

**Universidade Federal de Alagoas
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Curso de Engenharia de Energia**



PAULO LIMA LACERDA NETO

**ESTUDO DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA INDUZIDA POR VIBRAÇÕES
MECÂNICAS**

Rio Largo - Alagoas
2025

PAULO LIMA LACERDA NETO

**ESTUDO DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA INDUZIDA POR VIBRAÇÕES
MECÂNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de ENGENHARIA DE ENERGIA da Universidade Federal de Alagoas – Ufal, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias - Ceca, como requisito parcial à obtenção do título de graduação em Engenharia de Energia.

Rio Largo – Alagoas

2025

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

L131e Lacerda Neto, Paulo Lima.

Estudo de microgeração de energia induzida por vibrações mecânicas. / Paulo Lima Lacerda Neto. – 2025.

41f.: il.

Orientador(a): Abdeladhim Tahimi.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) –
Graduação em Engenharia de Energia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias,
Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2025.

Inclui bibliografia

1. Vibrações mecânicas. 2. Eletricidade. 3. Material piezoelétrico. 4. Piezoelétrico. I.
Título.


CDU: 620.9: 621.3

Folha de Aprovação

PAULO LIMA LACERDA NETO

ESTUDO DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA INDUZIDA POR VIBRAÇÕES MECÂNICAS


Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à banca examinadora do
curso de Engenharia de Energia da
Universidade Federal de Alagoas e
aprovada em 20 de MARÇO de 2025.

Documento assinado digitalmente
 ABDELADHIM TAHIMI
Data: 08/04/2025 16:38:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Orientador

Abdeladhim Tahimi

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ANDERSSON GUIMARAES OLIVEIRA
Data: 07/04/2025 16:46:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**(Examinador(a) Externo(a) – Dr. Andersson Guimarães Oliveira,
Universidade Federal de Campina Grande)**

Documento assinado digitalmente
 ALANA KELLY XAVIER DE BARROS BRANCO
Data: 07/04/2025 19:01:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**(Examinador(a) Interno(a) – Dra. Alana Kelly Xavier de Barros Branco,
Universidade Federal de Alagoas)**

Agradecer a Deus pela saúde, conforto, capacidade, força e fé, e aos meus pais, Paulo Filho e Joseliny Xavier por me proporcionarem discernimento, educação, princípios e valores.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, por me conceder força e sabedoria ao longo desses anos e por ter me dado capacidade, força e fé de sempre trabalhar e buscar conhecimento.

Aos meus pais, Paulo Filho e Joseliny Xavier, pela paciência e dedicação ao me dar educação, valores, princípios e apoio para sempre ter coragem de seguir em frente.

Aos meus avós, tias e tios, meus irmãos, primos, primas e toda a minha família que estiveram comigo direta e indiretamente durante minha jornada.

A minha namorada e amiga, Isabel, por toda paciência e apoio durante todo o tempo.

Aos meus colegas de curso, que sempre estiveram ao meu lado, trocando ideias e experiências.

Agradeço aos meus orientadores, professor Dr. Andersson Guimaraes Oliveira e o professor Dr. Abdeladhim Tahimi, pelo apoio, orientação e paciência durante todo o processo de elaboração deste trabalho. Seus ensinamentos foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao Laboratório de Vibrações e Instrumentação da UFCG, na pessoa do professor Antônio Almeida Silva, seu coordenador, que cedeu toda a estrutura necessária para realização dos ensaios experimentais.

RESUMO

A geração de energia elétrica por meio de vibrações mecânicas é uma abordagem inovadora e sustentável que utiliza a conversão da energia cinética proveniente de movimentos vibratórios em eletricidade. Existem diferentes tecnologias para capturar e transformar as vibrações mecânicas em eletricidade, incluindo dispositivos piezoelétricos, sistemas de ressonância magnética e geradores eletromagnéticos. Os dispositivos piezoelétricos, por exemplo, são capazes de gerar corrente elétrica quando um material piezoelétrico é submetido a tensões mecânicas, como vibrações, com foco no uso de materiais piezoelétricos como alternativa sustentável para conversão de energia mecânica em elétrica. Explorando aspectos fundamentais, como o design e a eficiência dos dispositivos de conversão, os padrões de vibração disponíveis em diferentes ambientes e seus potenciais aplicações em diversas áreas. A pesquisa foi conduzida por meio de experimentos laboratoriais que permitiram a caracterização do comportamento de pastilhas piezoelétricas sob diferentes condições de estresse mecânico. Os resultados demonstraram que a melhor faixa de frequência para conversão eficiente de energia situa-se entre 1 e 5 Hz, comprovando a eficácia do material piezoelétrico na captação de vibrações. Além disso, foram identificadas diversas aplicações potenciais para essa tecnologia, incluindo sensores, dispositivos eletrônicos de baixa potência e estudos de vibração em estruturas rígidas e equipamentos de precisão. Essa forma de geração de energia apresenta diversas vantagens, tais como a capacidade de aproveitar fontes de energia naturalmente disponíveis, como vibrações ambientais, movimentos do oceano ou tráfego veicular. Além disso, a utilização de tecnologias de geração por vibrações mecânicas pode ser uma solução eficiente em locais remotos ou em estruturas sujeitas a vibrações constantes. Embora ainda esteja em fase de desenvolvimento, a geração de energia elétrica por meio de vibrações mecânicas mostra grande potencial para complementar as fontes convencionais de energia e contribuir para a diversificação da matriz energética.

Palavras-chave: vibrações mecânicas; eletricidade; material piezoelétrico; piezoelétrico.

ABSTRACT

The generation of electrical energy through mechanical vibrations is an innovative and sustainable approach that converts kinetic energy from vibratory movements into electricity. There are different technologies for capturing and transforming mechanical vibrations into electricity, including piezoelectric devices, magnetic resonance systems, and electromagnetic generators. Piezoelectric devices, for example, can generate an electric current when a piezoelectric material is subjected to mechanical stress, such as vibrations, focusing on the use of piezoelectric materials as a sustainable alternative for converting mechanical energy into electrical energy. This study explores fundamental aspects such as the design and efficiency of conversion devices, the vibration patterns available in different environments, and their potential applications in various fields. The research was conducted through laboratory experiments that enabled the characterization of the behavior of piezoelectric plates under different mechanical stress conditions. The results showed that the optimal frequency range for efficient energy conversion is between 1 and 5 Hz, confirming the effectiveness of piezoelectric materials in capturing vibrations. Additionally, various potential applications for this technology were identified, including sensors, low-power electronic devices, and vibration studies in rigid structures and precision equipment. This form of energy generation offers several advantages, such as the ability to harness naturally available energy sources, including environmental vibrations, ocean movements, or vehicular traffic. Moreover, the use of mechanical vibration energy generation technologies can be an efficient solution in remote locations or structures subject to constant vibrations. Although still in the development phase, the generation of electrical energy through mechanical vibrations shows great potential to complement conventional energy sources and contribute to the diversification of the energy matrix.

Keywords: mechanical vibrations; electricity; piezoelectric material; piezoelectric.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Publicações sobre Energy Harvesting de 1990 - 2016	10
Figura 2 - Fluxograma de um sistema básico completo	10
Figura 3 - Estrutura Perovskita das cerâmicas piezolétricas do tipo PZT	14
Figura 4 - Foto de um cristal de quartzo	15
Figura 5 - Projeção das posições atômicas do quartzo.	15
Figura 6 - Estrutura molecular simplificada do quartzo.	16
Figura 7 - O efeito piezoelétrico na estrutura molecular do quartzo.	16
Figura 8 - Comportamento Deformação (S) x Tensão mecânica (T).	18
Figura 9 - Relação entre campo elétrico (E) e deslocamento elétrico (D).....	19
Figura 10 - Sistema de coordenadas de um cubo piezoelétrico.	21
Figura 11 - Formato matricial	24
Figura 12 - Formato matricial	24
Figura 13 - Formato matricial expandido	25
Figura 14 - Modelo constitutivo reduzido no formato matricial	26
Figura 15 - Modos de excitação do Piezoelétrico.....	27
Figura 16 - Dimensões da pastilha piezoelétrica.....	29
Figura 17 - Modelo de pastilha piezoelétrica utilizada nos ensaios	29
Figura 18 - Preparo de equipamentos em bancada.....	30
Figura 19 - Bancada com experimento montado.....	31
Figura 20 - Pastilha PZT engastada na haste e no suporte	32
Figura 21 - Exemplo de resultado mostrado na tela do computador	32
Figura 22 - Multímetro medindo os pulsos elétrico da pastilha PZT	34
Figura 23 - Gráfico da tensão x tempo	35
Figura 24 - Gráfico da tensão x tempo com ondas em detalhe.	35
Figura 25 - Gráfico da tensão x tempo marcado	36
Figura 26 - Gráfico da Amplitude x Frequência	37

LISTA DE ABREVIATURAS

Ufal	Universidade Federal de Alagoas
Ceca	Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
PZT	Titanato de Chumbo e Zircônio (material piezoelétrico)
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno (polímero piezoelétrico)
MFC	Compósito de Macrofibras
APC	American Piezo Ceramics
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Contextualização	9
1.2 Objetivos gerais e específicos.....	11
1.3 Estrutura do texto	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 Piezoelectricidade	13
3.1.2 O efeito piezoelétrico em um cristal de quartzo	14
3.2 Introdução as equações constitutivas dos materiais piezoelétricos	17
3.2.1 Efeito direto	17
3.2.2 Efeito inverso	19
3.3 Equações constitutivas dos materiais piezoelétricos.....	20
3.3.1 Equações constitutivas compactas dos materiais piezoelétricos	23
3.4 Modo de operação dos transdutores piezoelétricos	27
3.5 Possíveis aplicações das pastilhas piezoelétricas	28
3.5.1 Dispositivos de piezocirurgia.....	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Materiais utilizados	29
4.2 Métodos	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1 Execução dos testes	33
5.2 Teste simples com multímetro	33
5.3 Caracterização do gráfico da tensão	34
5.3 Caracterização do gráfico da amplitude x frequência.....	36
6 CONCLUSÃO	38
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nos últimos anos, foi visto um crescimento exponencial das energias renováveis, principalmente solar e eólica, devido a necessidade de investir nessas fontes limpas e, também, por conta dos agravantes ambientais. Tendo em vista esse cenário, a maior parte do investimento em pesquisa é feito com a finalidade de descobrir e criar tecnologias. A tecnologia que chama bastante atenção é a geração de energia elétrica através de vibrações mecânicas, cuja fonte de excitação é das mais diversas, dentre essas, o efeito flutter, que é uma instabilidade dinâmica causada pela ação do vento em determinada estrutura.

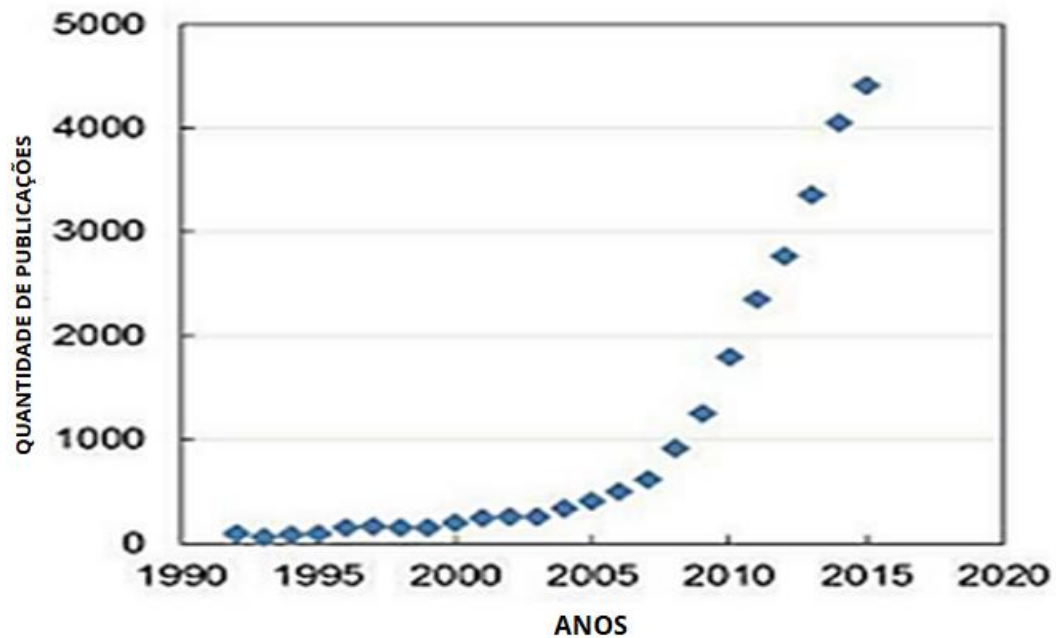
Essa tecnologia emprega um material “piezoelétrico”, que quando submetido a estresse mecânico gera cargas elétricas. Alguns materiais piezoelétricos estão disponíveis comercialmente, em forma de pastilhas dispostas em lâminas. Esse arranjo é aplicado como transdutor elétrico/mecânico, tanto quanto atuador quanto gerador de eletricidade, sendo induzido por tensão mecânica. Essa forma de obter energia elétrica por vibrações também pode ser chamada de “*power harvesting*”, pois é um meio muito promissor quando se trata de sistemas que utilizam baixo consumo energético.

Atualmente, existem alguns exemplos de aplicações que utilizam essa tecnologia de geração de energia através de material piezoelétrico, como: máquinas rotativas que são monitoradas, onde a alimentação é realizada com um dispositivo específico para este fim (KHAMENEIFAR; ARZANPOUR; MOALLEM, 2013).

Assim, esse trabalho, numa abordagem teórico-experimental, busca avaliar o uso de lâminas de material piezoelétrico para microgeração de energia.

Abaixo, na figura, contém a quantidade de trabalhos que envolvem o tema *Energy Harvesting*, utilizando materiais piezoelétricos nos últimos anos.

Figura 1 - Publicações sobre Energy Harvesting de 1990 - 2016



Fonte: Adaptado de Piezoelectric Energy Harvesting, Maiwa, H.

Um diagrama de um sistema genérico de extração de energia é mostrado na Figura 2. O processo tem início com a obtenção da energia pelo transdutor piezolétrico através das vibrações do ambiente, o sistema de gerenciamento obtém essa energia de uma maneira eficiente, e, por fim, eventualmente, o sistema de armazenamento recebe e armazena a energia excedente da captação para utilizar posteriormente.

Figura 2 - Fluxograma de um sistema básico completo



Fonte: Lacerda IS, Silva AA, Fernandes EM, Senko R, Oliveira AG, Delgado JMPQ, Diniz DDS, Figueiredo MJ, Lima AGB. **Análise Comparativa de Transdutores.**

Logo, este tipo de geração é mais voltado para sistemas que necessitem de baixo consumo energético.

1.2 Objetivos gerais e específicos

Obter energia elétrica a partir de vibrações mecânicas sobre os materiais piezoelétricos.

O presente trabalho tem como objetivos gerais e específicos:

- Analisar e apresentar um sistema *energy harvesting* utilizando-se de um transdutor piezoelétrico;
- Caracterizar o potencial de energia elétrica gerada pelo piezoelétrico;
- Identificar os parâmetros do sistema de geração de energia.

1.3 Estrutura do texto

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: no Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica sobre o tema abordado. No Capítulo 3, são expostas a fundamentação teórica e a modelagem do sistema. No Capítulo 4, descreve-se a metodologia experimental utilizada, bem como os componentes do sistema. No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fenômeno da piezoelectricidade foi descoberto no ano de 1880 pelos físicos franceses Jacques e Pierre Curie, esse fenômeno acontece quando um material é submetido a um esforço mecânico, gerando energia elétrica. Esta propriedade é apresentada em materiais com dipolos elétricos alinhados, sendo de forma natural ou artificial, onde o potencial elétrico é uma consequência proporcional da movimentação causada pelo esforço mecânico. Desde o ano de 1880 a piezoelectricidade vem sendo estudada e observada, pesquisando principalmente as estruturas de cristais que conseguem gerar uma carga elétrica.

Durante as décadas de 40 e 50, a URSS e o Japão desenvolveram as cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário (BaTiO_3), material usado neste estudo. Os EUA desenvolveram as cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo ($\text{Pb}[\text{Zr}_x \text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$) e Titanato de chumbo (PbTiO_3), como fontes de estudos. (ARMENDANI, 2016).

O material piezolétrico natural mais conhecido é o quartzo, enquanto entre milhares de materiais sintéticos, os mais amplamente utilizados e melhor compreendidos são as cerâmicas ferroelétricas pertencentes a soluções sólidas de zirconato de chumbo e titanato de chumbo.

No ano de 1967, um pedido de registro de patente foi feito (US HEALTH; HO, 1969), que descrevia um modelo de transdutor piezolétrico para implantes no corpo humano. Sugeriu-se uma viga em balanço com material piezolétrico, um cristal de PZT-5H, no interior de um invólucro de vidro, plástico ou metal, resistente à corrosão provocada pelos fluidos do corpo. Assim, com a movimentação, a base desse envoltório se deslocava e, conseqüentemente, causava vibração mecânica na viga. (LACERDA, I. S., 2021).

Já no ano de 1996, Williams e Yates propuseram iniciar os testes para geração de energia elétrica através de vibrações mecânicas. Existem hoje quatro mecanismos de transformação de energia, são eles: eletrostático (BEEBY et al. 2007), eletromagnético (MITCHESON, et al. 2004), magnetoestritivo (WANG, YUAN, 2008) e o piezoelétrico (ERTURK; INNAM, 2009).

No artigo “*Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for battery recharging*” (Sodano, H., Inman, D., & Park, G. (2005)), é apresentado um tipo de geração com base em elementos piezoelétricos com dois métodos de armazenamento, o capacitor e bateria de níquel- hidreto metálico, sendo que o capacitor tem sido o método de maior utilização para armazenar o potencial elétrico produzido.

Ainda em “*Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for battery recharging*” (Sodano, H., Inman, D., & Park, G. (2005)), três tipos de dispositivos piezoelétricos são investigados e testados experimentalmente para determinar cada uma de suas habilidades de transformar vibração ambiente em energia elétrica e sua capacidade de recarregar uma bateria descarregada. Os três tipos de dispositivos piezolétricos testados são o comumente usados material piezo cerâmico monolítico chumbo-zirconato-titanato (PZT), o atuador bimorfo Quick Pack (QP) e o compósito de macrofibras (MFC). Os resultados experimentais estimam a eficiência dos três dispositivos testados e identificam a viabilidade de seu uso em aplicações práticas. Baterias de diferentes capacidades são recarregadas usando cada dispositivo, para determinar o tempo de carga e a capacidade máxima da bateria que pode ser carregada.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Piezoelectricidade

O termo piezoelectricidade tem origem no alfabeto grego, derivado da palavra "piezein", que significa apertar ou pressionar. Esse conceito foi combinado com a palavra electricidade, resultando na definição de piezoelectricidade como a conversão de um movimento mecânico em electricidade por meio de compressão. Atualmente, muitos pesquisadores estão dedicando esforços para aprimorar essa tecnologia (Silva, Robson, 2018).

Em 1880, na França, os irmãos Pierre e Jacques Curie perceberam que certos cristais se deformavam ao ser submetidos a um diferencial de carga elétrica, descobrindo, assim, a piezoelectricidade.

Porém, os irmãos não previram o efeito inverso desse fenômeno, o qual era possível obter um diferencial elétrico ao deformar o cristal. A reversibilidade do efeito foi constatada matematicamente no ano seguinte por Gabriel Lippmann, e confirmada imediatamente pelos irmãos Curie. Desde então a piezoelectricidade vem sendo estudada, explorando principalmente as estruturas cristalinas que conseguem gerar carga elétrica (SOUZA, *et al.* 2018).

É definido então que a piezoelectricidade é uma propriedade que determinados materiais dielétricos tem que quando submetidos a uma determinada tensão elétrica, apresentam uma deformação mecânica, o mesmo acontece inversamente, quando o material sofre deformação mecânica, ele produz electricidade.

O efeito piezoelétrico ocorre de forma natural em um número elevado de cristais puros, sendo alguns deles de quartzo, a turmalina e o tartarato de potássio e sódio. Para estes cristais apresentarem o efeito piezoelétrico, devem apresentar a estrutura interna com um centro sem simetria. Uma componente de tensão mecânica aplicada a este tipo de cristal irá alterar a distância dos elementos de cargas positivas e negativas em uma célula elementar, causando assim uma polarização elétrica na superfície do cristal. Este efeito é aproximadamente linear, assim a intensidade da polarização varia proporcionalmente com a intensidade e direção da tensão mecânica aplicada (MOHEIMANI; FLEMING, 2006; ERTURK; INMAN, 2011).

As cerâmicas piezoelétricas apresentam uma estrutura cristalina tipo Perovskita com simetria tetragonal romboédrica ou cúbica simples, que varia conforme a temperatura. Logo, abaixo da temperatura Curie, a estrutura Perovskita apresenta

simetria tetragonal em que o centro de simetria das cargas elétricas positivas não coincide com o centro de simetria das cargas negativas, originando um dipolo elétrico. A presença desse dipolo faz com que a estrutura cristalina se deforme na presença de um campo elétrico e gere um deslocamento elétrico quando sujeita a uma deformação mecânica (DS gomes, *et al.* 2016). Temos abaixo, na figura 3, uma representação de uma estrutura Perovskita das cerâmicas piezolétricas do tipo PZT, acima e abaixo da temperatura Curie.

Figura 3 - Estrutura Perovskita das cerâmicas piezolétricas do tipo PZT
 (a) acima do ponto de Curie. (b) abaixo do ponto de Curie.



Fonte: APC INTERNATIONAL, (2011).

Falando sobre os materiais piezo cerâmicos, eles são frágeis em relação às tensões mecânicas, e, são bastante susceptíveis a trincas por fadiga quando submetidas a ciclos de carregamento em altas frequências (ANTON e SODANO, 2007).

O PVDF, por exemplo, é também um tipo de material piezolétrico, porém, trata-se de um polímero piezoelétrico, utilizado em microfones direcionais e hidrofones ultrassônicos. Sua flexibilidade é bem maior, em comparação a cerâmica piezolétrica, porém o acoplamento eletromecânico é menor (PRIYA e INMAN, 2009).

3.1.2 O efeito piezoelétrico em um cristal de quartzo

Para entender o efeito piezoelétrico, é importante entender o funcionamento do mesmo a nível molecular, esse efeito ocorre de forma natural em um número elevado de cristais puros, sendo alguns deles de quartzo, a turmalina e o tartarato de potássio e sódio.

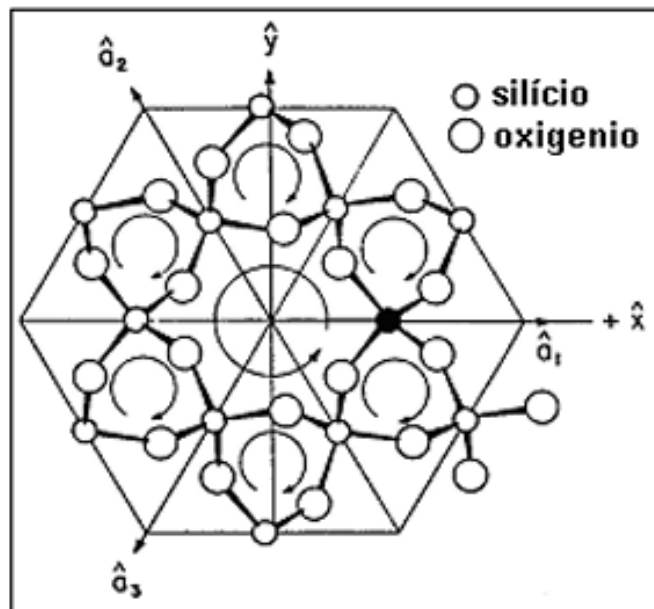
Figura 4 - Foto de um cristal de quartzo



Fonte: JJ Harrison (Creative Commons CC-BY-SA-2.5)

As cerâmicas piezoelétricas apresentam uma estrutura cristalina com simetria ou cúbica simples.

Figura 5 - Projeção das posições atômicas do quartzo.

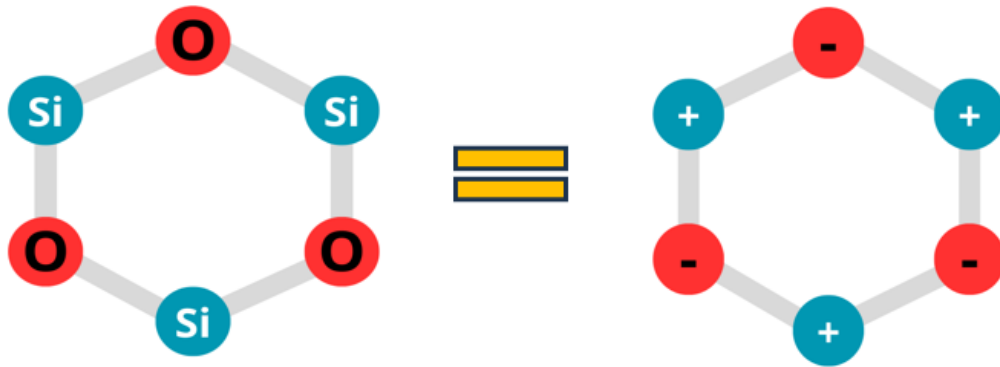


Fonte: Quartzo, PL Guzzo, 2008

A figura 6 mostra um modelo simplificado da estrutura molecular do cristal de quartzo, onde os átomos de oxigênio (O) e silício (Si) irão assumir cargas negativas e

positivas, respectivamente. Quando o cristal não está sofrendo nenhuma tensão mecânica no seu corpo, as cargas se anulam no centro da estrutura.

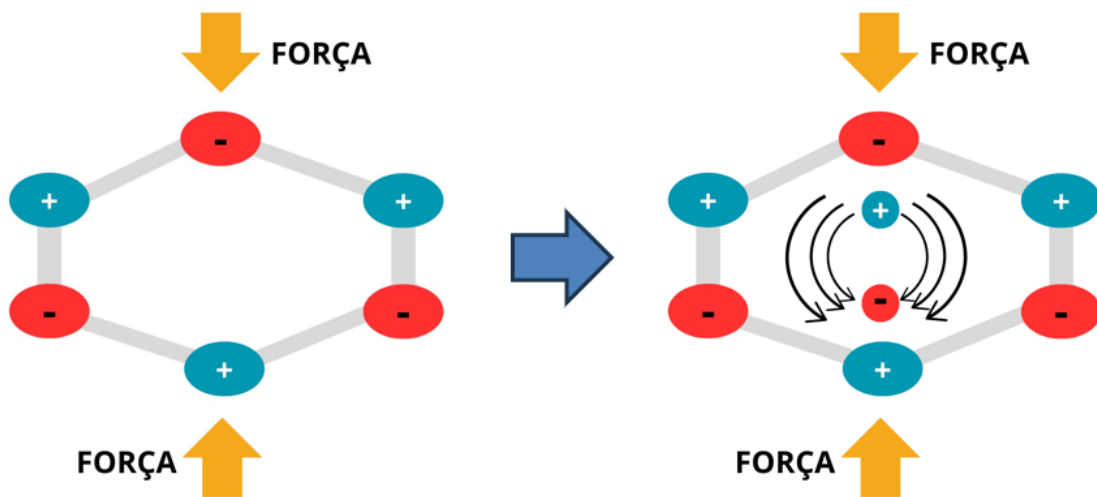
Figura 6 - Estrutura molecular simplificada do quartzo.



Fonte: O autor, 2025

Quando uma componente de tensão mecânica é aplicada a este tipo de cristal, a distância dos elementos de cargas positivas e negativas em uma célula elementar irá se alterar, causando assim uma polarização elétrica na superfície do cristal.

Figura 7 - O efeito piezoelétrico na estrutura molecular do quartzo.



Fonte: O autor, 2025

3.2 Introdução as equações constitutivas dos materiais piezoelétricos

Considerando um tipo de material elástico que tem uma tensão mecânica (T) aplicada às duas faces opostas e é restringido a se mover apenas na direção da tensão aplicada, T . Como consequência dessa força o material irá produzir uma deformação (S) na mesma direção da carga aplicada. A deformação, S , é definida como o alongamento total dividido pelo comprimento original do material. Em valores baixos de tensão aplicada, a resposta de deformação será linear até uma tensão crítica, na qual o material começará a ceder (LEO, 2007). Considerando o estudo matemático aplicado em materiais piezoelétricos, o corpo de prova, além de se expandir como um material elástico, também irá gerar um fluxo de carga devido ao movimento dos dipolos elétricos, ou seja, a tensão é gerada.

A força mecânica também provocará um deslocamento elétrico (D), este deslocamento é simbolizado pelo símbolo $[C/m^2]$, onde a carga gerada é dividida pela superfície dos eletrodos (LEO, 2007).

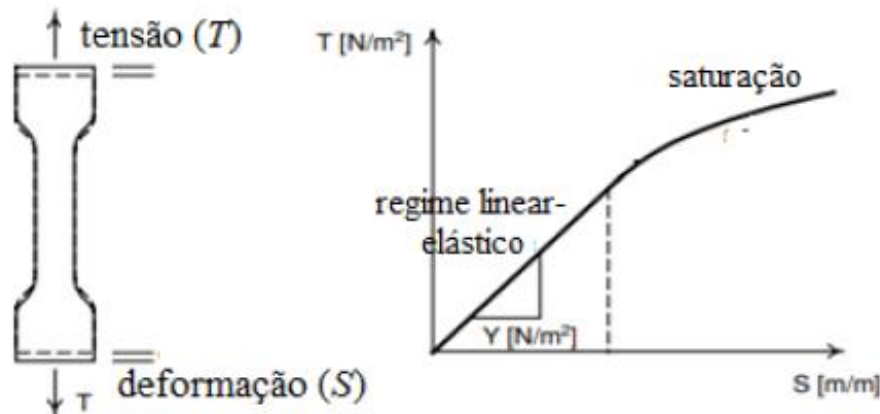
Portanto, na fase linear há uma correlação entre a tensão mecânica aplicada (T) e o deslocamento elétrico (D) constante. O acoplamento eletromecânico é dado através de três variáveis conhecidas, são elas: complacência mecânica (s), coeficiente piezoelétrico de deformação (d) e permissividade elétrica (ϵ).

O efeito piezoelétrico direto e o efeito indireto podem ser expressos como uma relação entre tensão mecânica (T), deformação (S), campo elétrico (E) e deslocamento elétrico (D) (LEO, 2007).

3.2.1 Efeito direto

O efeito piezoelétrico direto acontece quando é obtida uma tensão elétrica proporcional a tensão mecânica aplicada ao material utilizado. Ao analisar o corpo de prova na Figura 8, observa-se que ele está sob tensão mecânica axial em suas faces opostas, restringindo o movimento na direção da tensão (T). Essa força resulta em deformação (S) na mesma direção da carga. Em regime elástico, onde a carga não excede a tensão admissível, a relação entre tensão e deformação é proporcional, representada por uma curva constante. A inclinação da reta observada no gráfico abaixo chama-se módulo de Young (Y) ou módulo de elasticidade (LEO, 2007).

Figura 8 - Comportamento Deformação (S) x Tensão mecânica (T).



Fonte: ADAPTADO DE LEO, 2007.

A relação matemática entre tensão e deformação é descrita na equação 1 abaixo, sendo a complacência mecânica (s), o inverso do módulo de Young ($s=1/Y$).

$$S = \frac{1}{Y}T = sT \quad [1]$$

Ao aplicar o estudo apresentado a materiais piezoelétricos, observa-se que o corpo de prova não apenas sofre alongamento como um material elástico, mas também produz um fluxo de carga em decorrência do movimento dos dipolos elétricos. Conseqüentemente, a tensão mecânica provoca um deslocamento elétrico (D), cuja unidade de medida é [Cm²]. Esse deslocamento corresponde à carga gerada dividida pela área da superfície dos eletrodos. De forma similar, na fase linear, há uma relação constante entre a tensão aplicada (T) e o deslocamento elétrico (D). A inclinação dessa reta corresponde ao coeficiente piezoelétrico de deformação (d) (LEO, 2007).

A equação que relaciona essas componentes é:

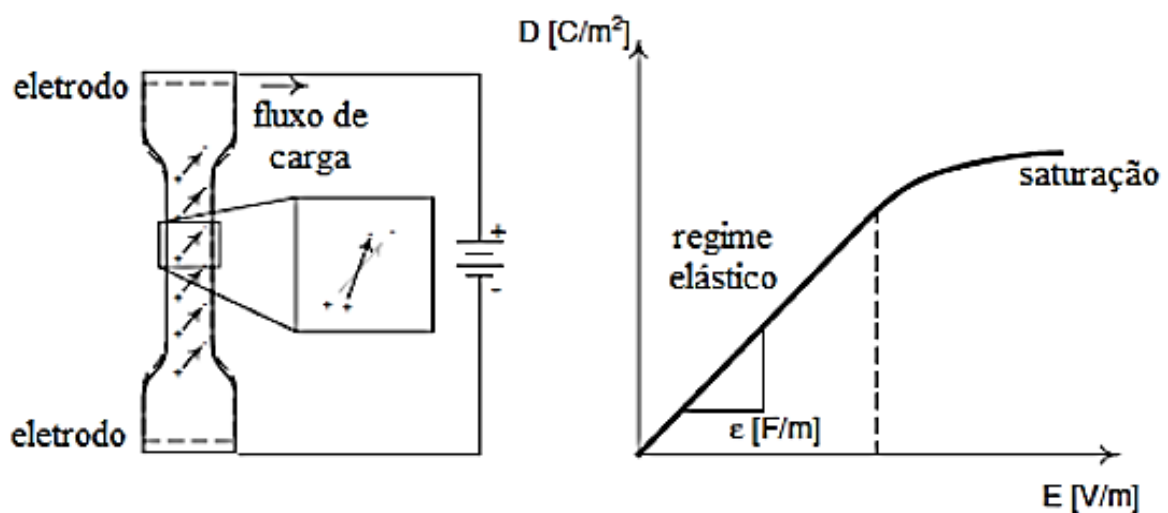
$$D = dT \quad [2]$$

onde a medida de d é expressa por [C/M].

3.2.2 Efeito inverso

Os materiais piezoelétricos têm outra qualidade, que é o efeito inverso, que consiste em apresentar deformação mecânica quando exposto a campo elétrico. Dessa forma, considerando que o material piezoelétrico atua como um isolante ideal, ao aplicar um campo elétrico constante entre os eletrodos localizados nas faces opostas do corpo de prova, como mostrado na Figura abaixo, será induzido um campo elétrico (E) no material. Isso ocorre devido à rotação dos dipolos internos, que são atraídos pelas cargas elétricas, resultando também na geração de um deslocamento elétrico (D). A relação entre o campo elétrico (E) e o deslocamento elétrico (D) se mostrará linear para valores inferiores a um determinado limite de saturação (Teixeira, D; Pacheco, L, 2023).

Figura 9 - Relação entre campo elétrico (E) e deslocamento elétrico (D)



Fonte: ADAPTADO DE LEO, 2007.

A inclinação dessa reta é chamada de permissividade elétrica (F/m) e é representada por epsilon (ϵ), onde a relação matemática entre os elementos citados acima está sendo representada na equação 1.

$$D = \epsilon E \quad [1]$$

A orientação dos dipolos internos, causada pelo movimento de cargas elétricas nas direções dos eletrodos, além de provocar um deslocamento elétrico, também causará uma deformação mecânica na pastilha. Portanto, de maneira análoga, observa-se uma correlação linear entre o campo aplicado (E) e a deformação mecânica (S). A relação matemática que expressa essa situação configura o coeficiente piezoelétrico de deformação (d), campo aplicado (E) e deformação mecânica (S), como mostra a equação a seguir (Teixeira, D; Pacheco, L, 2023).

$$S = dE \quad [2]$$

3.3 Equações constitutivas dos materiais piezoelétricos

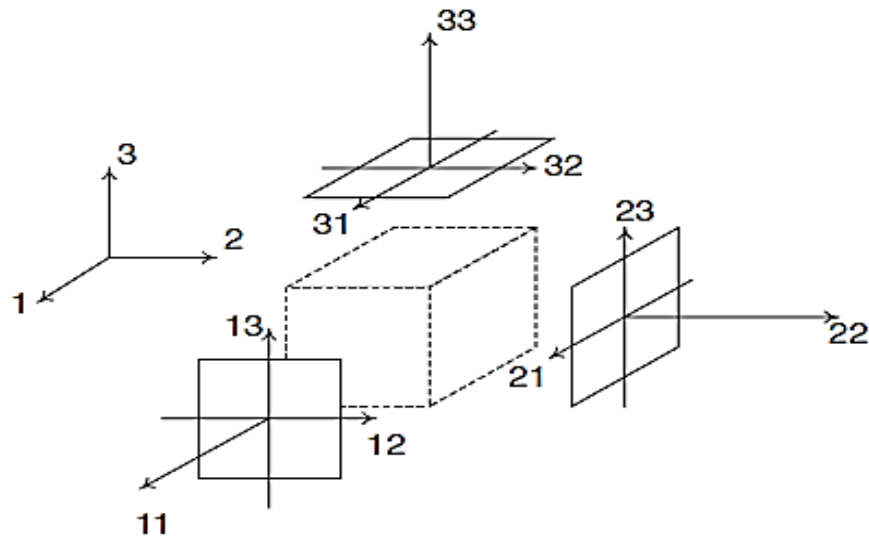
O acoplamento eletromecânico foi dado através de três variáveis conhecidas, são elas: complacência mecânica (s), coeficiente piezoelétrico de deformação (d) e permissividade elétrica (ε).

O efeito piezoelétrico direto e o efeito indireto podem ser expressos como uma relação entre tensão (T), deformação (S), campo elétrico (E) e deslocamento elétrico (D) (LEO, 2007). Logo, o modelo da equação constitutiva dos materiais piezoelétricos pode ser dado como a combinação das equações algébricas obtidas nos efeitos direto e indireto em forma de matriz.

$$\begin{Bmatrix} S \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s & d \\ d & \varepsilon \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ E \end{Bmatrix} \cdot \quad [3]$$

O comportamento do material de forma tridimensional é dado em forma de matriz. Para descrever as equações constitutivas é usado um cubo com coordenadas numéricas representando um sistema tridimensional, como mostra a figura 9, sendo o eixo 3 como a polarização do material.

Figura 10 - Sistema de coordenadas de um cubo piezoelétrico.



Fonte: LEO, 2007

É possível observar no plano cartesiano (Figura 10) que existem 3 direções nas quais podemos aplicar um campo elétrico. Rotula-se essas direções E_i , onde $i = 1, 2, 3$, e é possível expressar essas direções na forma de vetor.

$$\underline{E} = \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} . \quad [4]$$

O mesmo acontece com o deslocamento elétrico (D), há três direções nas quais é possível produzir um deslocamento elétrico dentro do material. Essas direções são expressas em termos do vetor (LEO, 2007):

$$\underline{D} = \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} . \quad [5]$$

Como tem-se três direções associadas tanto ao campo elétrico quanto ao deslocamento elétrico, é possível obter a relação geral entre as variáveis.

$$D_1 = \varepsilon_{11}^T E_1 + \varepsilon_{12}^T E_2 + \varepsilon_{13}^T E_3 \quad [6]$$

$$D_2 = \varepsilon_{21}^T E_1 + \varepsilon_{22}^T E_2 + \varepsilon_{23}^T E_3 \quad [7]$$

$$D_3 = \varepsilon_{31}^T E_1 + \varepsilon_{32}^T E_2 + \varepsilon_{33}^T E_3. \quad [8]$$

Essas equações podem ser expressas em notação indicial:

$$D_m = \varepsilon_{mn}^T E_n. \quad [9]$$

Para um material elástico linear é possível relacionar a deformação com a tensão mecânica seguindo a expressão, onde S_{ijkl} representa 81 termos.

$$S_{ij} = S_{ijkl}^E T_{kl}, \quad [10]$$

O próximo passo das equações é definir o acoplamento entre as variáveis elétricas e mecânicas, de forma geral, é possível notar que os nove estados de deformação estão relacionados aos três campos elétricos aplicados por meio da expressão:

$$S_{ij} = \mathcal{D}_{ijn} E_n \quad [11]$$

E os três componentes do deslocamento elétrico estão relacionados à tensão mecânica através da seguinte fórmula:

$$\mathbf{D}_m = \mathcal{D}_{mkl} \mathbf{T}_{kl}. \quad [12]$$

Ao combinar as quatro expressões anteriores, obtêm-se o conjunto completo de equações constitutivas para um material piezoelétrico linear na forma algébrica compacta:

$$S_i = s_{ij}^E \mathbf{T}_j + d_{ik} \mathbf{E}_k \quad [13]$$

$$\mathbf{D}_m = d_{mj} \mathbf{T}_j + \varepsilon_{mk}^T \mathbf{E}_k, \quad [14]$$

3.3.1 Equações constitutivas compactas dos materiais piezoelétricos

É sempre prudente utilizar a forma indicial das equações constitutivas para análises de materiais piezoelétricos baseadas em primeiros princípios. Podemos empregar uma versão mais enxuta das equações constitutivas, que nos possibilita escrever as equações constitutivas em formato de matriz. A configuração compacta das relações constitutivas é fundamentada na premissa de que os tensores de tensão e deformação são simétricos (LEO, 2007).

$$T_{ij} = T_{ji} \quad [15]$$

$$S_{ij} = S_{ji} \quad [16]$$

Ao ser considerada a simetria do tensor de tensão e deformação, nota-se que, ao invés de nove elementos independentes de tensão e deformação, tem-se apenas seis elementos independentes. Portanto, pode-se estabelecer o seguinte grupo de componentes novos de tensão e deformação:

$$S_1 = S_{11} T_1 = T_{11} \quad [17]$$

$$S_2 = S_{22} T_2 = T_{22} \quad [18]$$

$$S_3 = S_{33} T_3 = T_{33} \quad [19]$$

$$S_4 = S_{23} = S_{32} \quad T_4 = T_{23} = T_{32} \quad [20]$$

$$S_5 = S_{31} = S_{13} \quad T_5 = T_{31} = T_{13} \quad [21]$$

$$S_6 = S_{12} = S_{21} \quad T_6 = T_{12} = T_{21} \quad [22]$$

Por fim, tem-se as equações constitutivas na forma algébrica, que são as equações 13 e 14, citadas no item 3.3. Onde os índices i e j podem assumir valores de 1 a 6 e os índices k e m valores de 1 a 3. Assim o formato matricial, pode ser representado por:

Figura 11 - Formato matricial

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{51} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{61} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_2 \end{Bmatrix}$$

Fonte: ADAPTADO DE LEO, 2007.

Figura 12 - Formato matricial

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_2 \end{Bmatrix}$$

Fonte: ADAPTADO DE LEO, 2007.

Figura 13 - Formato matricial expandido

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & s_{14}^E & s_{15}^E & s_{16}^E & d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & s_{24}^E & s_{25}^E & s_{26}^E & d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & s_{34}^E & s_{35}^E & s_{36}^E & d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ s_{41}^E & s_{42}^E & s_{43}^E & s_{44}^E & s_{45}^E & s_{46}^E & d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ s_{51}^E & s_{52}^E & s_{53}^E & s_{54}^E & s_{55}^E & s_{56}^E & d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ s_{61}^E & s_{62}^E & s_{63}^E & s_{64}^E & s_{65}^E & s_{66}^E & d_{16} & d_{26} & d_{36} \\ d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} & \varepsilon_{11}^T & \varepsilon_{12}^T & \varepsilon_{13}^T \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} & \varepsilon_{21}^T & \varepsilon_{22}^T & \varepsilon_{23}^T \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} & \varepsilon_{31}^T & \varepsilon_{32}^T & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}$$

Fonte: ADAPTADO DE LEO, 2007.

Nas representações matriciais apresentadas, há 36 constantes elásticas (s), 18 coeficientes de deformação piezoelétrica (d) e 9 valores de permissividade elétrica (ε) que caracterizam um material piezoelétrico. Essas variáveis podem ser diminuídas levando em conta a simetria entre elas e a característica transversalmente isotrópica do material (Teixeira, D; Pacheco, L, 2023).

Tendo isso em vista, têm-se as seguintes combinações:

$$\begin{aligned}
 s_{ij} = s_{ji} = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad j = 4, 5, 6 \\
 s_{45} = s_{46} = s_{56} = s_{65} = 0
 \end{aligned}$$

[16]

Se um campo elétrico (E) for inserido no eixo X não será obtido um deslocamento elétrico (D) nos eixos Y e Z, logo, os valores de Y e Z poderão ser anulados, como mostra a matriz de epsilon ε a seguir:

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

[17]

E para os valores dos coeficientes de deformação piezoelétrica (d), tem-se uma matriz com valores já pré-definidos:

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

[18]

Logo, realizando as devidas contrações, tem-se o modelo constitutivo reduzido no formato matricial:

Figura 14 - Modelo constitutivo reduzido no formato matricial

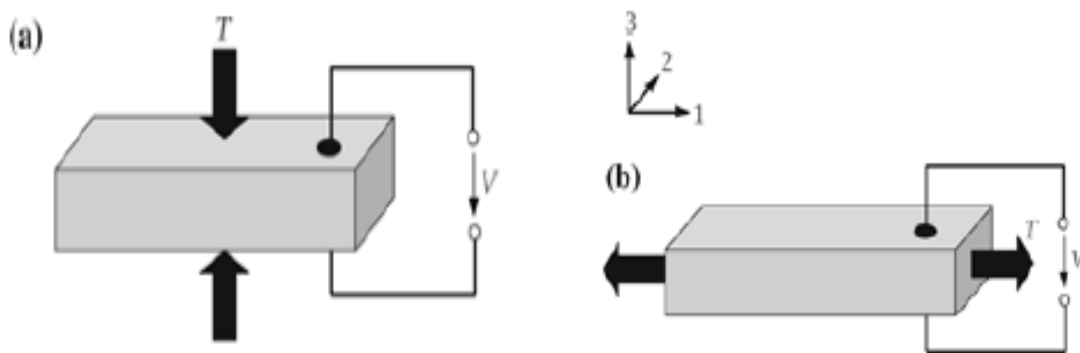
$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}$$

Fonte: ADAPTADO DE LEO, 2007.

3.4 Modo de operação dos transdutores piezoelétricos

Na figura a seguir, podem ser observados os modos mais utilizados na conversão de energia a partir de uma deformação estrutural do material piezoelétrico. Tem-se os modos 33 e 31, o primeiro número após a constante “d” representa a direção da tensão elétrica, o segundo número indica a direção da deformação aplicada (HEHN; MANOLI (2015) e KONG et al. (2014)).

Figura 15 - Modos de excitação do Piezoelétrico



Fonte: HEHN; MANOLI, (2015).

Os dois modos mecânicos possuem diferentes particularidades na eficiência energética. O modo 33 é o que proporciona um valor de tensão de saída mais elevado, apresentando um fator de conversão energética maior do que o modo 31. O modo 31 requer o uso de um material piezoelétrico relativamente fino, de modo a ceder melhor a distensão provocada por uma excitação mecânica (ROUNDY, S., WRIGHT, P. K., & RABAEY, J. M, 2003).

Em 2001, um estudo feito por Michael J. Ramsay e William W. Clark, mostrou que o modo 31 pode torna-se mais eficiente quando a força mecânica submetida no material é relativamente baixa, mas, por sua vez, o modo 33 torna-se vantajoso quando usado um material piezoelétrico com um volume elevado (DISSERTAÇÃO, IUSLEY, 2021).

3.5 Possíveis aplicações das pastilhas piezoelétricas

As pastilhas piezoelétricas podem ser usadas em diversos tipos de aplicações, incluindo sensores, atuadores, transdutores e dispositivos de coleta de energia. A sua exatidão na transformação de energia entre formas mecânicas e elétricas as torna indispensáveis em diversos setores, desde imagens médicas e automação industrial até aparelhos eletrônicos de uso pessoal e aeroespacial.

A capacidade das cerâmicas piezoelétricas de produzir vibrações controladas, controlar movimentos exatos e converter energia em vários ambientes destaca sua relevância na tecnologia e inovação contemporâneas (PIEZODIRECT, 2024).

Quando usados em sensores, os materiais piezoelétricos podem detectar até mesmo algumas das menores perturbações e anomalias, o que os torna dispositivos ideais em testes industriais não destrutivos e imagens médicas. Em outros casos, motores piezoelétricos podem executar movimentos altamente precisos e repetíveis. Essa capacidade os torna excelentes dispositivos para movimentos de precisão de dispositivos ópticos sensíveis, como telescópios e microscópios (APC INTERNACIONAL, 2015).

Algumas aplicações das cerâmicas piezoelétricas:

- **Comunicações** – Antenas e Sensores;
- **Óptica** – Posicionamento de fibras;
- **Automotivo** – Sensores de detonação e Injetores de combustível;
- **Comercial** – Alarmes, Campainhas, Impressoras, etc.

3.5.1 Dispositivos de piezocirurgia

Dispositivos de piezocirurgia, especificamente cirurgia óssea piezo elétrica, foram desenvolvidos para cortar osso traumáticamente usando vibrações ultrassônicas e para fornecer uma alternativa aos instrumentos mecânicos e elétricos usados em cirurgia oral convencional. As principais características dos instrumentos de piezocirurgia incluem sua capacidade de cortar seletivamente o osso sem danificar o tecido mole adjacente, fornecer um campo operatório claro e cortar sem gerar calor (ABELLA, et al. 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais utilizados

O principal componente dos experimentos laboratoriais foi a pastilha pzt (PIEZOELÉTRICA), que foi submetida a diversos testes. Seguem as dimensões e características da pastilha piezoelétrica utilizada nos experimentos.

Figura 16 - Dimensões da pastilha piezoelétrica



Fonte: O AUTOR, 2025.

Figura 17 - Modelo de pastilha piezoelétrica utilizada nos ensaios



Fonte: O AUTOR, 2024.

Características Físicas:

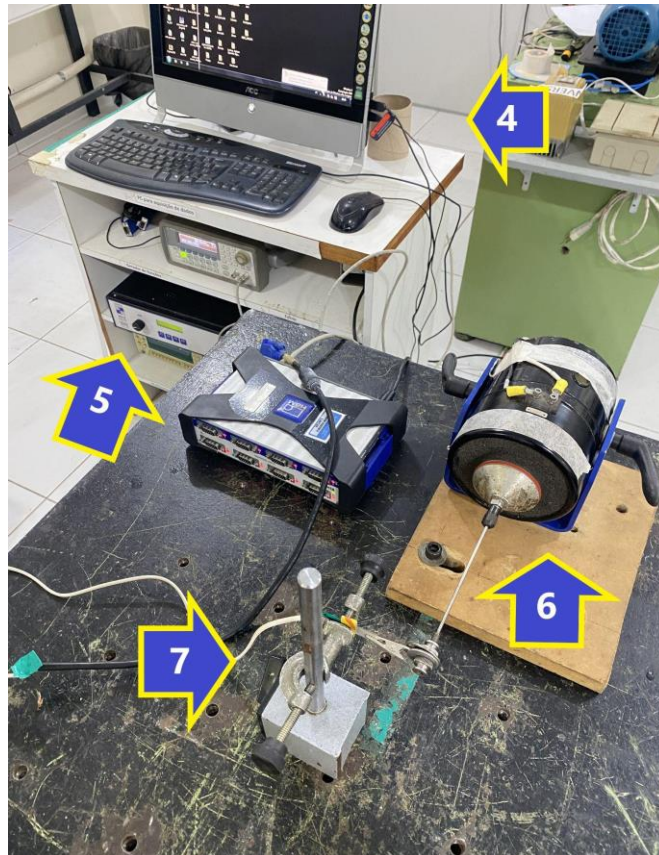
- Boa resistência a impactos
- Temperatura operacional: de 0 a 85 graus
- Armazenamento temperatura: de -40 a 85 graus
- Alta temperatura: LDT pode suportar até 125 graus

Nos testes foram utilizados alguns outros equipamentos, sendo os principais a seguir:

- [1] Pastilha Piezoelétrica;

- [2] Multímetro;
- [3] Bancada;
- [4] Computador (para leitura dos dados);
- [5] Osciloscópio;
- [6] Shaker eletromagnético;
- [7] Garra com suporte.

Figura 18 - Preparo de equipamentos em bancada



Fonte: O autor, (2024).

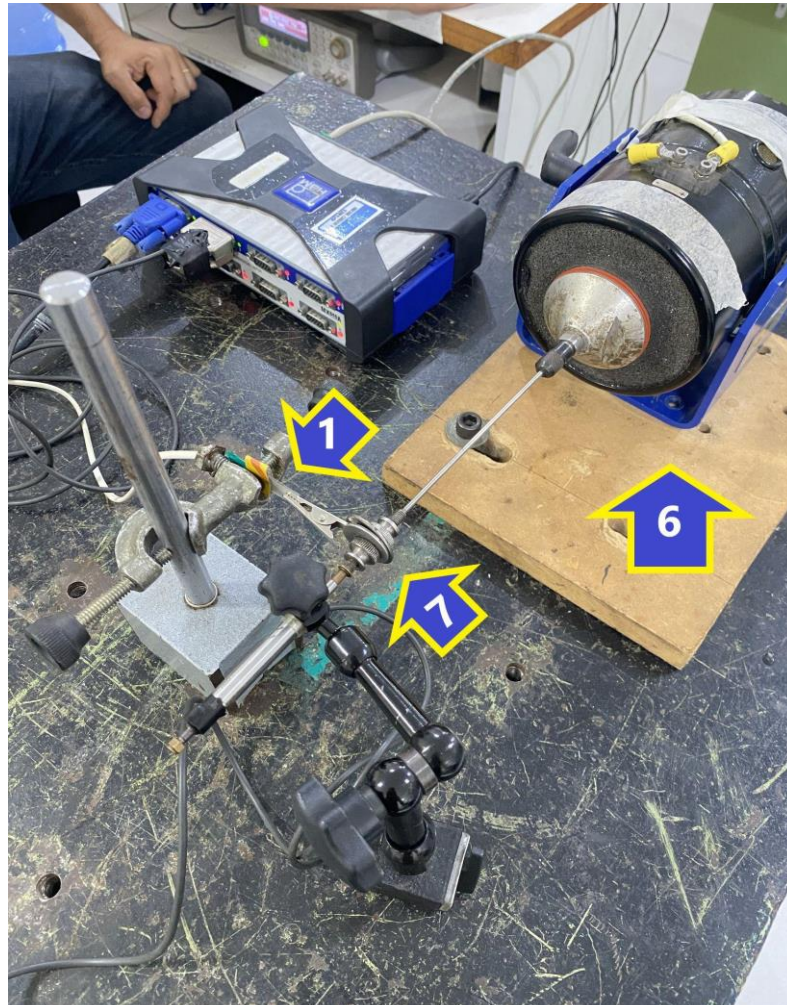
Os experimentos foram realizados no laboratório LVI (Laboratório de vibrações e instrumentação) da Unidade acadêmica de engenharia mecânica da UFCG (UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE), com auxílio e orientação do professor Dr. Andersson Guimaraes Oliveira.

4.2 Métodos

Com a bancada pronta e todos os equipamentos em mesa, foi iniciada a montagem do experimento fixando a pastilha piezoelétrica na haste engastada ao

shaker eletromagnético, que reproduzia as ondas geradas pelo osciloscópio, como mostra a figura a seguir.

Figura 19 - Bancada com experimento montado



Fonte: O autor, (2024).

No osciloscópio, eram inseridos os dados necessários para que o mesmo pudesse produzir as oscilações, movimentando o shaker eletromagnético e, conseqüentemente, movimentando a pastilha pzt, gerando o *stress* mecânico necessário para obter eletricidade.

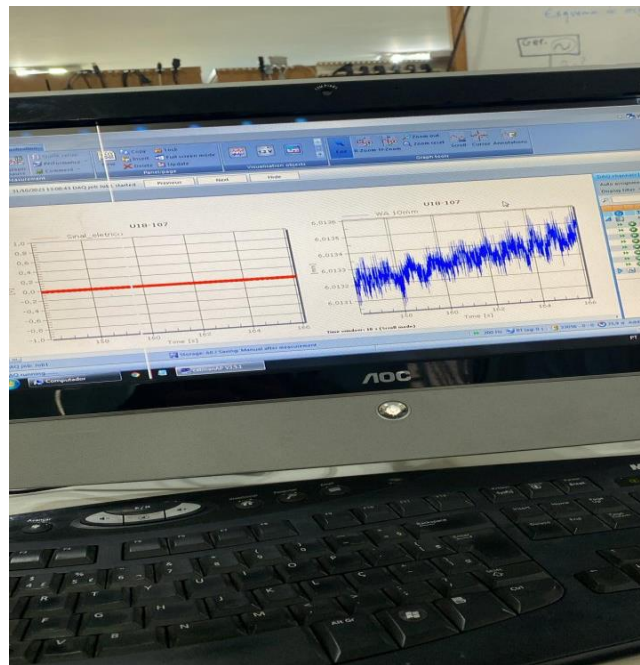
Figura 20 - Pastilha PZT engastada na haste e no suporte



Fonte: O autor, (2024).

No computador era possível observar em tempo real os resultados e leituras obtidas nos experimentos, mostrando a capacidade das pastilhas piezoelétricas, como mostra a figura a seguir.

Figura 21 - Exemplo de resultado mostrado na tela do computador



Fonte: O autor, (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresentamos os resultados obtidos a partir da análise dos dados encontrados durante os testes feitos no laboratório. Os testes foram conduzidos com o objetivo de obter os gráficos de desempenho das pastilhas piezoelétricas em diferentes cenários.

Os resultados são apresentados de maneira organizada, iniciando pela caracterização do gráfico da tensão e, em seguida, abordando a amplitude x frequência. Cada seção é acompanhada de uma interpretação que visa destacar a análise realizada utilizando os equipamentos citados no item 4.1 e seguindo os métodos do item 4.2, garantindo a precisão e a robustez dos resultados.

5.1 Execução dos testes

Para execução dos testes foi aplicado um deslocamento de entrada na peça, onde esse deslocamento se inicia com uma frequência de 0 Hertz e se estende até 30 Hertz.

5.2 Teste simples com multímetro

Esse teste teve como objetivo mostrar de forma simples a eficácia das pastilhas quando se fala em produção de eletricidade. Com um multímetro simples, em escala de corrente contínua, foi possível medir os picos elétricos quando a pastilhas sofria uma tensão mecânica no seu corpo.

Figura 22 - Multímetro medindo os pulsos elétrico da pastilha PZT



Fonte: O autor, (2025).

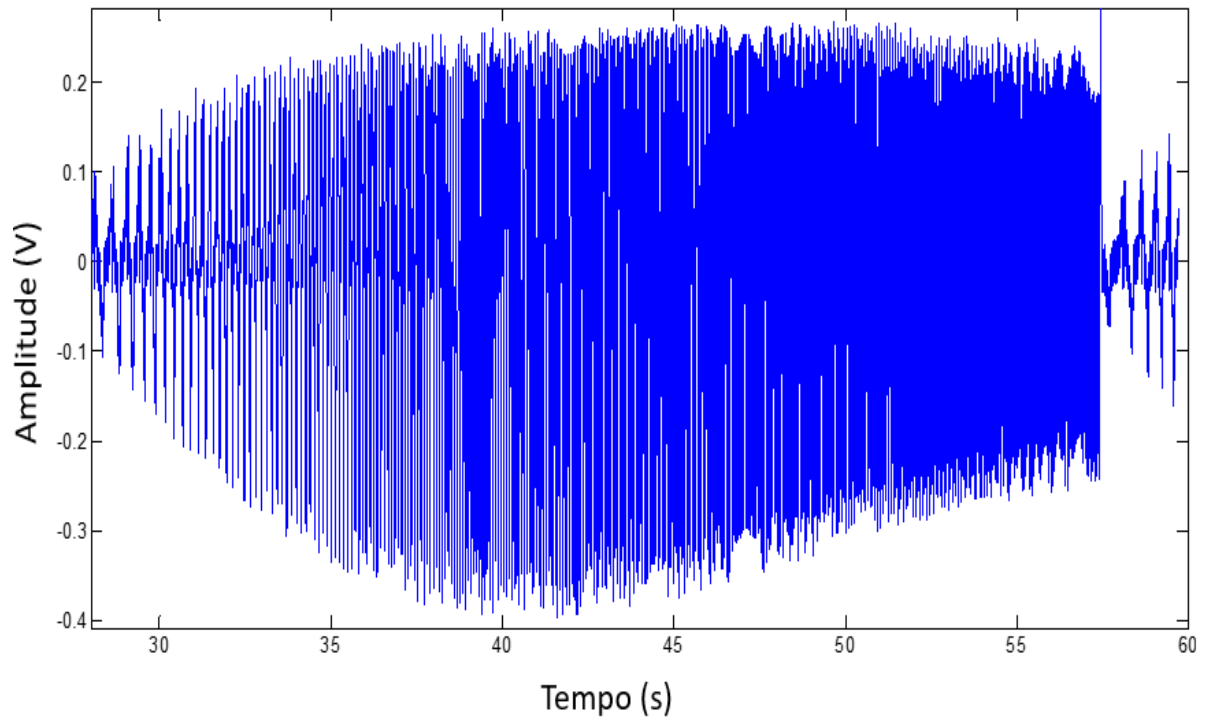
5.3 Caracterização do gráfico da tensão

A análise da tensão é crucial para observarmos o desempenho da pastilha PZT em determinadas frequências. No gráfico, a tensão em volts é representada no eixo vertical, enquanto o eixo horizontal representa o tempo em segundos. Os dados foram coletados utilizando os equipamentos e sendo reproduzidos em um programa de computador, a leitura dos resultados e geração dos gráficos foram realizadas utilizando o Matlab, garantindo a precisão das medições.

A figura 22 mostra o gráfico de forma geral, onde no eixo Y tem-se a amplitude em volts, que seria o resultado gerado pela pastilha, e no eixo X o tempo em segundos. Durante esse teste, a frequência ia alternando, afim de obter o melhor desempenho, como pode ser observado na figura 24.

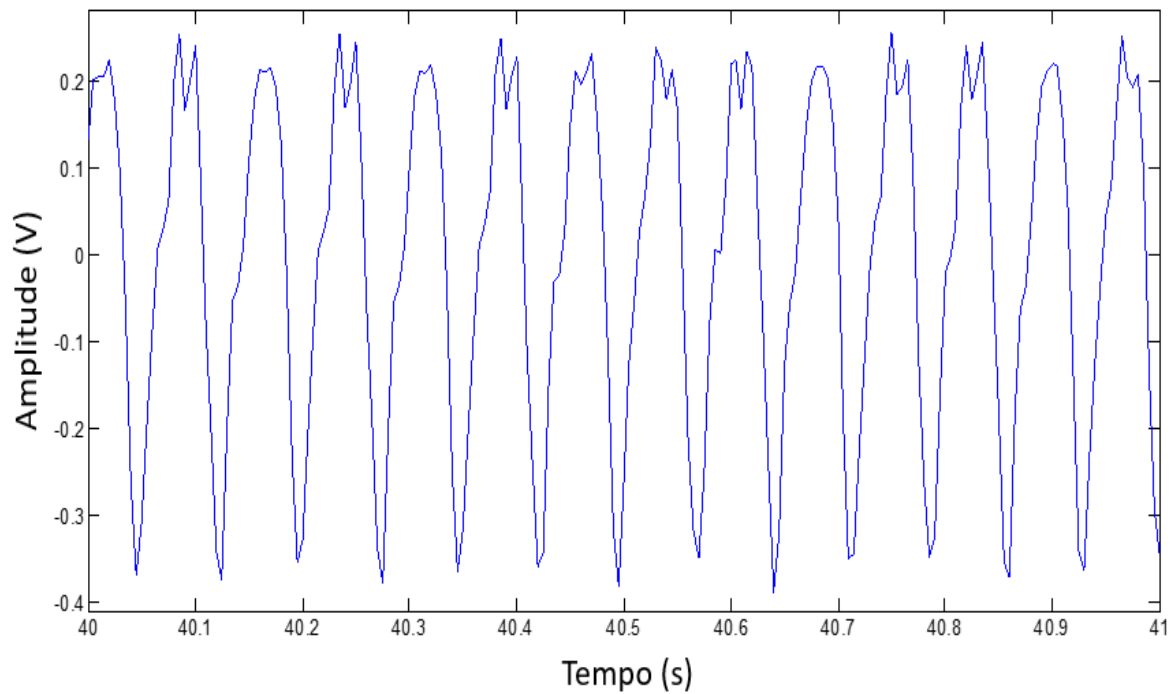
A figura 23 mostra o mesmo gráfico da figura 22 e 24 de forma ampliada, com o intuito de observar melhor as ondas produzidas pela resposta da pastilha piezoelétrica.

Figura 23 - Gráfico da tensão x tempo



Fonte: O autor, (2025).

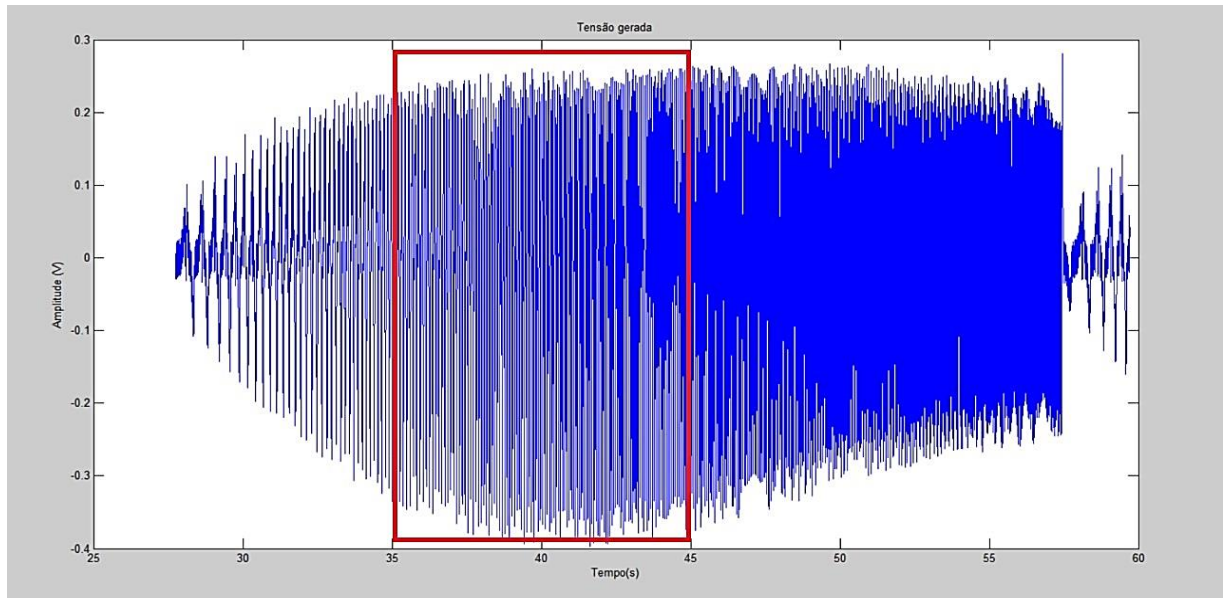
Figura 24 - Gráfico da tensão x tempo com ondas em detalhe.



Fonte: O autor, (2025).

Pode ser observado que entre 35 e 45 segundos (como mostra a figura 24), tem-se uma melhor resposta da pastilha, produzindo uma melhor amplitude, isso se dá por conta da frequência atingida, que foi a mais ideal naquele cenário.

Figura 25 - Gráfico da tensão x tempo marcado

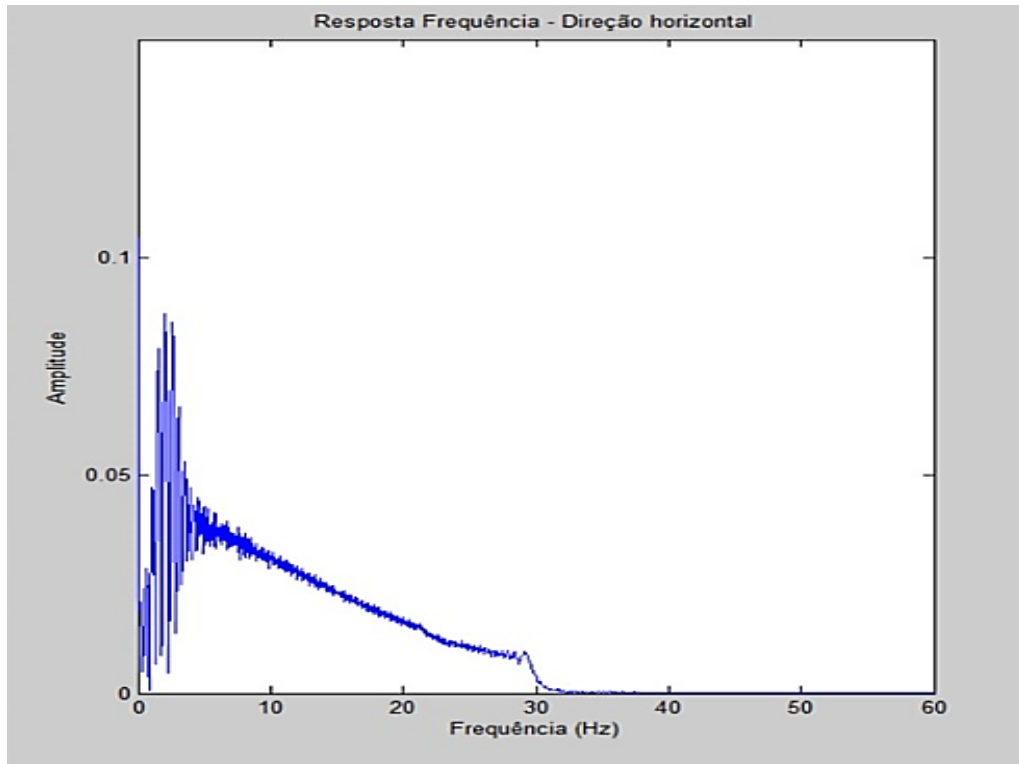


Fonte: O autor, (2024).

5.3 Caracterização do gráfico da amplitude x frequência

A caracterização do gráfico da amplitude em função da frequência é fundamental para entender o comportamento de um sinal em termos de suas componentes de frequência. No caso dessa análise, esse gráfico é importante para entender em que faixa de frequência a pastilha PZT oferece um melhor desempenho. No eixo horizontal é dada a frequência em Hz, já no eixo vertical é dada a amplitude em mm.

Figura 26 - Gráfico da Amplitude x Frequência



Fonte: O autor, (2024).

É possível observar que a frequência vai de 0 a 60 Hz, mas que após os 30 Hz a amplitude vai decaindo e se estabiliza em 0 Hz, isso se dá pelo motivo que a pastilha PZT não responde mais aquela faixa de frequência (30 a 60 Hz). O melhor desempenho da pastilha nesse experimento foi entre 1 Hz e aproximadamente 5 Hz, após essa frequência é observado um decaimento significativo na amplitude. As maiores amplitudes observadas provavelmente estão dentro da faixa de ressonância do material da pastilha. Caso se deseje vibrar com intensidade em outras frequências as pastilhas poderiam ser acopladas em outras estruturas.

6 CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo, foi possível analisar a viabilidade técnica e econômica da microgeração de energia a partir de vibrações mecânicas, abordando diversos aspectos, como o design e a eficiência dos dispositivos de conversão, os padrões de vibração disponíveis em diferentes ambientes e potenciais aplicações desses sistemas. Além disso, ressaltou-se a importância de considerar as características específicas de cada contexto de aplicação, bem como os desafios técnicos e operacionais envolvidos na implementação desses sistemas em larga escala.

A caracterização bem-sucedida dos gráficos obtidos nos experimentos demonstrou que foi possível registrar os valores de tensão e frequência, evidenciando que a faixa mais eficiente de frequência situou-se entre 1 e 5 Hz. Esses resultados confirmam a eficácia do dispositivo PZT quando submetido a estresse mecânico.

Com base nos resultados obtidos, verifica-se uma ampla gama de aplicações para esse tipo de material, incluindo a geração de energia elétrica, o uso de pastilhas como sensores, estudos de vibrações em corpos rígidos e em aparelhos de precisão, entre outras possibilidades.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O tema abordado neste trabalho de conclusão de curso é de caráter multidisciplinar, apresentando uma vasta gama de oportunidades para estudo em virtude de sua elevada complexidade e abrangência. O objetivo é avançar na fronteira do conhecimento científico. Para futuras pesquisas, propõem-se as seguintes recomendações:

- Utilizar outras formas de suporte para a pastilha PZT, a fim de obter diferentes resultados;
- Introduzir novas faixas de frequências com intuito de verificar se a pastilha responde;
- Aplicar tensões elétricas na pastilha a fim de observar se a mesma responde com vibrações.

REFERÊNCIAS

Abella, Francesc, et al. **Applications of Piezoelectric Surgery in Endodontic Surgery: A Literature Review**, Journal of Endodontics, Volume 40, Issue 3, 2014, Pages 325-332.

Anton, Steven & Sodano, Henry. (2007). **A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials (2003-2006)**. Smart Materials and Structures. 16. R1. 10.1088/0964-1726/16/3/R01.

APC INTERNACIONAL. **Os principais usos da piezoeletricidade em aplicações cotidianas**, Site APC INTERNACIONAL, disponível em <<https://www.americanpiezo.com/blog/top-uses-of-piezoelectricity-in-everyday-applications/>>, acesso em 13 de outubro de 2024.

ARMENDANI, Willian Alves; et. al. **“Conhecendo a Piezoeletricidade, uma nova forma de geração de energia elétrica”**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 1. Vol. 9. pp 314-320. Outubro/novembro de 2016.

Beeby, Stephen & Torah, Russel & Tudor, M. & Glynne-Jones, P. & O'Donnell, Terence & Saha, Chitta & Roy, Saibal. (2007). S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O'Donnell, C.R. Saha and S. Roy **“Micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting”**, Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007. Journal of Micromechanics and Microengineering. 17. 10.1088/0960-1317/17/7/007.

C.B. Williams, R.B. Yates, **Analysis of a micro-electric generator for microsystems, Sensors and Actuators A: Physical**, Volume 52, Issues 1–3, 1996, Pages 8-11, ISSN 0924-4247.

Erturk,A., Innam, D.J., **“An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations”**, Journal of Vibration and Acoustics,v.18, 025009 (18pp), 2009.

Erturk, A. e Inman. **“Colheita de energia piezoelétrica”**. John Wiley & Sons Ltd., Nova York. 2011.

Gomes, Daniel Sampaio, et al, **construção de tapete piezoelétrico**. CENSA/ISECENSA/RJ, 2016.

Hehn, Thorsten & Manoli, Yiannos. (2015). **CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters**. 38. 10.1007/978-94-017-9288-2.

KHAMENEIFAR, Farbod; ARZANPOUR, siamak; MOALLEM, Mehrdad. **A Piezoelectric Energy Harvester for Rotary Motion Applications: Design and Experiments**. IEEE/ASME, vol. 18, no. 5, outubro de 2013.

Lacerda IS, Silva AA, Fernandes EM, Senko R, Oliveira AG, Delgado JMPQ, Diniz DDS, Figueiredo MJ, Lima AGB. **Análise Comparativa de Transdutores**

Piezoelétricos para Sistemas de Baixa Potência: Um Foco na Captação de Energia Vibracional. Ciências Aplicadas. 2024; 14(20):9451.

LEO, D. J. **Engineering Analysis of Smart Material Systems.** Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

Ltd. APC International, Ltd., **Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications.** Ed 2, APC International, 2011.

MAIWA, Hiroshi, '**Piezoelectric Energy Harvesting**', Materiais piezoelétricos. InTech, 24 de agosto de 2016.

Mitcheson, P.D., Miao, P., Stark, B.H., Yeatman, E.M., Holmes, A.S., Green, T.C., "**MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation**", Sensors and Actuators A, v.115, p.523-529, 2004.

Moheimani, SO Reza e Andrew J. Fleming. "**Transdutores piezoelétricos para controle e amortecimento de vibração.**" (2006).

PiezoDirect. **Aplicações de Cerâmicas Piezoelétricas.** Site PiezoDirect, disponível em <<https://piezodirect.com/applications-of-piezoelectric-ceramics/>>, acesso em 12 de outubro de 2024.

Priya, Shashank; Inman, Daniel J., **Tecnologias de coleta de energia,** Springer Nova York, NY, 2008.

Roundy, S., Wright, PK e Rabaey, J. (2003). **Um estudo de vibrações de baixo nível como uma fonte de energia para nós de sensores sem fio.** Computer Communications, 26, 1131-1144.

Silva, Robson. **Piezoelétricidade como fonte de energia alternativa,** Faculdades Santo Agostinho – FASA, Graduação em Engenharia Elétrica, Montes Claros, MG, Brasil. 2018.

Sodano, Henry & Inman, Daniel & Park, Gyuhae. (2005). "**Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries**". Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 16. 799-807. 10.1177/1045389X05056681.

Souza, Leandro Moreira, et al, **geração de energia através da piezoelétricidade,** Associação Educativa Evangélica, 2018.

GUALANDI, Daniel Teixeira dos Santos. Vieira, Lucas Pacheco Ribeiro. **Análise numérica de dispositivos de geração de energia utilizando materiais piezoelétricos.** 2023. 57. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

Wang, L. and Yuan, F.G., "**Vibration energy harvesting by magnetostrictive material**", Smart Materials and Structures, v.17:14pp, 2008.