



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA

GABRIEL AMARAL TAVARES

COLETA DE ENERGIA EM TECLADO DE NOTEBOOK UTILIZANDO
TECNOLOGIA MEMS

BELÉM
2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
GABRIEL AMARAL TAVARES

**COLETA DE ENERGIA EM TECLADO DE NOTEBOOK UTILIZANDO
TECNOLOGIA MEMS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues.

BELÉM
2026

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

A485c Amaral Tavares, Gabriel.
 COLETA DE ENERGIA EM TECLADO DE NOTEBOOK
 UTILIZANDO TECNOLOGIA MEMS / Gabriel Amaral Tavares.
 — 2026.
 69 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues
 Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
 Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Belém,
 2026.

 1. COLETA DE ENERGIA. 2. MEMS
 PIEZOELÉTRICO. 3. MICROCANTILEVER. 4. TECLADO
 DE NOTEBOOK. I. Título.

CDD 621.381


GABRIEL AMARAL TAVARES

**COLETA DE ENERGIA EM TECLADO DE NOTEBOOK UTILIZANDO
TECNOLOGIA MEMS**


Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Elétrica da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Data da aprovação: 25/02/2026


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ROBERTO MENEZES RODRIGUES**
Data: 27/02/2026 14:31:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues
Orientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente
 **NILTON RODOLFO NASCIMENTO MELO RODRIGUES**
Data: 05/03/2026 14:05:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Nilton Rodolfo Nascimento Melo Rodrigues
Membro (UFPA)

Documento assinado digitalmente
 **GILVAN SOARES BORGES**
Data: 01/03/2026 21:45:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gilvan Soares Borges
Membro Externo (UFPA)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ser a força e o guia em todos os momentos desta caminhada, permitindo-me superar os desafios e concluir esta etapa fundamental da minha vida.

Dedico este trabalho à memória de meus avós paternos, José Raimundo Tavares e Maria Amélia da Silva, cujas raízes e apoio incondicional à minha educação floresceram nesta conquista. Aos meus pais, Sérgio Augusto Tavares e Regina Célia Amaral, exemplos de renúncia e dedicação, que não mediram esforços para transformar meus sonhos em realidade. À minha avó materna, Maria Francisca Amaral, por todo o carinho, orações e por ser uma presença constante e motivadora em minha vida. À minha tia, Beatriz Amaral, pedagoga e profissional do ensino, cujo exemplo de dedicação à educação e orientações foram fundamentais para o meu crescimento intelectual e para a compreensão da importância do saber.

Ao meu irmão, Lucas Amaral Tavares, pela amizade e por estar ao meu lado em todas as fases desta jornada.

À minha namorada e companheira, Ewellin Borges, pelo apoio incondicional, pela paciência nos momentos de abdicção e por acreditar no meu potencial mesmo nos dias mais difíceis.

Aos meus familiares, que de diversas formas apoiaram meus estudos e torceram pelo meu sucesso, compreendendo as ausências necessárias para a realização deste trabalho.

Ao meu professor e orientador, Dr. Roberto Menezes Rodrigues, pela excelência na condução deste trabalho, pela paciência e pelo compartilhamento de seus vastos conhecimentos. Sua precisa orientação e o incentivo constante foram fundamentais para o amadurecimento desta pesquisa e para a minha formação acadêmica.

À Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao corpo docente do curso, pelos ensinamentos transmitidos e pela oportunidade de formação em uma instituição de excelência. A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este projeto se tornasse realidade.

"A caneta é a espada do homem livre; a educação é a logística que sustenta a vitória em qualquer fronteira do conhecimento."

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo e a modelagem de um sistema de coleta de energia vibracional baseado em uma matriz de microcantilevers piezoelétricos em tecnologia MEMS, projetado para converter a energia mecânica residual da digitalização em eletricidade. O diferencial da solução reside na sua integração à área de 49 cm² adjacente ao touchpad de um notebook, o que permite o aproveitamento das vibrações transmitidas pela carcaça sem a necessidade de modificações no mecanismo interno das teclas. Essa abordagem garante a total preservação da ergonomia e da sensação tátil original do teclado, superando limitações de soluções invasivas relatadas na literatura. Por meio de simulações numéricas via Método dos Elementos Finitos (FEM), o dispositivo foi sintonizado para uma frequência de ressonância de 237 Hz. Os resultados indicam que uma matriz de 70 dispositivos é capaz de gerar uma potência média de 3,3 μ W e um acúmulo de energia diária de 8,87 mJ, valores suficientes para sustentar subsistemas de baixo consumo, como sensores de monitoramento e circuitos de relógio de tempo real (RTC). Conclui-se que o sistema proposto concilia eficiência na microgeração de energia com a manutenção da integridade funcional e ergonômica do dispositivo portátil.

Palavras-chave: Coleta de energia, MEMS Piezoelétrico, Microcantilever, Teclado de Notebook.

ABSTRACT

This work presents the study and modeling of a vibrational energy harvesting system based on an array of piezoelectric microcantilevers fabricated in MEMS technology, designed to convert residual mechanical energy from typing into electrical power. The main contribution of the proposed solution is its integration into a 49 cm² area adjacent to a laptop touchpad, enabling the harvesting of vibrations transmitted through the chassis without requiring modifications to the internal key mechanisms. This approach preserves the keyboard's original ergonomics and tactile feedback, overcoming limitations reported in the literature for invasive solutions. Numerical simulations using the Finite Element Method (FEM) were employed to tune the device to a resonance frequency of 237 Hz. Results indicate that an array of 70 devices can generate an average power of 3.3 μ W and a daily accumulated energy of 8.87 mJ, which are sufficient to sustain ultra-low-power subsystems such as monitoring sensors and real-time clock (RTC) circuits. It is concluded that the proposed system reconciles effective micro-scale energy generation with the maintenance of the functional and ergonomic integrity of portable devices.

Keywords: Energy harvesting; Piezoelectric MEMS, Microcantilever; Notebook Keyword.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação esquemática de mecânicas típicas em dispositivos MEMS.....	20
Figura 2 - Comparativo entre os processos de microusinagem	21
Figura 3 - Modos de Operação	24
Figura 4 - Sistema massa-mola-amortecedor excitado harmonicamente.	26
Figura 5 -Representação da área de integração	29
Figura 6 - Representação geométrica e estrutural do microcantilever piezoelétrico.....	34
Figura 7 - Sistema massa–mola–amortecedor (1-DOF) com excitação na base	35
Figura 8 – Domínio e malha do microcantilever (representação esquemática)	38
Figura 9 – Condições de contorno e terminais elétricos (esquemático).....	39
Figura 10 – Ilustração da matriz de 70 microcoletores piezoelétricos na configuração 10×7 e esquemático de roteamento elétrico.	41
Figura 11 - Modelo tridimensional do microcantilever.....	46
Figura 12 - Espectro de frequências naturais e formas modais de vibração para os três primeiros modos de flexão do microcantilever	47
Figura 13 – Distribuição de equivalentes de Von Mises no microcantilever operando na frequência de ressonância de 237 Hz.	49
Figura 14 – Perfil de deslocamento transversal e forma modal do microcantilever em ressonância (34,7 μm).	50
Figura 15 - – Curva ilustrativa de resposta em frequência da tensão RMS entre os eletrodos (100–500 Hz), com destaque para o pico em 237 Hz.....	51
Figura 16 - – Forma de onda temporal ilustrativa da tensão na ressonância.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões de referência do microcantilever	34
Tabela 2 - Comparação com diferentes perfis de usuários	54
Tabela 3 - Comparação em nível de dispositivo individual	54
Tabela 4 - Comparação em nível de Matriz	55
Tabela 5 - Comparação qualitativa e técnica entre métodos	56
Tabela 6 – Comparativo de viabilidade energética por perfil de usuário	58

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Roteiro de Modelagem e simulação multifísica no Comsol Multiphysics	65
--	----

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
1.1 INTRODUÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 CONCEITOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA	18
2.2 MICROELETROMECAÂNICA (MEMS).....	18
2.3 EFEITO PIEZOELÉTRICO E MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS	21
2.4 COLETORES DE ENERGIA VIBRACIONAIS PIEZOELÉTRICOS	23
2.5 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM TECLADOS DE NOTEBOOKS	28
2.6 REVISÃO DE ESTUDOS SOBRE GERAÇÃO DE ENERGIA EM TECLADOS	29
2.7 ANÁLISE CRÍTICA E LACUNAS NA LITERATURA.....	30
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	32
3.1 CONCEPÇÃO E DESIGN DO MICROCANTILEVER	32
3.2 MÉTODOS ANALÍTICOS DE PROJETO	34
3.3 MODELAGEM NUMÉRICA (FEM).....	37
3.4 CONFIGURAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO ARRANJO	39
3.4.1 ANÁLISE PARA SELEÇÃO DO NÚMERO DE DISPOSITIVOS.....	40
3.5 MÉTRICAS DE VALIDAÇÃO E DESEMPENHO	41
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO FEM.....	45
4.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO COLHEDOR PROPOSTO	52
4.3 COMPARAÇÃO COM DADOS DA LITERATURA	54

4.4 IMPLICAÇÕES PARA A APLICAÇÃO EM TECLADOS.....	56
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	60
5.1. CONCLUSÕES.....	60
5.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO	60
5.3. TRABALHOS FUTUROS.....	61

CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente por energia elétrica, aliada à necessidade de redução dos impactos ambientais, tem impulsionado de forma significativa o emprego de fontes renováveis e de soluções mais eficientes para a geração e o uso de energia. Historicamente, o foco da matriz energética concentrou-se na geração em escala macro, baseada em grandes centrais hidrelétricas, térmicas ou parques eólicos destinados ao abastecimento de redes de distribuição (YANG et al., 2014; REN21, 2023). Entretanto, a evolução tecnológica recente deslocou parte desse interesse para a geração em escala micro, impulsionada pelo aumento expressivo no número de dispositivos eletrônicos de baixo consumo, tais como sensores, dispositivos vestíveis e sistemas associados à Internet das Coisas (IoT), os quais são frequentemente alimentados por baterias de difícil acesso ou substituição (PARADISO; STARNER, 2005). Nesse contexto, a coleta de energia (*energy harvesting*) consolida-se como uma alternativa estratégica fundamental, definida como o processo de captura de pequenas quantidades de energia proveniente de fontes residuais do ambiente — como vibrações, calor ou luz — e sua conversão em eletricidade útil. A investigação de métodos de microgeração torna-se, portanto, pertinente não apenas para prolongar a vida útil das baterias, mas, idealmente, para promover a autossuficiência desses sistemas energéticos, reduzindo a dependência de fontes químicas finitas e mitigando os impactos logísticos e ambientais de sua manutenção.

Entre as alternativas estudadas, destaca-se a coleta de energia em pequena escala, que surge como estratégia para complementar ou, em determinadas situações, substituir baterias, ao aproveitar fontes de energia já disponíveis no ambiente, como luz, gradientes térmicos ou vibrações mecânicas (VULLERS et al., 2009). Dentre essas fontes, a conversão de vibrações em energia elétrica por meio de dispositivos piezoelétricos tem se revelado particularmente promissora para a alimentação de sistemas de baixo consumo, desde que se disponha de uma fonte recorrente de excitação mecânica (PRIYA e INMAN, 2009).

Nesse âmbito, a tecnologia de Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) assume papel relevante, uma vez que possibilita a integração de estruturas mecânicas em escala micrométrica com componentes eletrônicos, utilizando processos consolidados da indústria de semicondutores (HUANG et al., 2019). É importante ressaltar que, a priori, os dispositivos MEMS não foram concebidos com o propósito primário de coleta de energia; sua gênese e

evolução resultaram no desenvolvimento de sensores e atuadores para diversos fins, como acelerômetros, giroscópios e transdutores de pressão. Entretanto, em virtude de suas propriedades mecânicas desenvolvidas e da capacidade de miniaturização, essa tecnologia passou a ser explorada mais recentemente também para fins de microgeração energética. Tal plataforma viabiliza o desenvolvimento de microgeradores piezoelétricos compactos, reproduzíveis e ambientalmente viáveis para fabricação em larga escala, a exemplo de microcantilevers piezoelétricos específicos para operar em regime vibracional. Esses dispositivos caracterizam-se por dimensões reduzidas, elevada razão área/volume, possibilidade de operação em altas frequências e potencial de integração com circuitos eletrônicos elétricos, o que favorece a miniaturização e a redução de custos por unidade produzida.

Entre as potenciais fontes de vibração exploráveis por esses dispositivos, destacam-se teclados de determinados modelos de notebooks que constituem uma interface de uso intensivo ou moderado, dependendo do usuário que utiliza. A cada acionamento de tecla, ocorrem deformações e impactos mecânicos, cuja energia associada, usualmente dissipada, pode ser parcialmente convertida em eletricidade por meio de transdutores adequados. Resultados reportados na literatura indicam que é possível obter níveis de potência da ordem de microwatts por tecla, a depender da arquitetura do sistema (BEKER et al., 2012), valores que podem ser suficientes para aplicações específicas de sensoriamento e monitoramento do próprio dispositivo.

Diante desse contexto, formula-se a seguinte questão central: a utilização de um conjunto de microcantilevers piezoelétricos instalados nessa região é capaz de colher energia mecânica proveniente da digitação em níveis compatíveis com aplicações de baixo consumo de energia? O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem, portanto, como objetivo analisar essa possibilidade, por meio de revisão bibliográfica e de avaliação das ordens de grandeza envolvidas bem como por meio da concepção de um arranjo de microcantilevers adequado ao contexto de teclados desses modelos de notebooks.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral investigar o potencial de um sistema de coleta de energia vibracional piezoelétrica, baseado em uma matriz de microcantilevers piezoelétricos em tecnologia MEMS, integrada à área de 49 cm² localizada ao lado do touchpad

de um notebook, de modo a aproveitar as vibrações geradas durante a digitação em seu teclado para cargas a serem alimentadas de baixo consumo de potência. Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento e revisão da literatura sobre técnicas de geração de energia em pequena escala, dispositivos microeletromecânicos (MEMS), efeito piezoelétrico e coletores de energia vibracionais piezoelétricos, com ênfase em microcantilevers utilizados para coleta de energia;
- Propor a geometria e as configurações construtivas de um microcantilever piezoelétrico em tecnologia MEMS adequada à faixa de frequências associadas às vibrações geradas durante a digitação em teclados de notebooks;
- Desenvolver e implementar um modelo numérico do microcantilever piezoelétrico, utilizando o método dos elementos finitos (FEM) a fim de determinar sua frequência de ressonância, distribuição de tensões mecânicas e resposta elétrica sob condições de compatibilidade com o uso desse notebook;
- Estimar a potência e a energia elétrica gerada tanto por um microcantilever individual quanto por uma matriz de dispositivos ocupando a área adjacente ao touchpad, considerando diferentes cenários de uso do teclado (padrões de digitação);
- Comparar os resultados obtidos com dados de trabalhos relacionados à literatura e discutir as implicações práticas da aplicação do sistema proposto em teclados de notebooks.

1.3 JUSTIFICATIVA

A relevância deste trabalho fundamenta-se na necessidade de soluções energéticas autônomas para uma crescente gama de dispositivos portáteis, conectados e distribuídos em uma área extensa, nos quais a dependência de baterias convencionais limita a mobilidade, a vida útil, a confiabilidade de operação e substituição, quando necessário. Embora a coleta de energia vibracional já constitua um campo consolidado de pesquisa, sua aplicação em interfaces de interação humana, como teclados de notebooks, ainda carece de investigações que explorem o aproveitamento sistemático de vibrações mecânicas para a alimentação de periféricos. A transição do uso de MEMS como meros sensores para sua aplicação como microgeradores em dispositivos de uso cotidiano representa uma oportunidade para melhoria do gerenciamento de energia de sistemas portáteis. Ao converter o esforço mecânico da digitação em eletricidade, é

possível estabelecer uma camada de autonomia para funções auxiliares do hardware, mitigando a demanda sobre a bateria principal sem interferir na experiência do usuário.

A escolha por um arranjo de microcantilevers piezoelétricos em tecnologia MEMS posicionado na área lateral ao touchpad justifica-se pelos seguintes fatores:

- Inovação na integração estrutural: diferente de abordagens que exigem modificações no mecanismo interno das teclas (BEKER et al., 2012), com impacto potencial na ergonomia e na complexidade de fabricação, o aproveitamento de uma região estruturalmente próxima ao teclado, porém normalmente ociosa, permite explorar as vibrações transmitidas pela carcaça sem alterar a experiência de digitação;
- Viabilidade para sistemas de baixo consumo: mesmo que a energia coletada não seja suficiente para alimentar a carga principal do dispositivo, os níveis de potência esperados são compatíveis com a alimentação de sensores ambientais, acelerômetros, circuitos de monitoramento e módulos de comunicação de curto alcance operando de forma intermitente, reduzindo a demanda direta sobre a bateria principal;
- Contribuição para soluções mais autônomas e sustentáveis: ao transformar em eletricidade útil parte da energia mecânica normalmente dissipada durante a digitação, o sistema proposto alinha-se às tendências de desenvolvimento de dispositivos mais eficientes, com maior grau de autonomia e uso mais racional de recursos energéticos.

Dessa forma, o estudo tenta preencher uma lacuna na literatura ao analisar de maneira sistemática o potencial de coleta de energia em uma região específica do chassi de notebooks, unindo a precisão de modelagem viabilizada pela tecnologia MEMS à aplicação prática em dispositivos comerciais, com foco em subsistemas de baixo consumo de potência.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O restante desse Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1: apresenta o contexto geral da geração de energia em escala macro e micro, introduz o conceito de coleta de energia vibracional piezoelétrica aplicada a teclados de notebooks e delimita o problema de pesquisa. São estabelecidos os objetivos do trabalho, justificada a sua realização e descrita a organização do texto.
- Capítulo 2: reúne os conceitos fundamentais necessários à compreensão do tema, incluindo revisão sobre geração de energia, fundamentos de tecnologia MEMS, efeito

piezoelétrico e materiais piezoelétricos. Apresenta os princípios de funcionamento de coletores de energia vibracionais piezoelétricos, aspectos de modelagem analítica e desempenho, além de considerações sobre vibrações em teclados de notebooks e revisão de estudos sobre geração de energia em teclados e sobre o uso de microcantilevers piezoelétricos para coleta de energia.

- Capítulo 3: descreve a abordagem proposta para o estudo de previsões, incluindo a concepção do arranjo de microcantilevers piezoelétricos, os procedimentos de simulação por elementos finitos (FEM), as configurações adotadas, os critérios de avaliação e a análise de aplicação na área de 49 cm² ao lado do touchpad.
- Capítulo 4: apresenta e analisa os resultados obtidos com base na metodologia proposta, discutindo o desempenho do coletor de energia proposto e comparando-o, quando possível, com dados da literatura, bem como as implicações dos resultados para a aplicação em teclados de notebooks.
- Capítulo 5: sintetiza as principais conclusões do estudo, destacando as contribuições alcançadas e as limitações identificadas. São apresentadas sugestões para trabalhos futuros, incluindo extensões de modelagem, estudos experimentais e possíveis estratégias de integração prática em equipamentos comerciais.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais necessários à compreensão do tema proposto, abordando desde os princípios gerais de geração de energia até aspectos específicos da tecnologia MEMS, do efeito piezoelétrico e de coletores de energia vibracionais. Além disso, são revisados trabalhos relevantes da literatura sobre coleta de energia em microcantilevers piezoelétricos, identificando lacunas e oportunidades de investigação.

2.1 CONCEITOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A geração de energia elétrica pode ser realizada por meio de diferentes princípios físicos e em escalas que variam desde grandes usinas até dispositivos em escala micrométrica. Historicamente, a geração em larga escala baseia-se na conversão de energia mecânica, térmica, química ou nuclear em energia elétrica, utilizando turbinas, geradores e outros equipamentos de grande porte (MACHADO et al., 2015). As fontes renováveis, como a solar fotovoltaica e a eólica, ganharam destaque nas últimas décadas devido às preocupações ambientais e à busca pela diversificação da matriz energética (REN21, 2023).

Em contraste com essa perspectiva macroscópica, a coleta de energia em pequena escala busca aproveitar fontes energéticas disponíveis localmente para alimentar dispositivos de baixo consumo. Esse conceito é particularmente relevante em aplicações onde a substituição de baterias é inconveniente ou economicamente inviável, como em redes de sensores sem fio, dispositivos vestíveis e sistemas embarcados (STARNER, 2005).

As principais fontes de energia exploradas em captação de energia em baixa escala incluem luz (fotovoltaica), gradientes térmicos (termoelétricos), ondas eletromagnéticas (coleta de RF) e vibrações mecânicas. A conversão de vibrações mecânicas em energia elétrica pode ser realizada por meio de três mecanismos principais: eletromagnético, eletrostático e piezoelétrico (ROUNDY, 2005). O mecanismo piezoelétrico se destaca pela elevada densidade de energia, simplicidade estrutural e compatibilidade com processos de microfabricação, sendo amplamente empregado para aplicações em microescala (PRIYA e INMAN, 2009).

2.2 MICROELETROMECHANICA (MEMS)

A tecnologia de Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) teve origem no desenvolvimento de técnicas de microfabricação da indústria de semicondutores, nas décadas

de 1960 e 1970. Inicialmente, essas técnicas foram aplicadas à criação de sensores de pressão e acelerômetros em silício, aproveitando processos já propostos para a fabricação de circuitos integrados (Senturia, 2002).

Ao longo das décadas seguintes, a tecnologia MEMS expandiu-se para uma ampla gama de aplicações, incluindo giroscópios, microbombas, microespelhos, dispositivos de radiofrequência e, mais recentemente, coletores de energia vibracional (GARDNER et al., 2001). A evolução dos processos de fabricação envolveu a integração de componentes mecânicos, elétricos e, em alguns casos, ópticos e fluídicos em uma mesma plataforma, viabilizando dispositivos cada vez mais compactos e multifuncionais (HUANG et al., 2019).

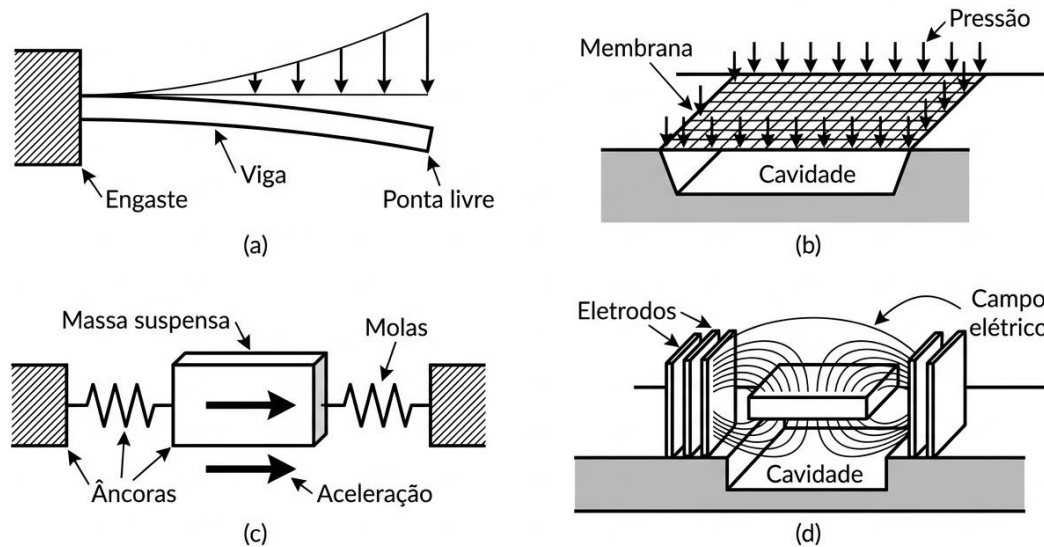
Atualmente, os dispositivos MEMS estão presentes em produtos de consumo, como smartphones, tablets, automóveis e equipamentos médicos, impulsionando um mercado em constante crescimento (BOGUE, 2013). A tendência de miniaturização e a demanda por dispositivos independentes têm motivado o desenvolvimento de MEMS para aplicações em Internet das Coisas (IoT) e redes de sensores sem fio.

2.2.1 Princípios de Funcionamento

Os dispositivos MEMS baseiam-se na integração de estruturas mecânicas em escala micrométrica com componentes eletrônicos, utilizando substratos de silício ou outros materiais semicondutores. As estruturas mecânicas podem incluir vigas, membranas, massas suspensas e cavidades, projetadas para responder a estímulos externos, como pressão, aceleração, temperatura ou campos elétricos (KOVACS, 1998).

O funcionamento de um dispositivo MEMS depende do princípio físico explorado. Em sensores capacitivos, por exemplo, a variação de capacitância devido ao deslocamento de uma estrutura móvel é convertida em sinal elétrico. Em dispositivos piezoelétricos, a deformação mecânica de um material piezoelétrico gera cargas elétricas que podem ser coletadas por eletrodos (UCHINO, 2015).

Figura 1- Representação esquemática de mecânicas típicas em dispositivos MEMS: (a) Viga (cantilever); (b) Membrana (diafragma); (c) Massa suspensa com molas; (d) Cavidade + ponte com eletrodos



Fonte: Elaboração própria (2026), com base em Kovacs (1998), Senturia (2002).

A miniaturização oferece vantagens significativas, como redução de massa, aumento da frequência de ressonância e possibilidade de fabricação em larga escala com custos reduzidos. No entanto, também impõe desafios, como o aumento da influência de forças de superfície, efeitos de amortecimento e limitações de deslocamento mecânico (SENTURIA, 2002).

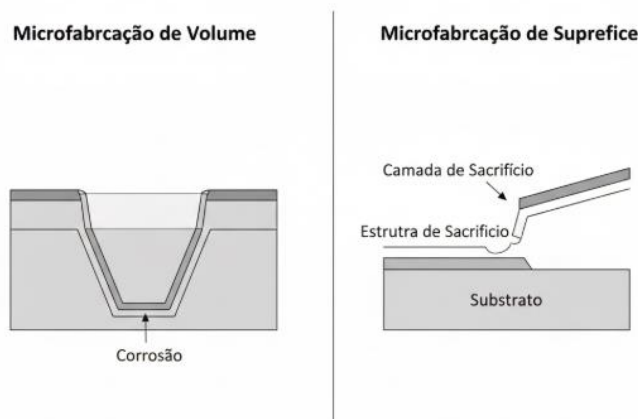
2.2.2 Processos de Fabricação

A fabricação de dispositivos MEMS utiliza técnicas adaptadas da indústria de semicondutores, as quais são definidas em duas categorias principais: processos de volume (microusinagem em massa) e processos de superfície (microusinagem de superfície) (GHODSSI e LIN, 2011). Conforme ilustrado na Figura 1, a representação esquemática das mecânicas típicas demonstra a complexidade dessas estruturas em escala micrométrica. Uma distinção fundamental entre os métodos de fabricação pode ser vista no comparativo apresentado na Figura 2, que destaca a remoção selecionada de material no substrato em contraste com a deposição de camadas estruturais e sacrificiais).

Na microusinagem de volume, estruturas tridimensionais são criadas pela remoção seletiva de material do substrato, utilizando técnicas de corrosão úmida ou seca. Esse processo é adequado para a fabricação de estruturas robustas, como membranas e cantilevers espessos. Na microusinagem de superfície, por sua vez, camadas finas de materiais estruturais e sacrificiais são depositadas e padronizadas sobre o substrato. Após a remoção das camadas

sacrificiais, estruturas suspensas ou móveis são liberadas, permitindo maior flexibilidade de projeto em dispositivos como acelerômetros, giroscópios e microespelhos.

Figura 2 - Comparativo entre os processos de microusinagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Kovacs (1998), Senturia (2002)

A viabilização prática dessas estruturas ocorre frequentemente por meio de processos comerciais padronizados, como o PiezoMUMPS (Piezoelectric Multi-User MEMS Processes). O PiezoMUMPS é um processo padronizado de fabricação de MEMS piezoelétricos do tipo multiusuário (multi-project wafer), no qual diferentes projetistas compartilham uma mesma rodada de fabricação, seguindo uma pilha de camadas e regras de projeto predefinidas. Esse processo é oferecido pela MEMSCAP, uma empresa especializada em foundry de MEMS, que disponibiliza infraestrutura industrial para prototipagem e produção em pequena e média escala. Essa combinação permite a fabricação de dispositivos piezoelétricos em escala de protótipo com custos reduzidos e boa reprodutibilidade (COWEN et al., 2014).

2.3 EFEITO PIEZOELÉTRICO E MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

O efeito piezoelétrico consiste na geração de carga elétrica em determinados materiais quando submetidos a tensões mecânicas e, inversamente, na deformação mecânica desses materiais quando submetidos a um campo elétrico. Esse fenômeno foi descoberto pelos irmãos Pierre e Jacques Curie em 1880 e tem sido amplamente explorado em aplicações de sensoriamento e atuação (JAFFE et al., 1971).

Em termos constitutivos, o comportamento piezoelétrico linear pode ser descrito, em uma de suas formas, pelas seguintes equações:

Efeito direto:

$$D_i = d_{ij} \sigma_j + \varepsilon_{ij} E_j \quad (2.1)$$

Efeito inverso:

$$S_i = s^{Eij} \sigma_j + d_{ki} E_k \quad (2.2)$$

Onde D_i é o vetor de deslocamento elétrico, σ_j é o tensor de tensão mecânica, ε_{ij} é a permissividade dielétrica, E_j é o campo elétrico, S_i o tensor de deformação, d_{ij} são os coeficientes piezoelétricos e s^{Eij} é a matriz de conformidade mecânica sob campo elétrico constante.

2.3.1 Materiais Comuns e suas Propriedades

Diversos materiais apresentam efeito piezoelétrico, com destaque para: cristais naturais, como quartzo e turmalina; cerâmicas ferroelétricas, como o PZT (zirconato-titanato de chumbo) em diferentes composições; materiais livres de chumbo, como NaNbO_3 e KNN (K,Na)NbO_3 ; e filmes finos para MEMS, tais como PZT depositado por sol-gel ou sputtering, AlN (nitreto de alumínio) e ZnO (óxido de zinco). Para aplicações em coleta de energia, cerâmicas como o PZT-5H são amplamente utilizadas devido aos seus altos coeficientes piezoelétricos (por exemplo, d_{31} e d_{33} elevados), à elevada permissividade dielétrica e à boa resposta em faixas de frequência típicas de vibração ambiental. Em contrapartida, materiais como o AlN apresentam desempenho piezoelétrico inferior, porém oferecem melhor compatibilidade com processos CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). A tecnologia CMOS constitui o padrão da indústria para a fabricação de circuitos integrados e microprocessadores; assim, a compatibilidade do material piezoelétrico com processos CMOS facilita a integração monolítica de transdutores e circuitos de condicionamento em uma mesma pastilha de silício.

A escolha do material piezoelétrico em aplicações MEMS envolve, portanto, um compromisso principalmente entre: desempenho (coeficientes, constante de acoplamento eletromecânico e fator de qualidade); compatibilidade de processo (temperaturas de deposição, integração com o substrato de silício e com metalizações); e confiabilidade mecânica (resistência, fadiga e aderência entre camadas).

Neste contexto, a opção pelo PZT-5H neste trabalho se justifica sobretudo pelo seu desempenho eletromecânico superior e pela ampla utilização reportada na literatura em aplicações de coleta de energia em MEMS, o que fornece uma base consistente de parâmetros e resultados de referência para o dimensionamento e a análise dos microcantilevers piezoelétricos considerados.

2.4 COLETORES DE ENERGIA VIBRACIONAIS PIEZOELÉTRICOS

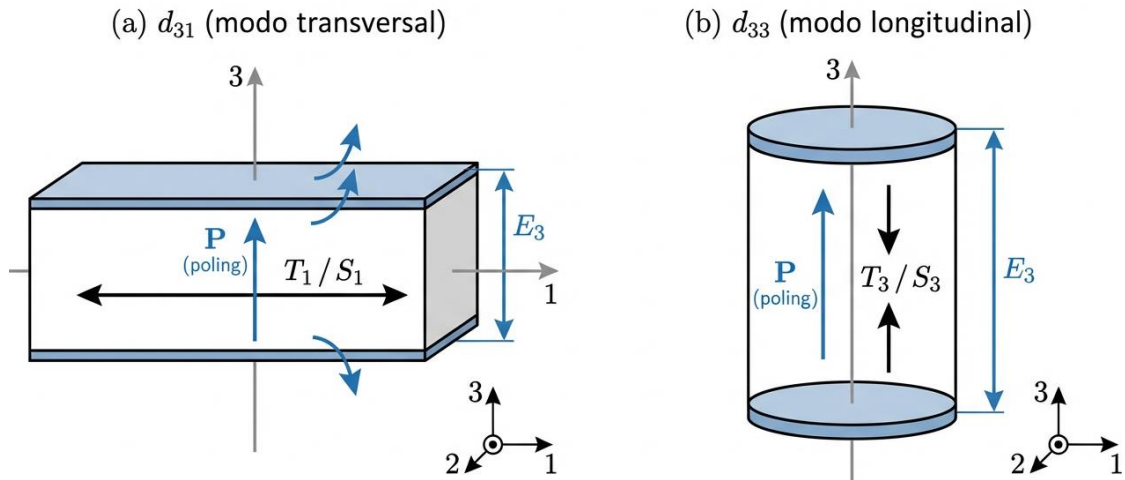
2.4.1 Modos de Operação (33 e 31)

Os coletores de energia vibracionais piezoelétricos podem operar em dois modos principais, dependendo da configuração dos eletrodos e da orientação do material piezoelétrico em relação à direção da tensão mecânica.

No modo longitudinal (d_{33}), a tensão mecânica e o campo elétrico estão alinhados na mesma direção, especificamente perpendiculares à superfície do substrato. Esse modo é geralmente implementado utilizando eletrodos interdigitados depositados sobre a superfície do material piezoelétrico. A vantagem desse modo é a possibilidade de utilizar apenas uma camada condutora, simplificando o processo de fabricação. No entanto, a área efetiva de geração de carga é limitada pela geometria dos eletrodos (DUTOIT et al., 2005).

No modo transversal (d_{31}) a tensão mecânica é aplicada ao longo do plano do substrato, enquanto o campo elétrico é gerado perpendicularmente a esse plano, entre eletrodos posicionados nas superfícies superior e inferior do material piezoelétrico. Esse modo é mais comum em estruturas do tipo cantilever, onde a flexão da viga gera regiões de tração e compressão ao longo de seu comprimento. O modo transversal permite maior área de cobertura do material piezoelétrico e, conseqüentemente, maior geração de carga (ROUNDY, 2005). As diferenças fundamentais entre as configurações de operação longitudinal e transversal são projetadas na Figura 3, evidenciando porque o modo transversal é mais comum em estruturas do tipo cantilever.

Figura 3 - Modos de Operação



Fonte: Adaptado de Roundy (2005) e Dutoit et al. (2005).

2.4.2 Modelagem Analítica

A modelagem clássica de coletores vibracionais piezoelétricos baseia-se, em geral, na analogia com sistemas massa-mola-amortecedor excitados harmonicamente. Para um microcantilever em modo fundamental de flexão, é comum utilizar a teoria de vigas de Euler-Bernoulli para descrever o deslocamento transversal, enquanto o acoplamento piezoelétrico é incorporado por meio de equações constitutivas simplificadas.

No regime linear e para pequenas deformações, a dinâmica transversal de uma viga pode ser descrita pela equação de Euler-Bernoulli, amplamente utilizada em análises preliminares de cantilevers por sua simplicidade e boa aderência para estruturas esbeltas (TIMOSHENKO e GERE, 1961; MEIROVITCH, 2001; RAO, 2007):

$$EI \frac{\partial^4 \omega(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2.3)$$

em que $\omega(x, t)$ é o deslocamento transversal, E é o módulo de Young, I é o segundo momento de área da seção transversal, ρ é a densidade e A é a área da seção (TIMOSHENKO e GERE, 1961). Para uma seção retangular, frequentemente empregada em microvigas, o momento de inércia pode ser expresso por:

$$I = b \frac{h^3}{12}, \quad (2.4)$$

onde b é a largura e h é a espessura da viga. Considerando um microcantilever com condições de contorno engaste-livre, a frequência natural angular do primeiro modo de flexão pode ser aproximada por (MEIROVITCH, 2001; RAO, 2007):

$$\omega_1 = \beta_1^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}}. \quad (2.5)$$

Para uma viga com condição de contorno engaste-livre, as frequências naturais de vibração são determinadas pelos autovalores da característica, os quais dependem das propriedades geométricas e materiais da estrutura (RAO, 2007). No caso de uma viga de seção uniforme, o primeiro modo de vibração é definido pelo autovalor $\beta_1 \approx 1,875$, enquanto o segundo modo é caracterizado por $\beta_2 \approx 4,464$. Esses valores são fundamentais para o projeto de microgeradores piezoelétricos, pois permitem sintonizar a frequência de ressonância do dispositivo com a frequência da fonte de vibração externa, maximizando a transferência de energia mecânica para elétrica. Consequentemente, a razão teórica entre a segunda frequência natural (f_2) e a primeira (f_1) é obtida pela relação:

$$\left(\frac{\beta_2}{\beta_1}\right)^2, \quad (2.6)$$

resultando em um valor aproximado de 6,27 (RAO, 2007; MEIROVITCH, 2001). Essa constante é um parâmetro fundamental para a validação de modelos numéricos, permitindo verificar a consistência dos resultados obtidos via simulação computacional em relação ao comportamento analítico esperado para estruturas esbeltas.

Esta teoria também condiciona a hipóteses de pequenas deformações, na qual supõe-se que os deslocamentos transversais são significativamente menores que as dimensões longitudinais da viga. Sob essa condição, os efeitos de não-linearidade são tratados como desprezíveis, permitindo que a relação entre o momento fletor e a curvatura da viga seja simplificada de forma linear (TIMOSHENKO; GERE, 1961). No contexto de microcantilevers para coleta de energia, a manutenção desse regime é essencial para garantir a previsibilidade da frequência de ressonância e a integridade estrutural das camadas de silício e do filme piezoelétrico.

Sob excitação harmônica na base, na frequência ω , a amplitude de deslocamento e a tensão elétrica gerada apresentam um máximo quando ω se aproxima da frequência natural do sistema, definida por:

$$\omega_n = \sqrt{k/m}. \quad (2.7)$$

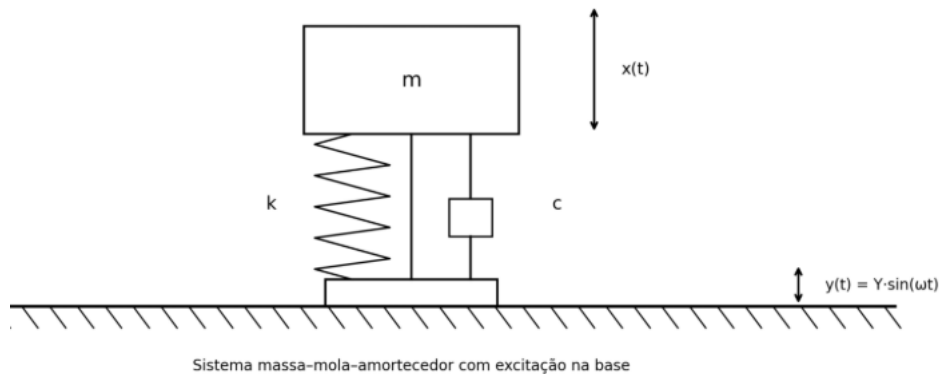
Nesse modelo simplificado, o parâmetro k representa a tensão efetiva do sistema, que quantifica a resistência mecânica da estrutura do microcantilever à deformação. É uma propriedade que depende tanto da geometria da viga quanto do módulo de especificação dos materiais que a composição (silício e material piezoelétrico). Complementarmente, m representa a massa efetiva do dispositivo, que leva em conta a distribuição de massa ao longo do comprimento da viga e de adicionalmente massas sísmicas adicionais.

Nesse ponto, a potência transferida à carga elétrica é maximizada, desde que o amortecimento mecânico e elétrico esteja convenientemente ajustado. A potência elétrica de saída (P_{sim}) em função da resistência de carga (R) e da tensão gerada (V) pode ser expressa simplificada como:

$$P_{sim} = \frac{V^2}{R}. \quad (2.8)$$

De forma resumida, um coletor vibracional pode ser representado por uma massa efetiva m , rigidez efetiva k e um coeficiente de amortecimento c , conforme ilustrado na figura abaixo.

Figura 4 - Sistema massa-mola-amortecedor excitado harmonicamente.



Fonte: Adaptado de Meirovitch (2001) e Rao (2007).

Esses modelos analíticos, embora simplificados, fornecem aproximações importantes sobre o comportamento do sistema, permitindo dimensionamentos iniciais e estimativas de desempenho. Entretanto, para capturar efeitos tridimensionais, distribuição de tensões e campos elétricos, é necessário recorrer a métodos numéricos como o Método de Elementos Finitos (FEM), conforme adotado na metodologia deste trabalho.

2.4.3 Desempenho e Eficiência

O desempenho de coletores vibracionais piezoelétricos pode ser caracterizado por diferentes características, a depender da aplicação e do nível de detalhe da análise. Entre as grandezas mais utilizadas na literatura destacam-se: a potência elétrica entregue à carga, a densidade de potência (por área ou volume do dispositivo), a largura de banda útil em torno da frequência de ressonância e o fator de qualidade Q , diretamente relacionado ao amortecimento do sistema (ROUNDY, 2005; PRIYA e INMAN, 2009). No contexto deste trabalho, a ênfase recai sobre a potência elétrica gerada em função da carga resistiva, sobre a resposta em frequência (tensão RMS e largura de banda a meia potência) e sobre o fator de qualidade extraído da curva de ressonância.

Em aplicações práticas, há um compromisso entre fator de qualidade e largura de banda: um Q muito elevado aumenta a potência na ressonância, mas torna o sistema mais sensível a variações de frequência da excitação; por outro lado, um Q mais baixo amplia a faixa útil de frequências, porém reduz o pico de potência.

No contexto de teclados de notebooks, as vibrações associadas à digitação não são perfeitamente harmônicas, mas sim compostas por impulsos de curta duração com conteúdo espectral distribuído em uma faixa de frequências. Assim, coletores vibracionais projetados para operar em uma região específica do espectro podem aproveitar de forma eficiente uma parcela significativa da energia mecânica disponível.

2.4.4 Critério de Von Mises e Verificação Estrutural

Além da previsão de resposta dinâmica e geração elétrica, a análise de coletores vibracionais deve considerar a integridade estrutural das camadas constituintes (por exemplo, silício e filme piezoelétrico), uma vez que as vibrações podem induzir estados multiaxiais de tensão, em especial nas regiões próximas ao engaste. Uma métrica amplamente utilizada para avaliar a severidade do estado de tensões em análises mecânicas e em pós-processamento de

FEM é a tensão equivalente de Von Mises, associada ao critério de energia de distorção. Em termos das tensões principais σ_1 , σ_2 , σ_3 , a tensão equivalente de Von Mises é definida por (VON MISES, 1913; LEMAITRE e CHABOCHE, 1990):

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}\right)}. \quad (2.9)$$

De forma equivalente, em termos das componentes cartesianas de tensão normal σ_x , σ_y , σ_z , e cisalhante τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zy} , tem-se (LEMAITRE e CHABOCHE, 1990; BEER et al., 2015):

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_z\sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)\right)}. \quad (2.10)$$

Portanto, a identificação de regiões críticas e de concentrações de tensão no microcantilever, fornecendo um critério objetivo para comparação entre geometrias e condições de excitação. Ressalta-se que, dependendo do material e do modo de falha predominante (por exemplo, comportamento frágil), pode ser pertinente complementar a avaliação com critérios baseados em tensões principais e/ou limites de fratura; ainda assim, a tensão de Von Mises permanece uma grandeza consolidada para análise exploratória e para avaliação de severidade em simulações estruturais (LEMAITRE e CHABOCHE, 1990; BEER et al., 2015).

2.5 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM TECLADOS DE NOTEBOOKS

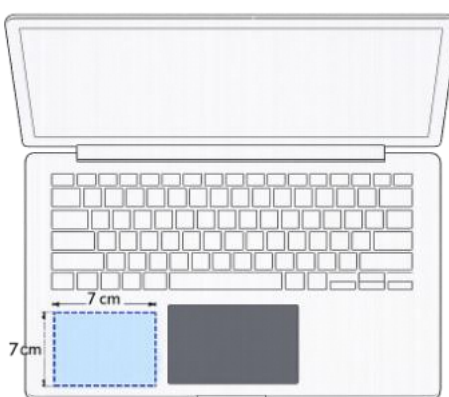
A digitação em teclados de notebooks produz excitações mecânicas impulsivas associadas ao acionamento das teclas e à interação entre os mecanismos de suporte (domes, molas, tesouras) e a estrutura da carcaça. Esses impulsos se propagam pelo conjunto teclado-carcaça, resultando em vibrações que podem ser medidas, por exemplo, por acelerômetros fixados em diferentes pontos do equipamento.

Estudos experimentais mostram que o conteúdo espectral dessas vibrações se concentra tipicamente na faixa de 180 a 320 Hz (BEKER et al., 2012), com amplitudes que dependem do estilo de digitação, do tipo de teclado e dos materiais estruturais do notebook. A região do touchpad e áreas adjacentes tendem a receber parte dessa energia vibracional, tornando-se

candidatas naturais para a instalação de coletores de energia vibracionais acoplados mecanicamente à carcaça.

Para o desenvolvimento do sistema proposto neste trabalho, admite-se que as vibrações na região de 49 cm² ao lado do touchpad (Figura 5) apresentam amplitudes e frequências compatíveis com a excitação de microcantilevers piezoelétricos projetados para ressonar em dentro da faixa acima citada, de modo a maximizar a conversão de energia sob padrões de digitação típicos.

Figura 5 -Representação da área de integração



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.6 REVISÃO DE ESTUDOS SOBRE GERAÇÃO DE ENERGIA EM TECLADOS

Diversos trabalhos na literatura exploram o uso de microcantilevers piezoelétricos para coleta de energia em escala MEMS, tanto em aplicações gerais (vibrações ambientais, máquinas rotativas) quanto em dispositivos portáteis. Em linhas gerais, esses estudos mostram que microcantilevers podem ser projetados para ressonar em faixas de frequência de algumas dezenas a algumas centenas de hertz; que densidades de potência na ordem de dezenas de $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ são atingíveis sob excitações mecânicas moderadas; e que a tecnologia MEMS permite a fabricação de matrizes com grande número de dispositivos idênticos em uma mesma pastilha de silício, facilitando a obtenção de tensões e potências agregadas mais elevadas.

Trabalhos como o de Costa (2019) ilustram em detalhe a modelagem, simulação e caracterização de microcantilevers piezoelétricos em escala de MEMS para coleta de energia e sensoriamento de vibrações, fornecendo base conceitual e parâmetros de referência para o desenvolvimento do arranjo proposto neste estudo.

A literatura apresenta diferentes abordagens para geração de energia a partir de teclados, em especial:

- a modificação direta do mecanismo da tecla, incorporando elementos piezoelétricos aos domes ou às estruturas de apoio, de modo que cada acionamento gere um pulso elétrico associado ao deslocamento da tecla (BEKER et al., 2012);
- o uso de mecanismos eletromagnéticos ou eletrostáticos na própria tecla ou em mecanismos de retorno, convertendo o movimento linear em energia elétrica (KIM; PRIYA, 2010);
- a exploração de vibrações globais da carcaça, com transdutores posicionados em pontos estratégicos, sem alteração da estrutura interna das teclas (ROUNDY, 2005; DUTOIT et al., 2005).
- é possível obter potências da ordem de dezenas de microwatts por tecla modificada, com frequências de operação em torno de 200 Hz, utilizando elementos piezoelétricos integrados ao mecanismo da tecla. Entretanto, essa solução envolve alterações mecânicas que podem impactar a sensação tátil, a durabilidade e o custo de fabricação do teclado (BEKER et al., 2012).

2.7 ANÁLISE CRÍTICA E LACUNAS NA LITERATURA

A revisão dos conceitos e trabalhos relacionados permite identificar alguns pontos de convergência e lacunas. Há um corpo consolidado de literatura sobre MEMS piezoelétricos e microcantilevers para coleta de energia, com demonstrações de densidades de potência adequadas para aplicações de baixo consumo. Estudos como os de BEKER et al. (2012) e WACHARASINDHU; KWON (2008) investigou a geração de energia em teclados por meio de modificações no mecanismo de acionamento das teclas. Eles relataram uma potência de aproximadamente $16,95 \mu\text{W}$ por tecla ao excitar um cantilever piezoelétrico em 7,62 Hz, enquanto WACHARASINDHU; KWON (2008) obtiveram $40,8 \mu\text{W}$ de potência média com energia acumulada de $650 \mu\text{J}$ por acionamento utilizando uma abordagem híbrida piezoelétrica-eletromagnética. Embora esses resultados sejam promissores em termos de densidade de potência da tecla, essas abordagens apresentam impactos potenciais na ergonomia do dispositivo e na complexidade construtiva, uma vez que desativam a integração de elementos transdutores diretamente na estrutura de cada tecla. Observa-se, entretanto, relativa escassez de trabalhos que exploram a integração de arranjos MEMS de forma a priorizar a manutenção da

experiência tátil original do equipamento. Mais do que o simples aproveitamento de áreas ociosas da carcaça, a lacuna científica reside no desenvolvimento de soluções que operem de maneira não invasiva. Dessa forma, o desafio central não se restringe apenas à eficiência da coleta de energia das vibrações da digitação, mas na viabilização de um sistema que garanta a total preservação da ergonomia e do conforto do usuário, garantindo que a implementação tecnológica não interfira na usabilidade funcional do dispositivo.

Além disso, muitos estudos concentram-se em protótipos em bancada ou em condições de excitação idealizadas, havendo espaço para investigações que considerem condições reais de uso, padrões de digitação e integração prática com circuitos de gerenciamento de energia. Dessa forma, este trabalho se propõe a contribuir justamente nessa interseção: utilizar o conhecimento acumulado sobre microcantilevers piezoelétricos em tecnologia MEMS e sobre geração de energia em teclados para investigar a viabilidade de um sistema de coleta de energia integrado à área de 49 cm² ao lado do touchpad, preservando a ergonomia do teclado e direcionando a energia colhida para aplicações de baixo consumo em notebooks.

Diante do referencial teórico apresentado, que evidencia as potencialidades e limitações dos materiais piezoelétricos e da tecnologia MEMS, torna-se necessário estabelecer um procedimento rigoroso para o dimensionamento e simulação da matriz proposta. Assim, o próximo capítulo detalha a metodologia aplicada, descrevendo desde a modelagem analítica dos microcantilevers até os parâmetros de simulação computacional usadas para validar a coleta de energia a partir das mecânicas de um notebook.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

A estrutura metodológica apresentada a seguir foi delineada para responder às lacunas identificadas na Seção 2.7. Assim, a escolha da tecnologia MEMS e a disposição matricial dos microcantilevers não são apenas decisões técnicas, mas uma estratégia para viabilizar a aplicação comercial em notebooks, ponto este pouco explorado no estado da arte atual. A abordagem integra definição geométrica e de materiais, modelagem física e critérios de verificação, considerando a integração do sistema em uma área interna disponível de 49 cm² localizada ao lado esquerdo do touchpad do notebook.

3.1 CONCEPÇÃO E DESIGN DO MICROCANTILEVER

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um coletor de energia vibracional em tecnologia MEMS, baseado em microcantilevers piezoelétricos, com o objetivo de investigar a viabilidade de conversão de vibrações induzidas por digitação em energia elétrica. A motivação reside na existência de vibrações mecânicas impulsivas geradas durante o acionamento das teclas e transmitidas pela estrutura do notebook, as quais podem ser exploradas por transdutores piezoelétricos posicionados em regiões internas disponíveis do equipamento. A energia coletada por este sistema é destinada à alimentação de cargas de baixo consumo no notebook, como sensores internos ou circuitos de monitoramento, contribuindo para a eficiência energética global do sistema.

Embora o notebook já disponha de uma fonte principal de energia, o objetivo desta proposta não é substituir a alimentação do sistema, mas implementar uma camada complementar de microgeração local, capaz de sustentar, de forma parcial ou intermitente, subsistemas de baixo consumo (como RTC, sensores embarcados e módulos de monitoramento). Dessa maneira, mantém-se a dependência da bateria principal para o funcionamento global do equipamento, ao mesmo tempo em que se introduz um mecanismo auxiliar de fornecimento de energia distribuído. Para isso, buscou-se desenvolver um sistema de coleta de energia baseado em tecnologia MEMS que fosse tecnicamente viável, apenas como estudo de caso para avaliar o potencial real de coleta de energia a partir das vibrações mecânicas geradas durante a digitalização. Assim, a proposta assume também um caráter investigativo, permitindo quantificar limites, desempenho e aplicabilidade prática da microgeração vibracional no dispositivo proposto.

O dispositivo adotado é um microcantilever do tipo viga engastada–livre, por ser uma topologia amplamente utilizada em coleta de energia vibracional, em função da elevada sensibilidade à excitação na base e da possibilidade de sintonização da frequência natural pela geometria e pelas propriedades dos materiais. O microcantilever é composto por um substrato de silício e uma camada ativa piezoelétrica (PZT-5H) metalizada por eletrodos. Sob excitação vibracional, a flexão da viga impõe tensões mecânicas na camada piezoelétrica e, pelo efeito piezoelétrico direto no modo transversal (d_{31}), ocorre a geração de carga elétrica, resultando em uma diferença de potencial coletada pelos eletrodos (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2004; BEKER et al., 2012).

Como aplicação, considera-se a integração de um arranjo de microcantilevers em uma região interna disponível do notebook, especificamente na área adjacente ao touchpad, buscando explorar vibrações associadas à digitação sem a necessidade de modificações no mecanismo das teclas. Trabalhos recentes e demonstrações experimentais sustentam a plausibilidade desse tipo de abordagem, evidenciando que o impulso mecânico associado ao ato de digitar possui conteúdo energético passível de conversão (MAHARJAN et al., 2021; NANDPURE; KELKAR, 2023).

Do ponto de vista de projeto, os objetivos desta etapa são:

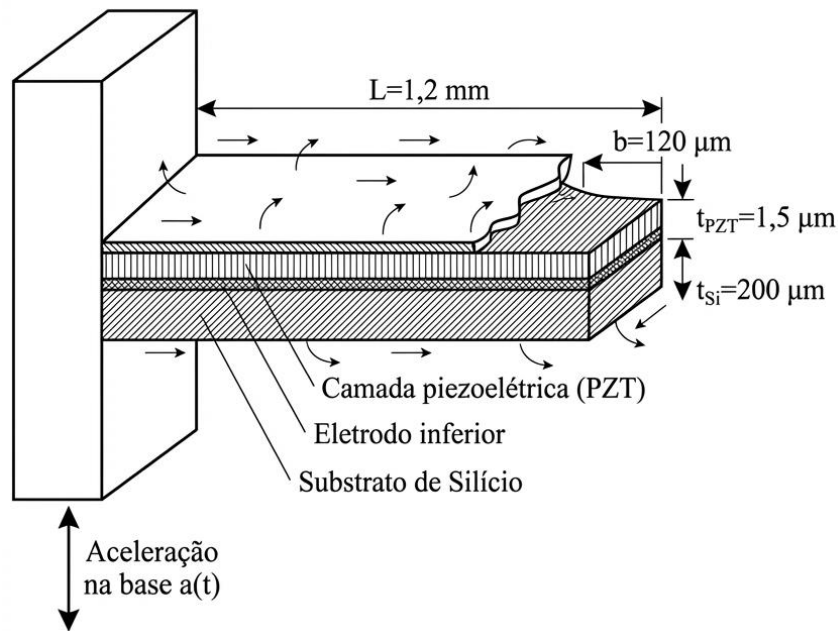
- Definir uma arquitetura de microcantilever compatível com microfabricação e com a integração física no notebook;
- Estabelecer uma geometria do dispositivo que permita a sintonização dinâmica do dispositivo com a faixa de frequências de interesse e estruturar um arranjo que maximize o aproveitamento da área disponível de 49 cm²,

essas diretrizes orientam a definição geométrica do dispositivo e as análises apresentadas ao longo deste capítulo.

3.1.1 Dimensões e estrutura do microcantilever

As dimensões de referência do microcantilever foram definidas de modo a compatibilizar requisitos de integração física no interior do notebook, limitações de processos MEMS e necessidades de operação sob excitações vibracionais associadas à digitação. O dispositivo é constituído por uma viga engastada–livre em silício, recoberta por uma camada ativa piezoelétrica (PZT-5H) e eletrodos metálicos superior e inferior (Figura 6). A pilha de materiais (substrato estrutural, camada piezoelétrica e eletrodos) estabelece a seção composta utilizada como base nas análises analíticas e nas simulações numéricas posteriores.

Figura 6 - Representação geométrica e estrutural do microcantilever piezoelétrico



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As dimensões numéricas adotadas neste trabalho são resumidas na Tabela 1. Essas escolhas foram feitas de forma a sintonizar a frequência fundamental de ressonância com a faixa típica de vibrações associadas à digitação em teclados de notebooks, ao mesmo tempo em que se preserva a compatibilidade com processos de microfabricação e com a área disponível para integração do dispositivo (SENTURIA, 2002; ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2004; ROUNDY, 2005).

Tabela 1 - Dimensões de referência do microcantilever

Parâmetro	Símbolo	Valor
Comprimento da viga (mm)	L	1,2
Largura da viga (μm)	b	120
Espessura do substrato de silício (μm)	t_{Si}	200
Espessura da camada PZT-5H (μm)	t_{PZT}	1,5
Espessura dos eletrodos metálicos (nm)	—	ordem de 10^2

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.2 MÉTODOS ANALÍTICOS DE PROJETO

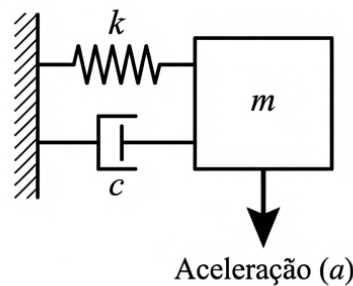
Antes da modelagem numérica via Método dos Elementos Finitos (FEM), realiza-se uma etapa de modelagem analítica para estabelecer relações entre geometria, dinâmica e

grandezas elétricas do dispositivo. Esses modelos fornecem estimativas iniciais para a frequência de ressonância e para ordens de grandeza de tensão e potência, além de servirem como referência para verificação cruzada dos resultados numéricos (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2004; ROUNDY, 2005; SENTURIA, 2002).

3.2.1 Modelo massa–mola–amortecedor com um grau de liberdade

O microcantilever pode ser aproximado, no primeiro modo de vibração, como um sistema massa–mola–amortecedor de um grau de liberdade (1-DOF) (Figura 7), excitado na base por uma aceleração dependente do tempo. Nessa analogia, a massa efetiva representa a parcela modal equivalente associada ao modo fundamental; a rigidez efetiva está relacionada à rigidez flexural da viga; e o amortecimento agrega perdas viscosas (ar) e perdas internas do material. Esse tipo de representação é amplamente empregado como modelo de primeira ordem em coletores vibracionais piezoelétricos (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2004; ROUNDY, 2005).

Figura 7 - Sistema massa–mola–amortecedor (1-DOF) com excitação na base



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base na representação clássica de coletores vibracionais (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2004).

Adotando o deslocamento relativo $x(t)$ da ponta da viga em relação à base e o deslocamento da base $y(t)$, a equação de movimento pode ser escrita como:

$$m \frac{\partial^2 x(t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial x(t)}{\partial t} + kx(t) = -m \frac{\partial^2 y(t)}{\partial t^2}, \quad (3.1)$$

em que m é a massa efetiva, c é o coeficiente de amortecimento, k é a rigidez equivalente e a aceleração da base é dada por: $\frac{\partial^2 y(t)}{\partial t^2}$. A frequência natural em hertz é dada por:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (3.2)$$

3.2.2 Estimativa da frequência de ressonância

Para uma viga engastada–livre, a frequência natural fundamental pode ser estimada pela teoria clássica de vigas de Euler–Bernoulli, assumindo pequena deflexão e seção uniforme. Uma expressão amplamente utilizada para a primeira frequência natural é (SENTURIA, 2002; ROUNDY, 2005):

$$f_1 \approx \frac{1.875^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3.3)$$

onde L é o comprimento da viga, E é o módulo de elasticidade equivalente, I é o momento de inércia da seção composta, ρ é a densidade equivalente e A é a área da seção transversal equivalente. Para seções compostas (Si + PZT + eletrodos), valores equivalentes podem ser obtidos por aproximações de rigidez flexural e massa por unidade de comprimento.

3.2.3 Estimativa de tensão elétrica e potência

No modo transversal, a flexão do microcantilever induz tensões mecânicas na camada piezoelétrica, gerando carga elétrica e diferença de potencial entre os eletrodos. Em primeira aproximação, a tensão em circuito aberto pode ser relacionada à tensão mecânica média na camada piezoelétrica por (BEKER et al., 2012; ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2004):

$$V_{oc} \approx \left(\frac{d_{31} t_{PZT}}{\epsilon_{33}^T} \right) \sigma_{media} \quad (3.4)$$

em que d_{31} é o coeficiente piezoelétrico transversal, t_{PZT} é a espessura da camada piezoelétrica, ϵ_{33}^T é a permissividade dielétrica sob tensão constante e σ_{media} representa uma tensão mecânica média representativa (por exemplo, na região ativa próxima ao engaste). Para estimar a potência

média entregue a uma carga resistiva $R_{c\ arg\ a}$ utiliza-se a relação de potência em termos do valor eficaz (RMS) da tensão na carga:

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R_{c\ arg\ a}}. \quad (3.5)$$

Ressalta-se que, em um modelo mais completo, a potência depende do acoplamento eletromecânico, da capacitância equivalente do elemento piezoelétrico e do casamento de impedância entre o transdutor e a carga/retificador, justificando a etapa numérica multifísica apresentada a seguir (ROUNDY, 2005; BEKER et al., 2012).

Para o desenvolvimento do sistema proposto neste trabalho, assume-se que a digitação atua como uma mecânica impulsiva aplicada ao conjunto teclado–estrutura. Parte dessa energia vibracional se propaga pela carcaça até a região adjacente onde os microcantilevers são integrados.

Do ponto de vista prático, essa propagação não ocorre de forma integral, uma vez que o caminho estrutural entre o ponto de impacto (teclas) e o ponto de coleta pode introduzir atenuação e filtragem mecânica, associadas às propriedades do material, à geometria e aos modos naturais da carcaça.

Apesar disso, neste trabalho, a vibração é caracterizada diretamente a partir do acionamento das teclas, sendo essa mesma intensidade aplicada como entrada no modelo do microcantilever. Essa abordagem foi utilizada como uma aproximação equivalente, permitindo avaliar o potencial de coleta de energia do sistema sob condições operacionais propostas e validadas na literatura.

3.3 MODELAGEM NUMÉRICA (FEM)

A modelagem numérica é realizada via simulação computacional, a partir do software COMSOL Multiphysics®, para avaliar o comportamento multifísico do microcantilever. A escolha por esse programa se deu devido à sua robustez em resolver problemas físicos acoplados, essa etapa permite capturar efeitos que o modelo analítico simplificado pode omitir, como a distribuição espacial real de tensões, a influência de seções compostas, a interação entre camadas e o acoplamento eletromecânico tridimensional associado ao material piezoelétrico (SENTURIA, 2002).

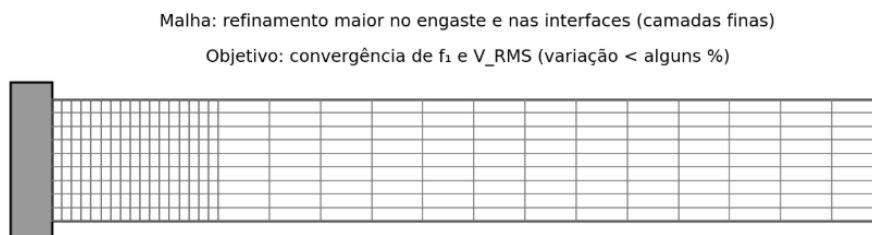
Os parâmetros completos de geometria, propriedades de materiais, condições de contorno, estratégia de malha, tipos de estudo e etapas de pós-processamento utilizados no COMSOL Multiphysics® encontram-se descritos de forma reproduzível no Apêndice A.

3.3.1 Configuração do domínio, materiais e malha

O domínio computacional compreende a geometria definida na Seção 3.1.1, incluindo substrato de silício, camada piezoelétrica e eletrodos. As propriedades de material (mecânicas e elétricas) são definidas conforme dados de referência para silício e PZT-5H, incluindo matriz piezoelétrica, permissividades e constantes elásticas do PZT no regime linear.

A discretização do domínio é realizada por meio de pequenos blocos tridimensionais, denominados elementos finitos, configurados para processar simultaneamente as propriedades mecânicas e elétricas do dispositivo. Essa configuração é essencial para simular o acoplamento piezoelétrico, permitindo que o software calcule como a deformação física da viga (esforço estrutural) se converta diretamente em potencial elétrico (tensão). Para garantir a precisão dos resultados, a malha foi refinada com uma maior concentração desses elementos na região do engaste, local onde as mecânicas submetidas são mais intensas e onde ocorre a maior parte da conversão de energia.

Figura 8 – Domínio e malha do microcantilever (representação esquemática)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

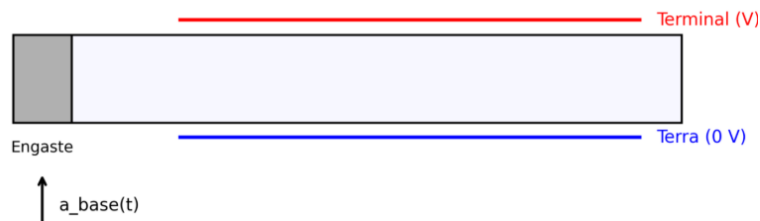
Um estudo de convergência de malha é empregado (Figura 8) para assegurar que resultados como frequência natural, deslocamento máximo e tensão elétrica convergem dentro de uma tolerância predefinida quando a malha é refinada. Esse procedimento reduz a dependência numérica dos resultados em relação ao tamanho dos elementos e aumenta a confiabilidade das conclusões.

3.3.2 Condições de contorno, carregamento e terminais

As condições de contorno mecânicas consistem no engastamento de uma das extremidades da viga (deslocamento e rotações nulos na superfície de fixação). A excitação é aplicada como aceleração de base na direção normal ao plano da viga, representando a vibração transmitida pela estrutura do notebook durante a digitação.

No domínio elétrico, a face inferior do eletrodo (ou da camada piezoelétrica, conforme a modelagem) é definida como referência (terra, 0 V), enquanto a face superior é definida como terminal para extração de tensão. Dependendo do tipo de estudo (circuito aberto, carga resistiva equivalente ou acoplamento com circuito), as condições elétricas podem ser ajustadas para representar o cenário de interesse, conforme a ilustração abaixo (Figura 9).

Figura 9 – Condições de contorno e terminais elétricos (esquemático)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3.3 Tipos de estudo e grandezas extraídas

A análise numérica pode incluir: estudo modal para identificação das frequências naturais e formas modais, estudo harmônico/frequencial para obter a resposta em frequência de deslocamento e tensão elétrica, estudo transiente, quando se deseja representar excitações impulsivas associadas à digitação. As grandezas de interesse incluem deslocamentos máximos, tensões mecânicas (por exemplo, em regiões críticas do PZT) e a tensão entre terminais elétricos.

3.4 CONFIGURAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO ARRANJO

Após a definição do modelo analítico para um dispositivo individual, fez-se necessário estabelecer uma estratégia de integração de múltiplos transdutores para compor o sistema de coleta de energia. A transição do modelo unitário para um arranjo integrado visa maximizar a

potência total extraída da área disponível, respeitando as restrições físicas de layout e as necessidades de condicionamento elétrico.

3.4.1 Análise para seleção do número de dispositivos

A definição do número total de dispositivos (N) em uma área de 49 cm^2 foi o resultado de uma análise de otimização entre a densidade de transdutores e a área de layout por dispositivo (UM_{layout}) mínima necessária. Para que o arranjo seja viável, cada unidade deve comportar uma viga ativa, uma área de ancoragem para engastamento rígido e o espaço para o barramento de trilhas elétricas. Considerando um fator de eficiência de preenchimento de 92% (destinado a margens de borda e isolamento), o limite superior de dispositivos é determinado pela relação entre a área total e a área de segurança de cada unidade (estimada em $0,65 \text{ cm}^2$).

Numericamente, essa restrição é expressa por:

$$N \leq \frac{UM_{total} \cdot 0.92}{UM_{min}} \approx 69,38. \quad (3.6)$$

Dessa forma, define-se $N = 70$, permitindo a ocupação máxima da área sem comprometer a integridade mecânica do engaste ou a largura das trilhas elétricas.

3.4.2. Justificativa da Configuração Matricial 10×7

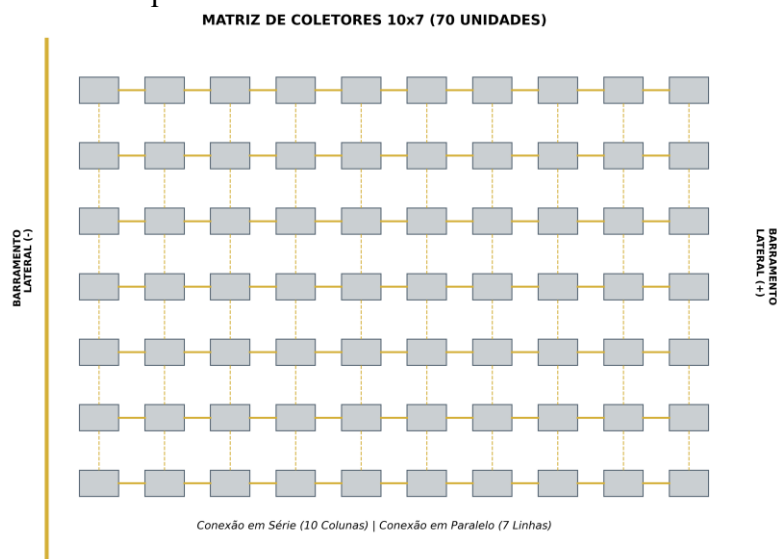
Assumindo 70 transdutores, é possível duas configurações matriciais: 10 colunas por 7 linhas (10×7) ou 7 colunas por 10 linhas (7×10). A adoção de uma configuração matricial de 10 colunas por 7 linhas (10×7), em detrimento da outra (7×10), fundamenta-se na otimização do roteamento elétrico. Esta escolha estratégica baseia-se em dois pilares:

- **Redução de Perdas Resistivas:** Uma organização com 10 colunas permite que os barramentos de interconexão percorram distâncias menores até os pontos de coleta laterais. Trilhas mais curtas minimizam a resistência parasita do substrato, reduzindo perdas por efeito Joule e garantindo que a potência gerada chegue ao circuito retificador com maior eficiência.
- **Escalonamento de Tensão:** O maior número de colunas apoiando a associação em série de múltiplos dispositivos. Essa estratégia é essencial para elevar a tensão de saída total

a níveis que superem a queda de tensão direta dos componentes eletrônicos de retificação, facilitando o carregamento de capacitores ou baterias.

A Figura 10 detalha a implementação física dessa estratégia, evidenciando a disposição dos 70 transdutores em 10 colunas e 7 linhas. Observe-se que o maior número de colunas reduz o percurso das trilhas até os barramentos laterais, minimizando a resistência ôhmica do arranjo. Simultaneamente, essa topologia favorece a associação em série de dispositivos, elevando a amplitude da tensão de saída.

Figura 10 – Ilustração da matriz de 70 microcoletores piezoelétricos na configuração 10×7 e esquemático de roteamento elétrico.



Fonte: Elaboração própria (2026).

3.5 MÉTRICAS DE VALIDAÇÃO E DESEMPENHO

Para garantir a consistência analítica e fundamentar a análise dos resultados, esta seção consolida as considerações e relações matemáticas utilizadas na validação cruzada entre o modelo teórico e a simulação por elementos finitos (FEM). Esta seção visa garantir o rigor na quantificação do desempenho elétrico, permitindo uma avaliação precisa da eficiência de conversão tanto para o microdispositivo individual quanto para o arranjo matricial completo.

3.5.1 Métricas de comparação entre modelo analítico e FEM

O desvio relativo entre a frequência fundamental estimada analiticamente (f_{an}) obtida por FEM (f_{FEM}) é calculado por:

$$Desvio = \frac{|f_{an} - f_{FEM}|}{f_{an}} * 100. \quad (3.7)$$

Adicionalmente, pode-se utilizar a razão entre frequências modais como verificação de consistência da modelagem de viga engastada–livre:

$$Razão\ Modal = \frac{f_n}{f_1} \quad (3.8)$$

3.5.2 Excitação de base e força equivalente (modelo 1-DOF)

Em análises baseadas na analogia 1-DOF e/ou na interpretação de resultados de excitação por aceleração, a aceleração de base $a(t)$ pode ser associada a uma força inercial equivalente por:

$$F_{eq(t)} = m_{eq} a(t), \quad (3.9)$$

em que m_{eq} é a massa efetiva (modal) associada ao primeiro modo de vibração. Essa relação é útil para comparar cenários de excitação quando o modelo numérico reporta força equivalente, ou quando se deseja expressar a excitação em termos de força.

Ressalta-se que os parâmetros considerados serão o de melhor cenário possível encontrado na literatura (superestimados), visto que a força e conseqüentemente a aceleração sofrem atenuação estrutural e não atingem sua integridade total no local efetivo de conversão de energia.

3.5.3 Critérios de linearidade geométrica e curvatura

Para verificar a validade das hipóteses de pequena deflexão inerentes à teoria de Euler–Bernoulli, utiliza-se a razão entre o deslocamento máximo na ponta e o comprimento do microcantilever:

$$Critério\ de\ pequena\ deflexão = \frac{\delta_{ponta}}{L}. \quad (3.10)$$

Como métrica adicional, a curvatura máxima na região do engaste pode ser aproximada, no primeiro modo, a partir do deslocamento máximo na ponta por:

$$k_{max} \approx 3.52 \frac{\delta_{ponta}}{L^2}. \quad (3.11)$$

Essa aproximação fornece uma estimativa rápida da ordem de grandeza da curvatura máxima, útil para interpretação de regiões críticas de deformação na camada piezoelétrica.

3.5.4 Critério de integridade (fator de segurança)

A avaliação preliminar de integridade estrutural é realizada pelo fator de segurança em relação ao limite de ruptura e à tensão máxima obtida por simulação:

$$FS = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{max}}. \quad (3.12)$$

3.5.5 Extração de banda e fator de qualidade a partir da resposta em frequência

A seletividade da resposta em ressonância pode ser caracterizada pelo fator de qualidade mecânica (Q), obtido a partir da largura de banda a meia potência (Δf) extraída da curva de resposta em frequência:

$$Q = \frac{f_1}{\Delta f}. \quad (3.13)$$

Este procedimento, Δf é determinada pelas duas frequências em torno do pico de ressonância nas quais a potência cai para metade do valor máximo (equivalentemente, a tensão cai para $V_{RMS}/\sqrt{2}$).

3.5.6 Escalonamento para matriz e métricas de energia em uso real

Para uma matriz com N dispositivos, a potência instantânea agregada (considerando dispositivos idênticos operando na condição de referência) é:

$$P_{inst,matrix} = N P_{disp}. \quad (3.14)$$

A energia elétrica gerada por evento de digitação pode ser estimada a partir da potência na condição de referência (P_{disp}) e a duração do toque (T_{toque}):

$$E_{toque} = P_{disp} T_{toque}. \quad (3.15)$$

A potência média em uso real pode ser aproximada pela introdução de um ciclo de trabalho eficaz (D), obtido a partir da taxa de digitação f_{dig} (toques por segundo) e da duração do toque:

$$D = f_{dig} T_{toque}. \quad (3.16)$$

$$P_{med,diso} = P_{disp} D. \quad (3.17)$$

A energia diária acumulada para a matriz é estimada por:

$$E_{dia} = N_{toques} (N E_{toques}). \quad (3.18)$$

A densidade de potência, para um dispositivo ou para a matriz, é definida por:

$$\rho_p = \frac{P}{A}. \quad (3.19)$$

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos nas simulações pelo Método dos Elementos Finitos (FEM) e na avaliação do desempenho do coletor de energia piezoelétrico proposto, considerando sua aplicação em teclados de notebooks. Os resultados são organizados em quatro partes: apresentação dos resultados das simulações, análise do desempenho do colhedor, comparação com dados da literatura e discussão das implicações para aplicação em notebooks comerciais.

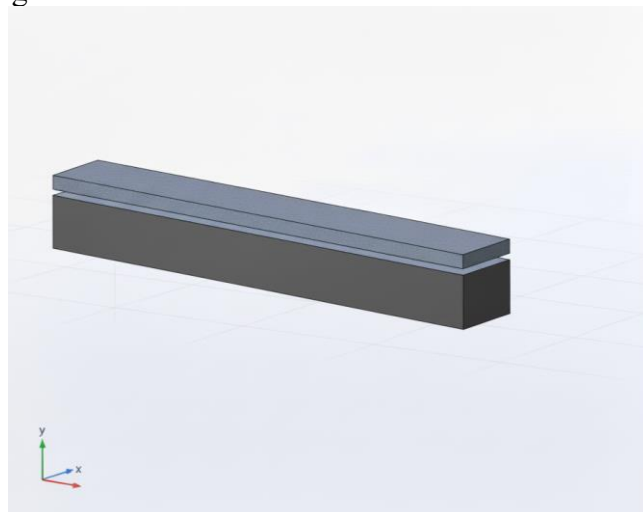
Ressalta-se que, conforme a modelagem analítica desenvolvida no Capítulo 3 (viga engastada-livre e hipóteses de Euler–Bernoulli), os resultados numéricos são discutidos também sob a ótica de validação cruzada entre modelo analítico e FEM, de modo a aumentar a confiabilidade do dimensionamento preliminar e das conclusões apresentadas.

4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO FEM

As simulações FEM realizadas com a geometria e os parâmetros descritos no Capítulo 3 permitiram obter a frequência de ressonância fundamental do microcantilever, a distribuição de tensões e deslocamentos na estrutura e a resposta elétrica resultante sob excitações compatíveis com a digitação em teclados de notebooks. Esta seção detalha os resultados obtidos em cada uma das etapas da análise numérica. Os parâmetros de excitação adotados nas simulações (aceleração de base, duração de toque e taxa de digitação) foram definidos com base em valores típicos reportados na literatura para digitação em teclados de notebooks (BEKER et al., 2012; MAHARJAN et al., 2021), permitindo representar um cenário realista de operação e viabilizar a comparação com estudos prévios. Esses valores serão detalhados nas seções subsequentes conforme cada análise é apresentada. Para fins de reprodutibilidade, o roteiro de modelagem numérica e os critérios de convergência da malha estão detalhados no Apêndice A.

A modelagem geométrica do microgerador, apresentada na Figura 11, reflete a configuração de um coletor de energia piezoelétrico do tipo bimorfo. A estrutura é composta por um substrato de silício, que provê a rigidez mecânica necessária, e uma camada ativa de PZT-5H com espessura reduzida, característica de processos de deposição de filmes finos em sistemas microeletromecânicos (MEMS).

Figura 11 - Modelo tridimensional do microcantilever



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.1.1 Análise modal

O estudo modal foi realizado para identificar as frequências naturais e as formas modais do microcantilever projetado. A análise modal é fundamental para garantir que o dispositivo opere na faixa de frequências associadas às vibrações geradas durante a digitação, maximizando assim a conversão de energia mecânica em elétrica.

Para o primeiro modo, tem-se: $f_1 \approx 237 \text{ Hz}$, esse valor está dentro da faixa de frequências associadas às vibrações geradas durante a digitação, tipicamente entre 180 Hz e 320 Hz, conforme relatado em estudos de coleta de energia em teclados (BEKER et al., 2012). A proximidade entre a frequência projetada analiticamente (aproximadamente 244 Hz) e a obtida na simulação FEM representa um desvio relativo conforme a equação abaixo:

Com isso, a métrica de desvio relativo definida na Seção 3.5.1 (Equação 3.7) é: $\text{Desvio} \approx 2,87\%$, demonstrando boa concordância entre o modelo analítico simplificado de viga engastada-livre e o modelo tridimensional completo com acoplamento piezoelétrico. Essa proximidade valida a abordagem de dimensionamento preliminar adotada e confirma a adequação das propriedades dos materiais utilizados nas simulações.

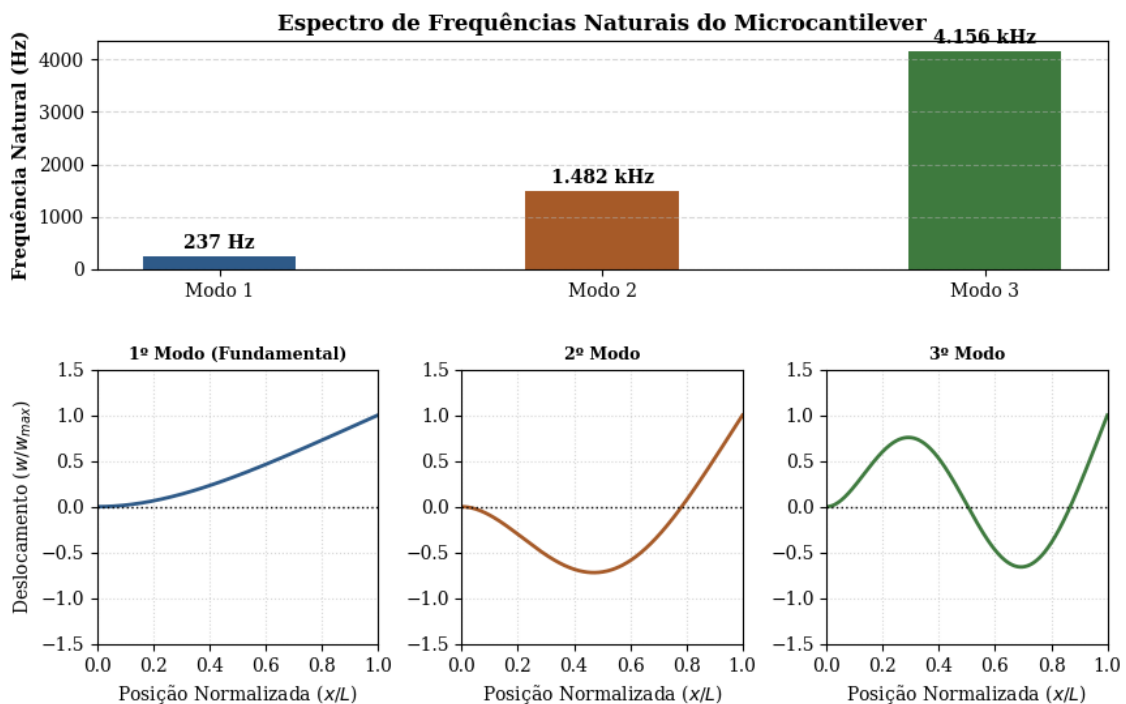
Os modos superiores foram identificados em frequências significativamente mais altas ($f_2 \approx 1,482 \text{ kHz}$ e $f_3 \approx 4,156 \text{ kHz}$) o que garante que, na faixa de excitação associada ao uso normal do teclado a resposta do sistema seja dominada pelo modo fundamental:

A razão obtida é próxima ao esperado teoricamente para vigas engastadas-livres, em que a razão entre os dois primeiros modos é aproximadamente 6,27 segundo a teoria clássica

de vibrações de Euler–Bernoulli. Essa concordância adicional reforça a confiabilidade do modelo numérico.

A análise modal permitiu identificar as frequências naturais e as respectivas formas de vibração do microgerador. Para o microcantilever proposto, foram extraídos os três primeiros modos de flexão, cujos resultados de frequência e perfis de deslocamento normalizados são apresentados na Figura 12. O 1º modo (fundamental) ocorre em 237 Hz, apresentando uma curvatura suave e contínua ao longo de toda a viga, sem a presença de nós internos. Este modo é o objetivo principal do projeto, uma vez que sua frequência de ressonância é sintonizada com a faixa de vibrações mecânicas típicas de teclados de notebooks, permitindo a transferência máxima de energia para a camada piezoelétrica. Os modos superiores apresentam frequências significativamente mais elevadas: o 2º modo em 1,482 kHz e o 3º modo em 4,156 kHz. O segundo modo apresenta um nó interno (ponto de colocação nulo), enquanto o terceiro modo apresenta dois nós, resultando em padrões de oscilação mais complexos e menores amplitudes de deformação efetivas para a mesma energia de entrada. A grande separação espectral entre o modo fundamental e os modos superiores garante que o dispositivo opere de forma estável em seu primeiro modo de flexão, evitando interferências de harmônicos de alta frequência durante a coleta de energia.

Figura 12 - Espectro de frequências naturais e formas modais de vibração para os três primeiros modos de flexão do microcantilever



Fonte: Elaboração própria (2026).

4.1.2 Distribuição de Tensões

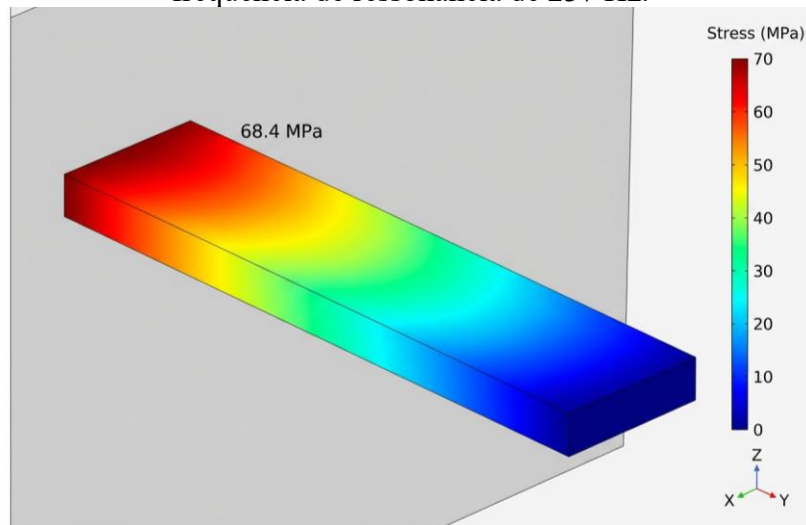
A análise estrutural foi conduzida aplicando-se à base do microcantilever uma excitação harmônica equivalente às condições de digitação, com amplitude aproximada de aceleração - $a \approx 2,5 \text{ m/s}^2$, na frequência de ressonância fundamental ($f_1 \approx 237 \text{ Hz}$),

A amplitude adotada fundamenta-se em dados experimentais da literatura técnica sobre coleta de energia em dispositivos portáteis. Esse valor representa o patamar médio das acelerações impulsivas transmitidas à carcaça de notebooks durante o processo de digitação ativa. Segundo estudos de Beker et al. (2012) e Maharjan et al. (2021), as vibrações mecânicas resultantes do impacto nas teclas situam-se tipicamente na faixa de $2,0 \text{ m/s}^2$ a $3,0 \text{ m/s}^2$. Portanto, a utilização de $2,5 \text{ m/s}^2$ como condição de contorno garante que as tensões mecânicas e a potência elétrica obtidas nas simulações reflitam um cenário operacional realista - embora superestimado para as aplicações reais de coleta no chassi do notebook - permitiriam uma primeira análise e comparação direta com o estado da arte da tecnologia.

Essa análise permitiu obter a distribuição espacial de tensões mecânicas e deslocamentos ao longo da estrutura. As tensões equivalentes de von Mises concentram-se, como esperado, na região de engaste do microcantilever. Os valores máximos encontrados foram: $\sigma_{max, Si} \approx 68,4 \text{ MPa}$ (para o silício) e $\sigma_{PZT} = 52,1 \text{ MPa}$ (para a camada piezoelétrica).

A Figura 13 ilustra o perfil de distribuição de tensão ao longo de toda a estrutura do microgerador (substrato de silício e camada ativa de PZT-5H) no instante de deflexão máxima. Como esperado para uma viga em balanço submetido à flexão, observa-se um gradiente de tensão que se intensifica à medida que se aproxima da extremidade fixa. Este comportamento é determinante para o projeto, pois a localização da zona de maior sollicitação mecânica define a região de eficiência máxima para a coleta de cargas elétricas.

Figura 13 – Distribuição de equivalentes de Von Mises no microcantilever operando na frequência de ressonância de 237 Hz.



Fonte: Elaboração pelo autor (2026).

Para avaliar a margem de segurança, esses valores foram comparados aos limites de ruptura dos materiais, utilizando o critério de fator de segurança definido na Seção 3.5.4 (Equação 3.12). Em seguida, esses valores foram comparados aos limites de ruptura dos materiais (7 GPa para o silício e 80 MPa para o PZT-5H). Tendo um fator de 102 para o substrato e 1,54 para a camada PZT-5H.

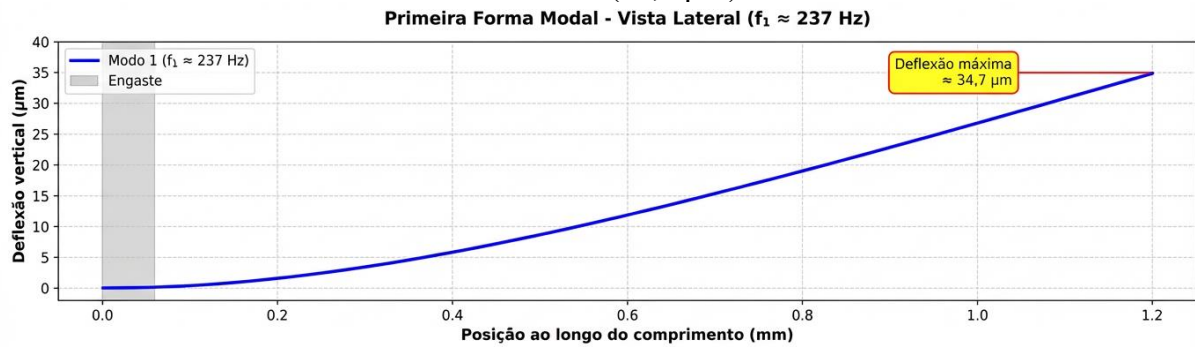
Embora o fator de segurança para o PZT-5H seja relativamente baixo em termos de ruptura estática, é importante considerar a operação em regime de fadiga de alto ciclo. Estudos indicam limite de fadiga para PZT-5H em flexão da ordem de 70–80 MPa para 10^7 ciclos (COSTA, 2019), o que ainda oferece margem adequada para operação segura nas condições consideradas.

4.1.3 Distribuição de deslocamentos

Complementarmente à análise de tensão, avaliou-se o campo de deslocamentos transversais do microcantilever sob ação harmônica. A Figura 14 apresenta o perfil de deflexão da estrutura operando em sua frequência de ressonância fundamental ($f_1 = 237\text{Hz}$). Observa-se que a viga assume uma característica de configuração do primeiro modo de flexão, apresentando curvatura máxima na região adjacente ao engaste e deslocamento progressivo em direção à extremidade livre, conforme preconizado pela teoria de vigas de Euler-Bernoulli para o modo fundamental. O deslocamento máximo registrado na ponta do dispositivo foi de $34,7 \mu\text{m}$, este valor é tecnicamente significativo, pois demonstra que, embora a viga apresente

flexibilidade suficiente para deformar a camada piezoelétrica e gerar potencial elétrico, a amplitude de oscilação permanece em uma escala micrométrica. Essa característica garante que o microgerador funcione de forma não invasiva dentro do mecanismo.

Figura 14 – Perfil de deslocamento transversal e forma modal do microcantilever em ressonância ($34,7 \mu\text{m}$).



Fonte: Elaboração própria (2026).

Esse deslocamento pode ser comparado ao comprimento total do microcantilever para avaliar a magnitude relativa da deformação, conforme o critério de pequena deflexão definido na Seção 3.5.3 (Equação 3.10). A razão $\delta/L \approx 0,029$ confirma que o microcantilever permanece no regime de pequena deformação, validando as hipóteses de Euler–Bernoulli adotadas na modelagem analítica do Capítulo 3. Esse resultado reforça a confiabilidade das aproximações lineares utilizadas nas análises anteriores.

A curvatura máxima, que ocorre próxima ao engaste, pode ser estimada a partir da teoria de vigas, em consonância com a métrica proposta na Seção 3.5.3 (Equação 3.11), a partir da teoria de vigas. Para uma viga engastada-livre no primeiro modo, a curvatura máxima pode ser aproximada por $84,8 \text{ m}^{-1}$.

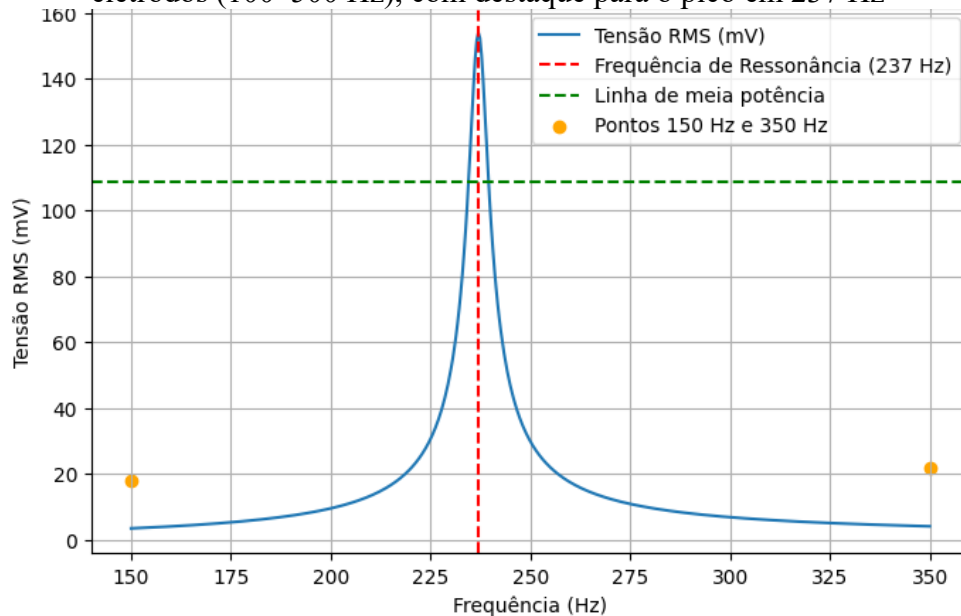
4.1.4 Resposta Elétrica do Microcantilever

Ao se aplicar à base do microcantilever uma excitação harmônica compatível com as vibrações medidas na carcaça do notebook durante a digitação, o modelo FEM com acoplamento piezoelétrico exibiu a distribuição de potencial elétrico na camada ativa e a tensão entre os eletrodos superior e inferior.

A curva da resposta em frequência, apresentada pela Figura 15, foi obtida variando a frequência de 100 Hz a 500 Hz e registrando a tensão RMS entre os eletrodos para cada

frequência. A curva evidencia um pico pronunciado em torno de 237 Hz para uma tensão (RMS) de 154 mV:

Figura 15 - – Curva ilustrativa de resposta em frequência da tensão RMS entre os eletrodos (100–500 Hz), com destaque para o pico em 237 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

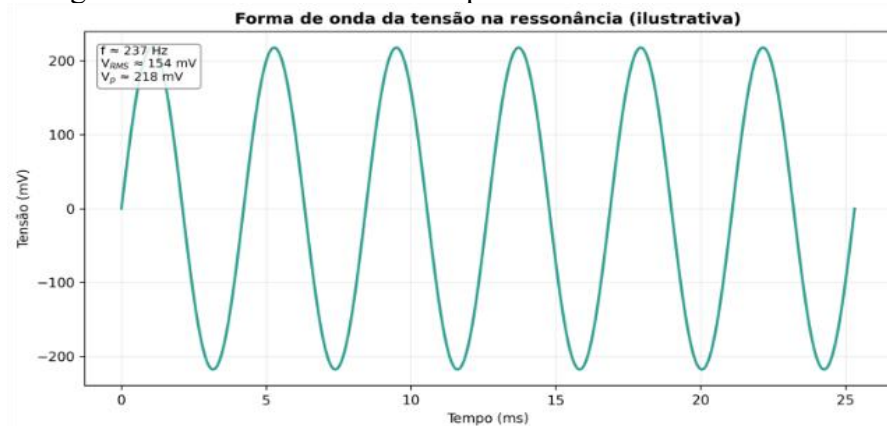
A figura 15 também evidencia que fora da ressonância, por exemplo em 150 Hz (abaixo da ressonância) e 350 Hz (acima da ressonância), a tensão RMS caiu para valores da ordem de 18 e 22 mV respectivamente, confirmando o comportamento típico de colhedores vibracionais sintonizados.

A largura de banda a meia potência (Δf) foi estimada a partir da curva de resposta, identificando as frequências nas quais a potência cai para metade do valor máximo (ou seja, onde a tensão cai para $V_{RMS} / \sqrt{2}$). A largura de banda obtida foi aproximadamente: 5 Hz.

O que permite calcular o fator de qualidade mecânica (Equação 3.13) e obter um resultado de $Q = 48$. Esse valor é consistente com microestruturas vibratórias operando em ar ambiente, em que o amortecimento viscoso do ar e perdas internas nos materiais limitam o fator de qualidade a valores tipicamente entre 30 e 60 (REZENDE et al., 2019).

Chegando na potência elétrica gerada, tendo em vista a carga resistiva conectada aos eletrodos do microcantilever ($120 \text{ k}\Omega$), a distribuição espacial do potencial elétrico (Figura 16) na camada piezoelétrica mostrou que a maior diferença de potencial ocorre na região próxima ao engaste, onde a curvatura e, portanto, a deformação é máxima. Essa distribuição é consistente com o modo de operação d_{31} , no qual a deformação longitudinal ao longo do comprimento do microcantilever gera polarização na direção da espessura.

Figura 16 -- Forma de onda temporal da tensão na ressonância



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A forma de onda temporal da tensão entre os eletrodos, sob excitação harmônica, é aproximadamente senoidal, com frequência igual à frequência de excitação ($f_i \approx 237$ Hz), o que facilita a retificação e o armazenamento de energia em capacitores ou supercapacitores. Embora a digitação seja um evento impulsivo, a análise em regime harmônico na frequência de ressonância representa o caso de máxima transferência de energia e, portanto, o cenário mais favorável para coleta.

4.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO COLHEDOR PROPOSTO

Com base nos resultados da simulação FEM apresentados na seção anterior e nas métricas consolidadas no Capítulo 3 (Seção 3.5), é possível avaliar o desempenho do coletor proposto em dois níveis: o microcantilever individual e a matriz de dispositivos integrada na área de 49 cm^2 ao lado do touchpad. Esta seção detalha as estimativas de potência, energia e densidade de potência, bem como o desempenho agregado da matriz.

4.2.1 Potência e Densidade de Potência em Nível de Dispositivo

A potência média fornecida em ressonância pode ser estimada por (Equação 3.5): $P_{uni} \approx 0,198 \mu W$. Considerando que um pressionamento típico de tecla tem duração aproximada de $T_{toque} = 80 \text{ ms}$ (BEKER et al., 2012), a energia elétrica gerada por um único microcantilever durante um evento de digitação é:

- $E_{toque,uni} = P_{uni} T_{toque} \approx 15,84 \text{ nJ}$.

Agora, considerando a área ocupada por um microcantilever encapsulado ($0,36 \text{ cm}^2$), a densidade de potência instantânea é:

- $\rho_{P,uni} \approx 0,55 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

4.2.2 Desempenho Agregado na Matriz de Microcantilevers

A configuração de matriz considerada neste trabalho é composta por $N = 70$ dispositivos, em um arranjo 10×7 na área de 49 cm^2 disponível ao lado do touchpad. Assim, a potência instantânea agregada:

- $P_{inst,matriz} = N P_{uni} = 13,86 \mu\text{W}$.

Analisando um novo cenário, em que se estima a potência média contínua, considerando a natureza incerta da digitação, costumasse adotar uma taxa de digitação de 3 Hz (3 toques por segundo). O ciclo de trabalho D (Equação 3.16) é dado por:

- $D = 0,24$.

Assim, a potência média contínua da matriz é:

- $P_{media,matriz} = 3,33 \mu\text{W}$

Com uma densidade de potência da matriz, dado por:

- $\rho_{P,matriz} = 0,283 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

4.2.3 Estimativa da geração de energia

Para avaliar o potencial prático de aplicação da matriz de microcantilevers, é necessário projetar a energia total coletada em cenários reais de utilização de notebooks. Adotando-se como premissa um tempo de uso padrão de 8 horas diárias, a energia total gerada torna-se dependente da intensidade de interação do usuário com o teclado, expressa pelo número de toques diários. Com base em dados estatísticos de comportamento digital (STATISTA, 2024), estabeleceram-se três perfis distintos de usuários para a análise: o usuário comum, o programador e o escritor ou jornalista.

O usuário comum é definido por um volume de 8.000 toques diários, representando o uso típico para navegação na internet e tarefas administrativas básicas. Para o perfil de

programador, assume-se uma intensidade maior, da ordem de 15.000 toques diários, devido à natureza contínua da escrita de código e comandos. Por fim, o perfil de escritor ou jornalista é caracterizado por 25.000 toques diários, refletindo uma produção textual densa e frequente. A partir dessas definições, a energia total diária é calculada pela integração da energia gerada em cada evento de toque pela matriz piezoelétrica, permitindo uma comparação direta entre os diferentes níveis de demanda e aproveitamento energético.

Conforme a Tabela 2, para cada perfil – usuário comum, programador, escritor/jornalista – tem-se, respectivamente:

Tabela 2 - Comparação com diferentes perfis de usuários

Perfil de Usuário	Intensidade (Toque/dia)	Energia Diária (mJ)
Usuário Comum	8.000	8,87
Programador	15.000	16,63
Escritor/Jornalista	25.000	27,72

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.3 COMPARAÇÃO COM DADOS DA LITERATURA

A avaliação do desempenho do coletor proposto em relação ao estado da arte permite identificar o posicionamento da tecnologia MEMS frente a diferentes abordagens de coleta de energia. As Tabelas 3 e 4 sintetizam a comparação a nível de dispositivo individual e de sistema agregado, respectivamente:

Tabela 3 - Comparação em nível de dispositivo individual

Autor	Tecnologia	Potência	Densidade de potência
Este Trabalho	MEMS (PZT/Si)	0,198 μW	0,55 μW/cm²
Beker et al. (2012)	Piezo a granel	16,95 μ W	11,3 μ W/cm ²
Sezer e Koç (2021)	Híbrido (TENG/PENG)	45,0 μ W	25,0 μ W/cm ²
Kim et al. (2014)	MEMS (PZT)	0,12 μ W	0,15 μ W/cm ²

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 4 - Comparação em nível de Matriz

Autor	Configuração	Potência Total	Densidade (sistema)
Este trabalho	Matriz (70 un.)	13,86 μW	0,283 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Beker et al. (2012)	Domo(~80 teclas)	1.356,00 μW	4,52 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Sezer e Koç (2021)	Mine-geradores	2.250,00 μW	9,00 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3.1 Análise Comparativa e Discussão Integrada

Uma análise comparativa revela que dispositivos baseados no impacto direto das teclas, como os de Beker et al. (2012) e Sezer e Koç (2021), alcançam potências absolutas significativamente superior ao deste trabalho. Isso ocorre porque o acionamento mecânico direto transfere uma energia cinética muito maior ao material piezoelétrico do que a vibração residual do chassi utilizado neste trabalho. Além disso, esses sistemas utilizam o teclado inteiro como área de coleta, o que explica a escala de miliwatts (mW) consumidos.

Entretanto, quando a análise foca na eficiência por unidade de área e na tecnologia de fabricação, uma proposta de solução demonstra vantagens estratégicas. Comparado a outros dispositivos MEMS baseados em vibração, como o de Kim et al. (2014), o microcantilever projetado apresenta desempenho superior (0,198 μW contra 0,12 μW), validando a eficiência do design para o regime de vibrações de notebooks (2,5 m/s^2).

Uma das principais vantagens da solução proposta reside em suas especificidades e natureza agnóstica ao mecanismo do teclado, isto é, a abordagem não depende do tipo de acionamento (membrana, tesoura/tesoura, borboleta ou mecânico) nem requer alterações na cinemática de cada tecla, a coleta ocorre a partir da vibração transmitida pela carcaça, permitindo que a mesma arquitetura de microcoletores seja adaptada a diferentes modelos com mudanças predominantemente dinâmicas de integração. Essa característica permite que a mesma arquitetura de MEMS seja escalável para qualquer dispositivo portátil, independentemente do layout ou tecnologia de entrada de dados.

Sob a ótica da ergonomia, essa abordagem garante que não haja qualquer alteração na força de atuação das teclas ou no curso de digitação (*key travel*), preservando integralmente a experiência do usuário. A validação objetiva dessa escolha técnica é apresentada na Tabela 5,

que compara a presente proposta com outras metodologias de coleta de energia citadas na literatura.

Tabela 5 - Comparação qualitativa e técnica entre métodos

Critério de Comparação	Matriz MEMS no Chassi (Proposta)	Piezoelétrico sob as Teclas	Geradores Eletromagnéticos	Células Termoeletricas (TEG)
Potência por Área	Moderada (Otimizada por MEMS)	Alta (Localizada)	Muito Alta	Baixa
Complexidade de Montagem	Baixa (Módulo único no chassi)	Altíssima (Individual por tecla)	Alta (Exige volume mecânico)	Média (Exige gradiente térmico)
Impacto na Experiência (Ergonomia)	Nulo (Não invasivo)	Alto (Altera o tato/clique)	Médio (Aumenta peso/ruído)	Nulo
Durabilidade Mecânica	Alta (Protegido internamente)	Baixa (Fadiga por impacto direto)	Média (Partes móveis)	Alta (Estado sólido)
Custo de Integração	Baixo (Escalável)	Alto (Customizado por modelo)	Alto	Médio

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), Beker et al. (2012) e Sezer e Koç (2021)

4.4 IMPLICAÇÕES PARA A APLICAÇÃO EM TECLADOS

Os resultados apresentados nas seções anteriores permitem discutir as implicações práticas da implementação de um sistema de coleta de energia baseado em microcantilevers

piezoelétricos em teclados de notebooks comerciais. Esta seção aborda aplicações viáveis, vantagens de integração, limitações identificadas e perspectivas futuras.

4.4.1 Aplicações viáveis

Os resultados obtidos indicam que uma matriz de microcantilevers, operando sob a carga de referência, é capaz de suportar dispositivos que operam em regime intermitente ou em modo de espera (standby). As principais aplicações identificadas para o ambiente de um notebook comercial são:

- Monitoramento de Saúde do Chassi: Alimentação de acelerômetros MEMS de ultrabaixo consumo e sensores de deformação para registrar quedas ou impactos anômalos sofridos pelo notebook, mesmo quando o sistema principal está desligado. (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2003).
- Sensores Ambientais Inteligentes: Sensores de temperatura, umidade ou qualidade dos ambientes internos que monitoram as condições de operação dos componentes críticos, enviando dados via protocolos de baixo consumo (como I2C ou BLE) (MITCHESON et al., 2008).
- Segurança e Antifurto: Alimentação de circuitos de detecção de intrusão ou sensores de proximidade que permanecem ativos para alertar sobre movimentações não autorizadas do equipamento enquanto ele estiver em modo de suspensão (PARADISO; STARNER, 2005).
- Extensão de Bateria de Periféricos Internos: Auxílio na manutenção da carga de pequenos capacitores que alimentam o relógio de tempo real (RTC) ou memórias voláteis de configuração (BIOS/UEFI), mantendo a dependência da bateria principal para funções de manutenção mínima. (BEEBY; TUDOR; WHITE, 2006).

4.4.2 Análise de Autonomia e Viabilidade Energética

Para validar as soluções, considere o consumo de um sensor de temperatura comercial de baixo consumo (ex: série TMP da Texas Instruments), que requer aproximadamente 0,5 μ J para realizar uma leitura e conversão de dados (TEXAS INSTRUMENTS, 2020).

Com a energia diária colhida pela matriz (8,87 mJ), por um usuário comum, o sistema seria capaz de realizar:

$$N_{leituras} = \frac{8.87 \text{ mJ}}{0.5 \mu\text{J}} \approx 17.740 \text{ leituras/dia}, \quad (4.1)$$

isso equivale a uma frequência de amostragem de aproximadamente uma leitura a cada 5 segundos durante as 24 horas do dia, utilizando exclusivamente a energia mecânica convertida da digitação. Se considerarmos a potência média contínua de 3,33 μW , o sistema pode manter microcontroladores ativos no modo Sleep que consomem tipicamente entre 0,5 μW e 1,5 μW (TEXAS INSTRUMENTS, 2015), acordando-os periodicamente para analisar informações. Ampliando a abordagem, enquanto o usuário comum (8,87 mJ/dia) já é capaz de sustentar a operação de sensores e circuitos de relógio, os perfis de programador (16,63 mJ/dia) e escritor/jornalista (27,72 mJ/dia) proporcionam um excedente energético que permite funcionalidades mais complexas, como o aumento da frequência de amostragem de dados ou a alimentação de microcontroladores em modos de operação mais ativos.

Para quantificar a viabilidade prática, a Tabela 6 estabelece um comparativo entre a demanda diária de dispositivos de baixa potência e a oferta energética de cada perfil de usuário estabelecido, considerando o horizonte de 8 horas de utilização diária do notebook.

Tabela 6 – Comparativo de viabilidade energética por perfil de usuário

Dispositivo/Aplicação	Demanda Diária (mJ)	Viabilidade – Comum	Viabilidade – Programador	Viabilidade – Escritor
Relógio de Tempo Real (RTC)	0,17	Alta	Alta	Alta
Sensor de Temp. (uma leit./min)	0,02	Alta	Alta	Alta
Transmissão BLE (um ev./hora)	1,20	Suficiente	Alta	Alta
Microcontrolador (Modo Sleep)	0,30	Suficiente	Alta	Alta

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados de consumo baseados em Roundy (2005) e Dutoit et al. (2005).

A análise comparativa revela que a energia coletada pela matriz de 70 microcantilevers supera a demanda de componentes críticos em todos os cenários analisados. Para o perfil de escritor/jornalista, a energia gerada é mais de 160 vezes superior à necessidade de um RTC, o

que abre caminho para a implementação de sistemas de gerenciamento de energia (Power Management Units - PMU) mais sofisticados, capazes de armazenar o excedente em supercapacitores para uso em períodos de inatividade. Mesmo para o programador, a margem de segurança para a transmissão de dados via Bluetooth Low Energy (BLE) é extremamente confortável, garantindo a confiabilidade da comunicação sem fio. Portanto, os resultados confirmam que a energia proveniente da digitação é capaz de promover a autonomia energética de subsistemas internos, validando a proposta como uma solução sustentável e resiliente para dispositivos portáteis.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Este trabalho teve o objetivo de modelar e avaliar um sistema de coleta de energia baseado em uma matriz de microcantilevers piezoelétricos MEMS para notebook. A investigação confirmou que a área adjacente ao touchpad é um local tecnicamente viável para a integração desses dispositivos, aproveitando vibrações mecânicas da digitação sem comprometer a ergonomia do teclado. As principais conclusões derivadas das análises analíticas e numéricas são:

- Sintonia de Frequência: O dispositivo projetado apresentou frequência de ressonância de 237 Hz, alinhada ao espectro vibracional da digitação. A convergência entre os modelos analítico e numérico (desvio < 3%) validou a metodologia de dimensionamento.
- Integridade Estrutural: As tensões de von Mises mantiveram-se abaixo dos limites de ruptura dos materiais (Silício e PZT-5H), garantindo a viabilidade mecânica para operação em regime de fadiga de alto ciclo.
- Desempenho Energético: Em nível de matriz (70 dispositivos), obteve-se uma potência média estimada em 3,3 μW e acúmulo energético de até 8,87 mJ/dia. Os valores são plenamente capazes de sustentar sensores de baixo consumo e módulos de monitoramento. Em suma, a hipótese inicial foi confirmada: é possível converter a energia mecânica residual da interação usuário-máquina em eletricidade útil para subsistemas autônomos, contribuindo para a eficiência energética de dispositivos portáteis.

5.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Apesar da consistência dos resultados, o estudo apresenta limitações:

- Abordagem Estritamente Numérica: Os resultados baseiam-se em simulações de Elementos Finitos (FEM) não contabilizando variações de fabricação ou não-linearidades de contato.
- Simplificação da Excitação: Utilizou-se um cenário representativo de digitação em vez de medições experimentais diretas da aceleração na carcaça de modelos comerciais específicos.

- Ausência de caracterização do chassi/carcaça do notebook: A análise atual não contempla as propriedades metálicas específicas (módulo de Young, densidade) do material da carcaça do notebook utilizado, assumindo condições de contorno genérico para a propagação de vibração.

5.3. TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade desta linha de pesquisa, propõem-se os seguintes desdobramentos:

- Validação Experimental: A etapa subsequente primordial consiste na fabricação de protótipos em escala MEMS, utilizando processos como o *PiezoMUMPS* proposto na fundamentação. Propõe-se uma caracterização experimental desses dispositivos em bancada equipados com um excitador eletrodinâmico (*shaker*), permitindo a aplicação de acelerações controladas.
- Caracterização do chassi: propõe-se identificar o material predominante da carcaça e estimar suas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, densidade e amortecimento) e, em seguida, realizar uma análise modal (numérica e/ou experimental) da carcaça do notebook. A partir disso, deve-se determinar a Função de Transferência entre o ponto de excitação (região do teclado/teclas) e o ponto de integração (localidade da matriz), quantificando a atenuação e a filtragem mecânica introduzida pelo chassi, aumentando a fidelidade das estimativas de potência.
- Mapeamento Vibracional: Instrumentação com acelerômetros para obter o espectro real de vibração em diferentes perfis de uso (jogos, produtividade).
- Otimização Multiobjetivo: Explorar novas geometrias (formatos não-retangulares) e materiais piezoelétricos livres de chumbo (como o AlN) para maximizar a densidade de potência.
- Eletrônica de Potência: Desenvolver circuitos de gerenciamento de energia (Energy Harvesting ICs) de alta eficiência, específicos para as baixas tensões geradas pela matriz.
- Estudos de Confiabilidade: Avaliar o impacto térmico e a degradação das propriedades piezoelétricas ao longo de milhões de ciclos de operação.

REFERÊNCIAS

- CERVEJA, FP et al. **Mecânica dos materiais** . 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- BEKER, L. et al. Um coletor de energia piezoelétrico para monitoramento da força de digitação em teclados. **Sensors and Actuators A: Physical** , v. 179, p. 186-192, 2012.
- BOGUE, R. Sensores MEMS: uma revisão de empresas e aplicações. **Sensor Review** , v. 33, n. 1, p. 3-8, 2013.
- COSTA, RM **Modelagem e caracterização de microcantilevers piezoelétricos para coleta de energia** . 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
- COWEN, A. e outros. **Manual de projeto de PiezoMUMPs** . 1.ed. Durham: MEMSCAP, 2014.
- DUTOIT, NE et al. Considerações de projeto para coletores de energia piezoelétricos em escala MEMS. **Integrated Ferroelectrics** , v. 71, n. 1, p. 121-137, 2005.
- GARDNER, JW et al. **Microsensores, atuadores e sistemas** . 1ª ed. Nova Iorque: CRC Press, 2001.
- GHODSSI, R.; LIN, P. **Manual de materiais e processos MEMS** . 1ª ed. Nova York: Springer, 2011.
- HUANG, J. et al. Uma revisão sobre coletores de energia piezoelétricos MEMS. **IEEE Access** , v. 7, p. 11771-11783, 2019.
- JAFFE, B. et al. **Cerâmicas piezoelétricas** . 1ª ed. Londres: Academic Press, 1971.
- KOVACS, GTA **Micromachined transducers sourcebook** . 1ª ed. Boston: McGraw-Hill, 1998.
- LEMAITRE, J.; CHABOCHE, JL. **Mecânica dos materiais sólidos** . 1ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- MACHADO, R. et al. **Geração de energia elétrica** . 1.ed. São Paulo: Érica, 2015.

MAHARJAN, P. et al. Um coletor de energia híbrido de alto desempenho para aplicações de interface homem-máquina. **Nano Energy** , v. 80, p. 105514, 2021.

MEIROVITCH, L. **Fundamentos de vibrações** . 1ª ed. Boston: McGraw-Hill, 2001.

NANDPURE, S.; KELKAR, A. Coleta de energia piezoelétrica a partir de vibrações de teclado. **Journal of Physics: Conference Series** , v. 2526, p. 012011, 2023.

PARADISO, JA; STARNER, T. Coleta de energia para eletrônicos móveis e sem fio. **IEEE Pervasive Computing** , v. 4, n. 1, p. 18-27, 2005.

PRIYA, S.; INMAN, DJ **Tecnologias de aproveitamento de energia**. 1ª ed. Nova York: Springer, 2009.

RAO, SS **Vibrações mecânicas**. 4.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

REN21. **Relatório sobre o estado global das energias renováveis em 2023**. Paris: Secretariado da REN21, 2023.

ROUNDY, S. **Eliminação de energia para nós de sensores sem fio com foco em vibração**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade da Califórnia, Berkeley, 2005. ROUNDY, S.; WRIGHT, PK; RABAEY, J. **Coleta de energia para redes de sensores sem fio** . 1ª ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.

SENTURIA, SD. **Projeto de microssistemas** . 1ª ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

STARNER, T. Computação impulsionada por humanos. **IBM Systems Journal** , v. 35, n. 3.4, p. 618-629, 1996.

TIMOSHENKO, S.; GERE, JM. **Teoria da estabilidade elástica** . 2ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 1961.

UCHINO, K. **Atuadores piezoelétricos e motores ultrassônicos** . 1ª ed. Nova York: Springer, 2015.

VON MISES, R. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. **Göttinger Nachrichten, Math.-Phys. Classe** , pág. 582-592, 1913.

VULLERS, RJM et al. Coleta de energia de micropotência. **Eletrônica de estado sólido**, v. 53, n. 7, p. 684-693, 2009.

COMSOL. COMSOL Multiphysics® [versão 4.4]. Stockholm: COMSOL AB, 2023. Disponível em: <https://www.comsol.com>. Acesso em: 14 dez. 2025.

APÊNDICE A - ROTEIRO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO MULTIFÍSICA NO COMSOL MULTIPHYSICS

Este apêndice detalha o processo de simulação por Elementos Finitos (FEM) utilizado para a validação do micro cantiléver piezoelétrico descrito nos capítulos 3 e 4. O objetivo é fornecer um guia reproduzível para análise de coletores de energia vibracional em tecnologia MEMS.

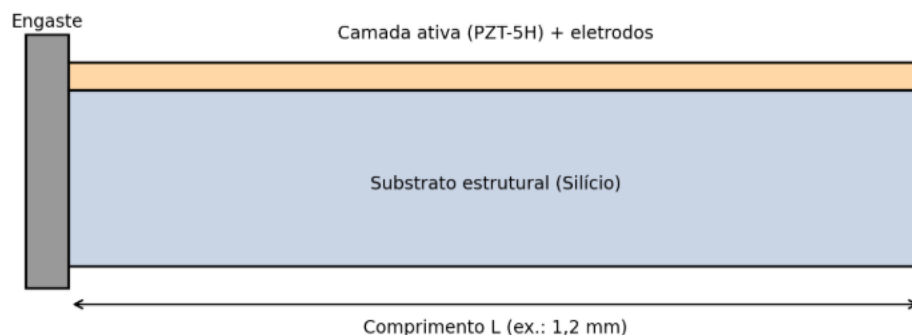
A.1 CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE E GEOMETRIA

A simulação é iniciada no *Model Wizard*, selecionando o espaço 3D. As interfaces físicas adicionais são *Solid Mechanics* e *Electrostatics*, conectadas pelo acoplamento *Multiphysics: Piezoelectric Effect*.

A geometria é construída em camadas conforme a Tabela 1:

- Substrato: Bloco de Silício (1,2 mm x 120 μm x 200 μm).
- Camada Ativa: Bloco de PZT – 5H (1,2 mm x 120 μm x 1,5 μm) posicionado sobre o substrato.
- Eletrodos: Definidos como condições de contorno de superfície (*Ground e Terminal*) nas faces superiores e inferiores da camada ativa

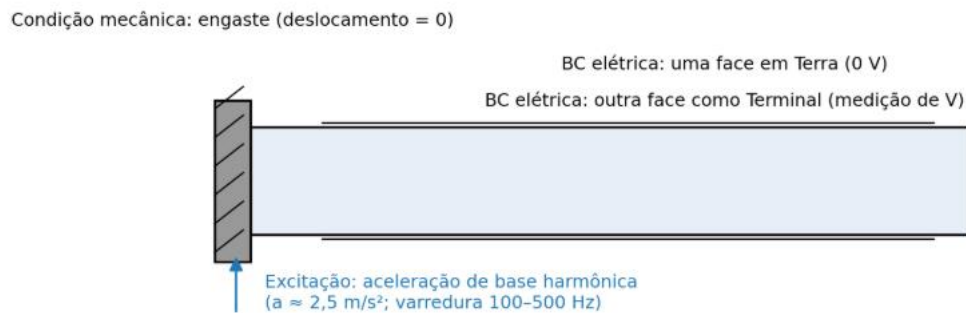
Figura A.1 – Representação das camadas e dimensões no domínio computacional.



A.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E MALHA

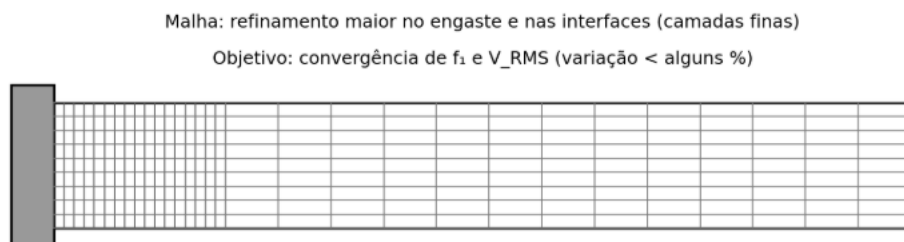
Para restringir a condição de viga engastada-livre, aplica-se a restrição *Fixed Constraint* em uma das faces transversais. A excitação é configurada como uma aceleração de base (*Base Excitation*) de $2,5 \text{ m/s}^2$ na direção vertical (eixo Z).

Figura A.2 – Aplicação de cargas mecânicas e terminais elétricos.



A malha utiliza elementos hexaédricos com varredura (*swept mesh*) para garantir que a espessura de $1,5 \text{ }\mu\text{m}$ do PZT seja discretizada com precisão. O refinamento é intensificado na região do engaste, onde o gradiente de tensão de von Mises é máximo.

Figura A.3 – Detalhe do refinamento de malha na região de maior curvatura.

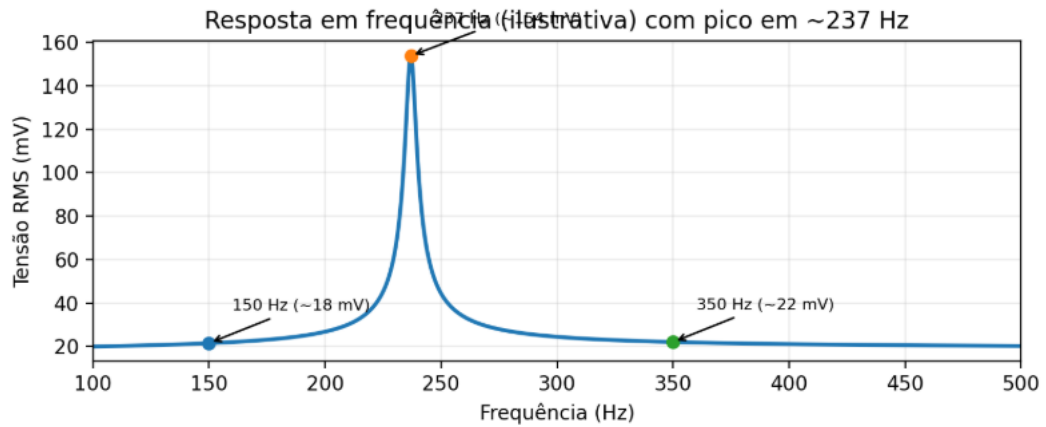


A.3 ESTUDOS E EXTRAÇÃO DE RESULTADOS

Dois estudos principais são conduzidos:

- *Eigenfrequency*: Para localizar a frequência natural fundamental ($f_1 \approx 237 \text{ Hz}$).
- *Frequency Domain*: Varredura de 100 a 500 Hz para obter a curva de resposta em frequência

Figura A.4 – Resposta em frequência da tensão RMS gerada.



A potência é extraída através da integração da densidade de perda de energia ou pela aplicação de uma carga resistiva externa conectada ao terminal.