessidade de serem estabelecidos alguns limites. Para essa análise, as faces inferior e lateral (no comprimento), serão isoladas, como mostra na figura 4.26 em vermelho, a seguir. Dessa maneira, haverá lugar na geometria final para fixação do modelo e dos sensores.

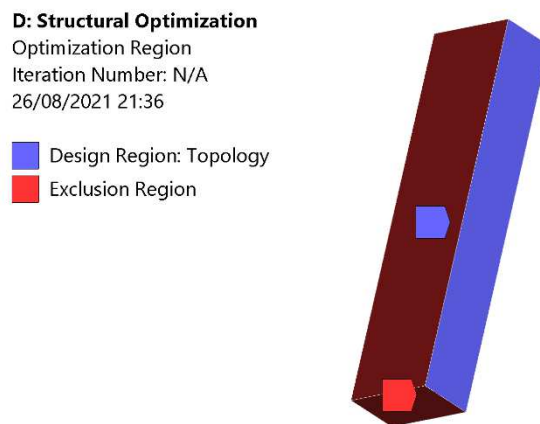


Figura 4.26 Áreas de exclusão (Autores, 2021)

### 4.3.2. Análise Modal Inicial

Na figura 4.27 a seguir, vê-se a deformação gerada à geometria ao ser analisada a sua frequência natural.

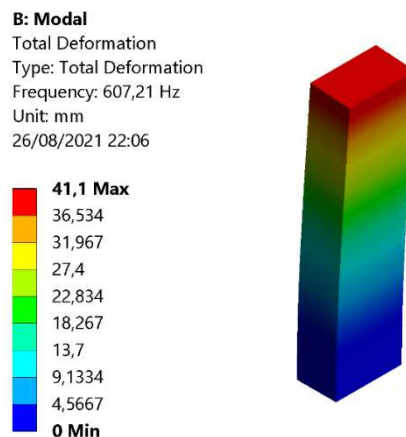


Figura 4.27 Deformação da análise modal na geometria inicial (Autores, 2021)



Para esse estudo, 4 modos de vibração foram solicitados. Podendo ser vistos na Figura 4.28 abaixo a frequência de cada um deles.

|   | Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz] |
|---|------|--|
| 1 | 1.   | 607,21   |
| 2 | 2.   | 980,38   |
| 3 | 3.   | 3243,4   |
| 4 | 4.   | 3467,3   |

Figura 4.28 Frequências naturais do modelo de viga inicial (Autores, 2021)

### 4.3.3. Otimização topológica modal

A geometria ótima gerada pelo ANSYS pode ser vista a seguir (Figura 4.29). Ela teve como objetivo maximizar a frequência natural do primeiro modo de vibração, contendo 20% da massa do modelo original.

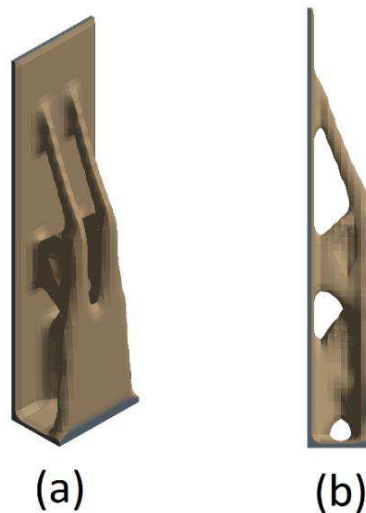


Figura 4.29 Geometria ótima (Autores, 2021)

Essa geometria deve ser aquela responsável por ter maior alcance de amplitude quanto à sua vibração. Dessa maneira, os piezoelétricos posicionados na sua superfície podem gerar mais DDP.



#### 4.3.4. Análise modal da topologia otimizada

Para a análise modal, é possível ver um aumento da frequência natural dos dois primeiros modos de vibração, ao comparar com o modelo inicial. Vê-se na Figura 4.30, a seguir, o resultado da análise modal da geometria ótima.

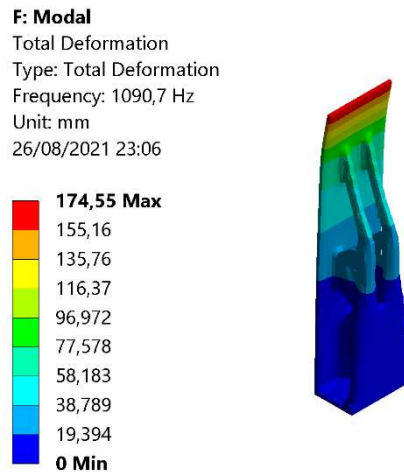


Figura 4.30 Resultado da análise modal para geometria ótima (Autores, 2021)

Para cada um dos dois modos de vibração analisados, suas frequências podem ser vistas abaixo (Figura 4.31):

|   | Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz] |
|---|------|--|
| 1 | 1,   | 1090,7   |
| 2 | 2,   | 1134,  |

Figura 4.31 Frequências naturais dos modos de vibração do modelo otimizado (Autores, 2021)

#### 4.3.5. Análise estática inicial

Na Figura 4.32 a seguir, é possível ver em (a) que o deslocamento máximo pode chegar a 0,11945 mm. E a tensão máxima (von-Mises) pode ter máxima de 37,968 MPa, com média de 7,3951 MPa.

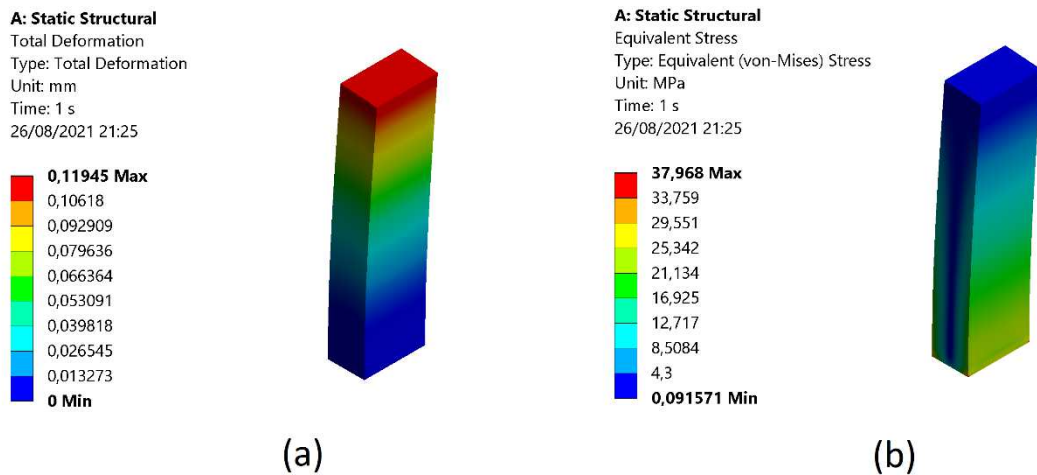


Figura 4.32 Resultados da análise estática na geometria inicial (Autores, 2021)

#### 4.3.6. Otimização topológica estática

A otimização que teve como objetivo minimizar a “compliance”, ou seja, a flexibilidade e diminuir em 50% a massa inicial, obteve geometria ótima como pode ser visto na Figura 4.33, a seguir:

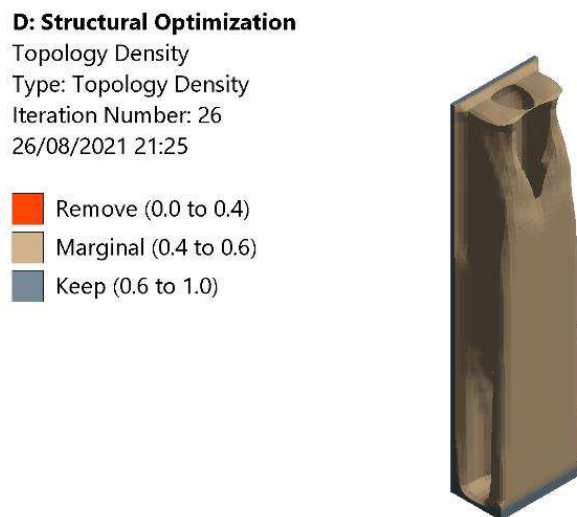


Figura 4.33 Geometria ótima do modelo estático (Autores, 2021)

#### 4.3.7. Análise estática de topologia otimizada modal

Após a geração da geometria ótima de acordo com o objetivo empregado a ela, é necessário

avaliar se os resultados alcançados por ela condizem com o esperado. Para isso foram realizadas análises, estática e modal, na geometria final.

Os resultados encontrados para a análise estática podem ser vistos na Figura 4.34, a seguir:

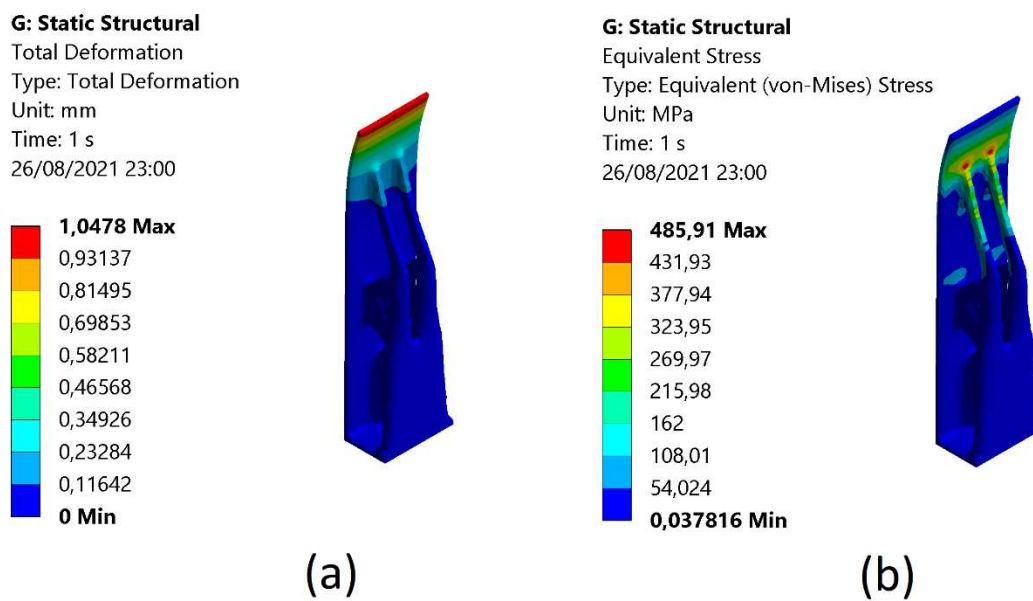


Figura 4.34 Resultados da análise estática na geometria otimizada (Autores, 2021)

Na figura 4.34 (a), onde vê-se o resultado para a deslocamento total, sendo o máximo de 1,0478 mm. Assim, em (b), vê-se a tensão de Von-Mises, sendo a máxima de 485,91 MPa.

#### 4.4. Discussões

Na tabela 4.1, a seguir, vê-se detalhado os resultados obtidos pela análise computacional da chapa.

Tabela 4.1 Resultados das análises computacionais (Autores, 2021)

|                          | MODELO INICIAL | MODELO OTIMIZADO | % CRESCIMENTO | MÉDIA  |
|--------------------------|----------------|------------------|---------------|--------|
| Frequência Natura 1 (Hz) | 16,605         | 19,881           | 19,73%        | 18,10% |
| Frequência Natura 2 (Hz) | 24,916         | 27,033           | 8,50%         |        |
| Frequência Natura 3 (Hz) | 30,801         | 27,36            | -11,17%       |        |

|                           |        |        |        |
|---------------------------|--------|--------|--------|
| Frequência Natural 4 (Hz) | 48,078 | 63,615 | 32,32% |
| Frequência Natural 5 (Hz) | 53,795 | 67,303 | 25,11% |
| Frequência Natural 6 (Hz) | 65,977 | 88,49  | 34,12% |

Vê-se que a primeira otimização, com o objetivo de maximizar a primeira frequência natural, realizou com êxito seu propósito, ao indicar um crescimento de 19,73% entre a primeira frequência natural do modelo inicial e da mesma frequência do modelo otimizado. Para as demais frequências naturais, encontra-se uma média de 18,10% de aumento entre as primeiras frequências naturais de cada modelo. Indicando que a otimização da viga, ao maximizar sua frequência natural, será responsável também por gerar mais energia pelos dispositivos piezoelétricos. Visto que quanto maior é a vibração maior é a geração de energia.

Para as análises das estruturas estáticas, foram encontrados os seguintes resultados (Tabela 4.2):

Tabela 4.2 Resultados das análises estáticas (Autores, 2021)

|                                  | <b>MODELO INICIAL</b> | <b>MODELO ESTRUTURA OTIMIZADA</b> | <b>MODELO FREQUÊNCIA OTIMIZADA</b> |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Deslocamento Máximo (mm)         | 18,398                | 26,487                            | 89,36                              |
| Deslocamento Médio (mm)          | 3,8035                | 8,1884                            | 15,461                             |
| Tensão Mínima de Von-Mises (MPa) | 1,3078                | 2,7185                            | 4,7205                             |
| Tensão Máxima de Von-Mises (MPa) | 102,08                | 182,35                            | 2430,6                             |
| Tensão Média de Von-Mises (MPa)  | 65,035                | 114,75                            | 170,34                             |

Pode-se destacar que a estrutura que houve maior ampliação em relação ao deslocamento máximo e médio foi o modelo otimizado com o objetivo de maximizar a primeira frequência natural. Indicando que o modelo que tem a sua frequência otimizada tem um deslocamento máximo, aproximadamente, 386% maior, em relação ao modelo inicial. O que corrobora como nosso objetivo inicial, visto que quanto maior for o deslocamento da placa maior será a captação e

transformação de energia vibracional em elétrica.

Da mesma maneira ocorre para as Tensões de Von-Mises. O modelo otimizado com o objetivo de maximizar a primeira frequência natural destoa do modelo inicial e do modelo em que a estrutura foi otimizada com o objetivo de minimizar a flexibilidade. Aumentando a tensão máxima em, aproximadamente, 2281% em relação ao modelo inicial e, aproximadamente, 1232% em relação à topologia otimizada com objetivo de minimizar a compliance, ou maximizar a rigidez.

Para o modelo de viga foram encontrados os seguintes resultados (Tabela 4.3):

Tabela 4.3 Resultados computacionais para o modelo de viga (Autores, 2021)

|                         | <b>Deslocamento<br/>(mm)</b> | <b>Tensão Máx.<br/>(MPa)</b> | <b>Frequência<br/>Natural 1 (Hz)</b> | <b>Frequência<br/>Natural 2 (Hz)</b> |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Modelo Inicial</b>   | 0,11945                      | 37,968                       | 607,21                               | 980,38                               |
| <b>Modelo Otimizado</b> | 1,0478                       | 485,91                       | 1090,7                               | 1134                                 |

A análise inclui um crescimento de 79,62% da primeira frequência natural em relação ao valor encontrado no modelo inicial. Corroborando com os resultados encontrados nas análises da chapa.

## 5 CONCLUSÃO

Após estudos e pesquisas preliminares, algumas informações transformam-se em orientação para o projeto. Aqui foi visto o que são e como funcionam os materiais piezoelétricos. E que a partir dele é possível utilizar o conceito de *Energy Harvesting*, que nada mais é do que um sistema que usa a transformação da energia de vibração mecânica em energia elétrica, por meio dos materiais piezoelétricos.

Baseado nesses conceitos foi possível identificar o formato que o modelo tem baseado na sua topologia ótima, que deve ser constituída de uma chapa, onde duas extremidades se encontram fixas, permitindo rotação somente no eixo Z.

A bancada experimental mostrou que as análises computacionais são referências reais e são guias para as análises experimentais, visto que resultados como a frequência da viga em estudo foi similar. Dessa maneira, o objetivo procurado ao se fazer o experimento para realizar testes para a verificação da conversão da energia vibracional mecânica em energia elétrica, foi alcançado com êxito.

Conclui-se, a partir do que foi inferido, que o projeto de investigação e aplicação da otimização topológica na microgeração de energia em *vibrational energy harvesters* alcançou amplamente seus objetivos impostos.

Por fim, é certo que o referido projeto pode ainda ser significativamente explorado para se obter melhor entendimento dos fundamentos e fenômenos relacionados. Acredita-se que por meio dos resultados aqui obtidos através da metodologia aplicada, esta pesquisa se torne uma fonte para melhorar a compreensão na aplicação do energy harvesters utilizando MEMS com o objetivo de otimizar a sua topologia para gerar energia elétrica através da vibração e outros projetos de mesma natureza da comunidade acadêmica desta universidade.

### 5.1. Projetos futuros

O que foi demonstrado nesse relatório é satisfatório visto que expressa como os objetivos para essa etapa do projeto foram alcançados. As pesquisas e coleção dos dados serão verdadeiros

faróis para a próxima etapa do projeto de pesquisa.

Serão eles:

- A construção de protótipos por impressão 3D;
- A averiguação e determinação da melhor distribuição dos dispositivos piezoelétricos para maximização da geração de energia (série, paralelo ou misto);
- A análise de possibilidade de aumento da superfície localizada os piezos para maximização da deformação;
- A realização de testes e ensaios em bancadas apropriadas para a verificação da conversão da energia vibracional mecânica em energia elétrica nos modelos impressos da topologia ótima;
- E por fim a solicitação de patentes do dispositivo após bateria de testes.

## REFERÊNCIAS

- ANDOSCA, R. et al. Experimental and theoretical studies on MEMS piezoelectric vibrational energy harvesters with mass loading. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 178, p. 76–87, 2012.
- CAMPOS, A. V.G. Otimização Topológica Aplicado as Estruturas Cíclicas Simétricas. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2018
- CHALLA, V. R.; CHENG, S.; ARNOLD, D. P. The role of coupling strength in the performance of electrodynamic vibrational energy harvesters. **Smart Materials and Structures**, v. 22, n. 2, 2013.
- CHEN, Z. et al. 3D printing of piezoelectric element for energy focusing and ultrasonic sensing. **Nano Energy**, v. 27, p. 78–86, 2016.
- CHUNG, Y. W. et al. Transformative research issues and opportunities in energy efficiency. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v. 15, n. 1, p. 8–15, 2011.
- GIMENES, Renann. MORIGUCHI, Sergio K. Aplicação de técnicas de otimização topológica via software. **Iniciação científica da Escola de Engenharia Mauá. EMM/CEUN-IMT**. Mauá, SP. 2017.
- HEINICKE, M. Framework for the use of landscaping waste for alternative energy generation. **International Journal of Energy Sector Management**, v. 9, n. 1, p. 57–76, 2015.
- KANKANA PAUL, ANDREAS AMANN, SAIBAL ROY. Tapered nonlinear vibration energy harvester for powering Internet of Things. *Applied Energy*. Volume 283, 2021, 116267, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116267>.
- KIM, K. et al. 3D optical printing of piezoelectric nanoparticle-polymer composite materials. **ACS Nano**, v. 8, n. 10, p. 9799–9806, 2014.
- KULLMANN, C. et al. 3D micro-structures by piezoelectric inkjet printing of gold nanofluids. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 22, n. 5, 2012.
- MELLO, L. A. M.; SALAS, R. A.; SILVA, E. C. N. On response time reduction of electrothermomechanical MEMS using topology optimization. **Computer Methods in Applied**



**Mechanics and Engineering**, v. 247–248, p. 93–102, 2012.

**MEMS micro-speaker, preparation method of MEMS micro-speaker and electronic equipment.** , 2020.

OKAYASU, M. et al. A study of the effects of vibration on the electric power generation properties of lead zirconate titanate piezoelectric ceramic. **Ceramics International**, v. 38, n. 6, p. 4445–4451, 2012.

PERLINGEIRO, Antônio R. PIMENTA, Gilberto M. SILVA, Salviano E. Geração de Energia através de materiais piezoelétricos. Projeto final apresentado ao Departamento de Educação Superior do DEFET/RJ. Rio de Janeiro, 2016.

RANGEL, Renato F. Caracterização de uma célula tubular piezoelétrica para geração de energia elétrica. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB. João Pessoa, 2014.

RAO, Singiresu. *Vibrações Mecânicas*. 4ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SIGMUND, O.; MAUTE, K. Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 48, n. 6, p. 1031–1055, 2013.

TANAKA, T. et al. Rectification Methods to Increase Harvested Energy in Vibration Generation Using Piezoelectric Elements. *Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)*, v. 199, n. 3, p. 68–79, 2017.

TODARO, M. T. et al. Piezoelectric MEMS vibrational energy harvesters: Advances and outlook. *Microelectronic Engineering*, v. 183–184, p. 23–36, 2017.

Topology Weight & Load Optimization Software | Ansys. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/structures/topology-optimization>>. Acesso em: 28 maio. 2020.

TSUCHIYA, H. et al. Rectification Methods to Increase Harvested Energy in Vibration Generation Using Piezoelectric Elements. *Advances in Acoustics and Vibration*, v. 22, n. 4, p. 8–15, 2012.

TSUCHIYA, H.; MORIYAMA, H.; IWAMORI, S. Electricity Generation Characteristics of Energy-Harvesting System with Piezoelectric Element Using Mechanical-Acoustic Coupling.

Advances in Acoustics and Vibration, v. 2016, 2016.

USINAINFO. Ponte Retificadora. c2021. Disponível em: < <https://www.usinainfo.com.br/ponte-retificadora-459>> Acesso em: 09/12/2021.