Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Piso gerador de eletricidade via sensores piezoelétricos

Electricity generating floor using piezoelectric sensors

Piso generador de electricidad mediante sensores piezoeléctricos

Carla Patricia Carbonari[1]
Cristhiano Costa Herrera[2]

Resumo: Este estudo investigou a viabilidade de um piso gerador de eletricidade baseado em sensores piezoelétricos de quartzo, desenvolvido desde o início. A pesquisa buscou responder como a energia mecânica de vibrações e pressões pode ser convertida em eletricidade para pequenas cargas. Utilizou-se um protótipo projetado do zero, composto por 10 sensores piezoelétricos de 27 mm conectados em associação mista. Foram realizadas medições da tensão gerada em função de massas aplicadas de até 15 kg. Os resultados confirmaram uma relação proporcional entre peso e tensão, evidenciando o potencial do sistema para alimentar LEDs. O estudo conclui que a tecnologia é viável como solução sustentável para locais de grande circulação, contribuindo para a geração descentralizada de energia renovável.
Palavras-chave: Piezoeletricidade. Energia Renovável. Piso Inteligente. Sensores Piezoelétricos

Abstract: This study investigated the feasibility of an electricity-generating floor based on quartz piezoelectric sensors, developed entirely from scratch. The research aimed to answer how mechanical energy from vibrations and pressures can be converted into electricity for small loads. A prototype designed from the ground up, consisting of 10 piezoelectric sensors of 27 mm connected in a mixed configuration, was used. Measurements of the voltage generated as a function of applied masses up to 15 kg were performed. The results confirmed a proportional relationship between weight and voltage, highlighting the system's potential to power LEDs. The study concludes that the technology is viable as a sustainable solution for high-traffic areas, contributing to decentralized renewable energy generation.
Keywords: Piezoelectricity. Renewable Energy. Smart Floor. Piezoelectric Sensors

Resumen: Este estudio investigó la viabilidad de un piso generador de electricidad basado en sensores piezoeléctricos de cuarzo, desarrollado desde cero. La investigación buscó responder cómo la energía mecánica de vibraciones y presiones puede convertirse en electricidad para pequeñas cargas. Se utilizó un prototipo diseñado completamente desde cero, compuesto por 10 sensores piezoeléctricos de 27 mm conectados en una configuración mixta. Se realizaron mediciones del voltaje generado en función de masas aplicadas de hasta 15 kg. Los resultados confirmaron una relación proporcional entre peso y voltaje, destacando el potencial del sistema para alimentar LEDs. El estudio concluye que la tecnología es viable como solución sostenible para áreas de alta circulación, contribuyendo a la generación descentralizada de energía renovable.
Palabras-clave: Piezoelectricidad. Energía Renovable. Piso Inteligente. Sensores Piezoeléctricos.

Submetido 15/01/2025 **Aceito 10/03/2025** **Publicado 02/04/2025**

[1] Graduando. IFSP Itapetininga. https://orcid.org/0009-0006-1161-9556. E-mail: c.carbonari@aluno.ifsp.edu.br
[2] Doutor. USP. https://orcid.org/0000.0002-9918-2988. E-mail: cristhiano@ifsp.edu.br

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Considerações iniciais

A crescente demanda por energia tem impulsionado a busca por fontes alternativas e renováveis de energia, promovendo um olhar mais atento à sustentabilidade. Com o aumento da população global e o consumo cada vez maior de eletricidade, implicou na necessidade de soluções inovadoras que fossem acessíveis, limpas e integradas à infraestrutura urbana (IPEA, 2024).

Dessa forma, a geração de energia renovável desempenha um papel crucial para garantir um futuro mais sustentável e estável, sendo este um dos pilares dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Especificamente, o ODS 7, que busca "energia acessível e limpa", e o ODS 11, focado em "cidades e comunidades sustentáveis", destacam a importância de tecnologias que permitam a geração de energia renovável e o desenvolvimento de cidades ecológicas e eficientes (PROGRAMA CIDADES SUSTENTÁVEIS, 2024).

O uso de geradores piezoelétricos em pisos de locais de grande circulação, como ruas, espaços públicos, academias e shoppings, surge como uma alternativa inovadora para a geração de energia limpa e sustentável. Descoberto em 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie, o efeito piezoelétrico refere-se à capacidade de materiais como quartzo, sal de rochelle e turmalina de gerar carga elétrica quando submetidos a pressões mecânicas. Essa propriedade permite converter energia mecânica de vibrações e movimentos em eletricidade, promovendo a descentralização da geração de energia (Colombo, 2020).

Integrados a pisos, os geradores piezoelétricos captam energia do movimento de pedestres, transformando o tráfego em uma fonte contínua de eletricidade. Essa tecnologia aproveita energia que antes seria dissipada, criando uma interação eficiente entre a infraestrutura urbana e a geração energética (Wang; Wu, 2015).

Além de flexibilidade na implementação, os geradores contribuem para a sustentabilidade urbana de forma prática e imperceptível aos usuários. Este artigo explora os fundamentos desses dispositivos, os materiais envolvidos e seu potencial para transformar movimentos cotidianos

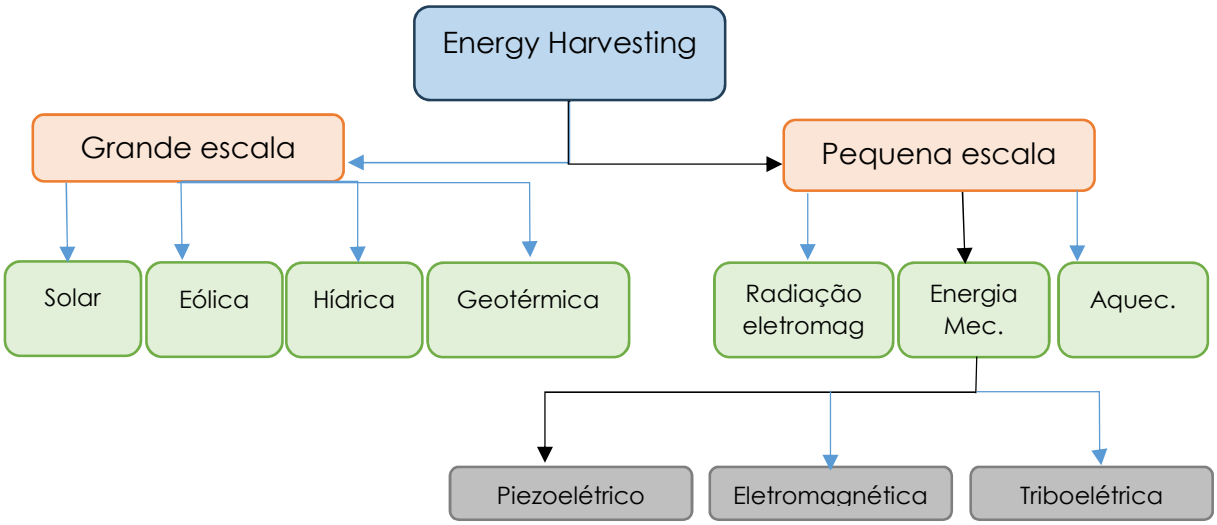
Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

em oportunidades de geração de energia limpa, alinhando-se aos ODS e promovendo soluções inovadoras para desafios energéticos globais.

Energy Harvesting (Colheita de energia)

O conceito conhecido como *Energy Harvesting* (Colheita de Energia) baseia-se no armazenamento de energia proveniente de movimentos ou estímulos externos, com o objetivo de reutilizá-la para um fim específico (PRIYA; INMAN, 2009). Na Figura 1, são abordados de forma geral os diferentes tipos de fontes que podem ser utilizadas para essa coleta de energia.

Figura 1 – Divisão dos Tipos de *Energy Harvesting*



Fonte: Adaptado de Covaci; Gontean, 2020 (Ago/2024).

A coleta de energia possui duas vertentes de estudo: a de grande escala, que inclui placas fotovoltaicas, usinas eólicas, hidrelétricas e energia geotérmica; e a de aproveitamento de energia em pequenas escalas, um método menos intuitivo que as fontes tradicionais. Na análise das fontes de energia em pequena escala, destacam-se a radiação eletromagnética, a energia mecânica e o aquecimento de materiais (Priya; Inman, 2009; Covaci; Gontean, 2020).

A energia mecânica possui diversas frentes de estudo, incluindo a triboelétrica, caracterizada pela capacidade de certos materiais adquirirem cargas positivas ou negativas quando eletrizados por atrito (Modern physics, 2025); a eletromagnética, que envolve a

interação entre forças elétricas e magnéticas do átomo combinadas com a força mecânica aplicada ao material; e, por fim, a piezoelétrica, derivada da vibração dos materiais (CEFET-RJ, 2025).

Esta última é amplamente estudada, e diversos trabalhos na literatura investigam a coleta de energia por meio de sensores piezoelétricos instalados em objetos como calçados, com o objetivo de analisar a quantidade de energia que pode ser extraída dos movimentos associados a esses casos (Zhao et al., 2023).

Piezoeletricidade

A palavra piezoeletricidade tem origem no grego "*piezein*", que significa pressão, e eletricidade. O fenômeno de gerar eletricidade a partir de deformação mecânica foi descoberto em 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie, que observaram que certos cristais, como o quartzo, geram uma diferença de potencial quando submetidos a uma pressão (Jacques; Pierre, 2020).

Contudo, foi apenas em 1880 que os irmãos Pierre e Jacques Curie foram creditados pela descoberta. Após conduzirem estudos aprofundados, eles examinaram diversos tipos de cristais, entre eles: o quartzo, o sal de Rochelle e a turmalina. Esses materiais possuem uma estrutura cristalina que, ao ser comprimida, faz com que seus polos elétricos se realinhem, gerando uma diferença de potencial e uma corrente elétrica (Curie; Curie, 1880).

Um ano depois, Lippmann observou o fenômeno inverso, ou seja, a capacidade de certos materiais de sofrerem deformação ao serem submetidos a um potencial elétrico. Ele também demonstrou que o coeficiente piezoelétrico, ou a taxa de transdução, apresentava valores equivalentes tanto no efeito direto quanto no inverso. (Zhou *et al.,* 2023).

Cristais piezoelétricos

O sal de Rochelle possui uma das respostas piezoelétricas mais fortes entre os materiais clássicos e foi um dos primeiros a ser amplamente estudado nesse campo. Sua capacidade de gerar carga elétrica a partir de deformações o tornou relevante em pesquisas iniciais sobre piezoeletricidade. No entanto, sua instabilidade em ambientes úmidos limita significativamente

suas aplicações práticas, especialmente em condições externas, onde a umidade pode comprometer sua eficiência (Kim et al., 2022).

A turmalina, conhecida por sua durabilidade e resistência, destaca-se em aplicações que exigem desempenho sob condições adversas. Apesar de sua resposta piezoelétrica ser mais modesta comparada a materiais como o quartzo, sua estabilidade química e resistência mecânica tornam-na relevante em situações que priorizam a robustez do sistema sobre a eficiência energética. Isso a torna adequada para ambientes onde os dispositivos estão expostos a temperaturas extremas ou corrosão (Zhang et al., 2021).

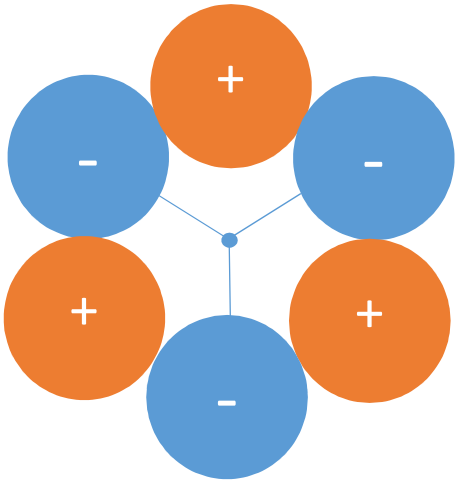
O quartzo é amplamente utilizado devido à sua alta estabilidade, precisão e resistência a variações de temperatura e umidade. Esses atributos o tornam ideal para aplicações externas, como pisos de captação de energia em áreas urbanas de alto tráfego. Sua abundância e acessibilidade também contribuem para a viabilidade econômica em projetos de grande escala. A estrutura cristalina do quartzo, composta por átomos de silício e oxigênio, sofre um leve deslocamento sob pressão, gerando polos elétricos e uma corrente proporcional à força aplicada. Essa característica, aliada à durabilidade, garante que o material mantenha suas propriedades piezoelétricas por longos períodos, mesmo sob uso intenso (Lee; Park, 2023).

Processo de geração de energia no quartzo

A piezoeletricidade no quartzo ocorre devido a uma propriedade chamada de assimetria na distribuição de carga. Em estado normal, o quartzo tem as cargas em um cristal piezoelétrico perfeitamente balanceadas, com cargas positivas e negativas igualmente distribuídas, se cancelando, não deixando nenhuma rede extra nas faces do cristal, demostrada Figura 2 (Wang; Song, 2006).

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Figura 2 – Distribuição de carga equilibrada

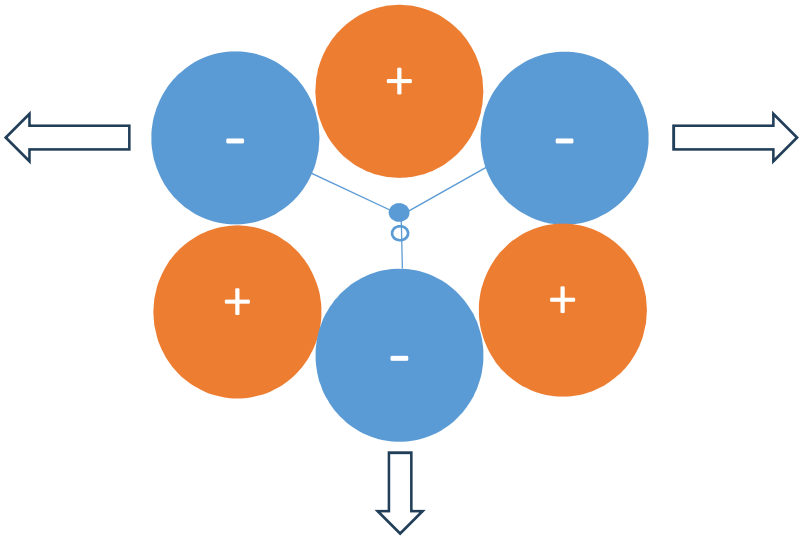


Fonte: Adaptado Wang; Song, 2006 (Ago/2024).

Quando submetido a uma deformação mecânica, essa simetria é rompida, fazendo com que o centro de carga positiva e o centro de carga negativa se separem ligeiramente, forçando as cargas a se desbalancearem, conforme demonstrada Figura 3, esse fenômeno cria um campo elétrico e, consequentemente, uma corrente que pode ser captada para diversas aplicações. O efeito da piezoeletricidade pode ser visto na Figura 4 (Wang; Song, 2006).

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Figura 3 – Distribuição de carga assimétrica rompida



Fonte: Adaptado Wang; Song, 2006 (Ago/2024).

Figura 4 – Efeito direto da piezoeletricidade

Fonte: Geovannal, 2010 (Ago/2024)

A Figura 4 mostra que, inicialmente, o material está em repouso, com energia gerada igual a zero. À medida que o material é expandido ou pressionado, a tensão gerada aumenta, variando do valor mínimo ao máximo (Geovannal, 2010).

Tipos de sensores

Os sistemas piezoelétricos podem ser classificados como:

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

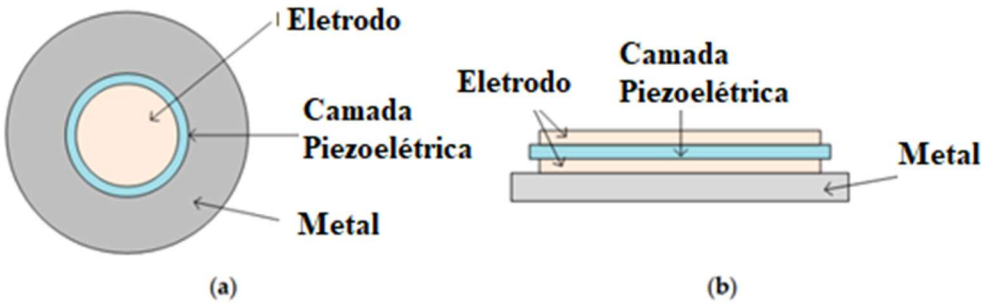
Vigas em balanço: Esse tipo de sistema é amplamente utilizado para captar energia de vibrações mecânicas. A configuração bimorfa (biforme) consiste em duas camadas piezoelétricas separadas por uma camada não piezoelétrica, geralmente metálica, o que aumenta a eficiência na geração de energia. Essa estrutura permite que o sistema responda de forma sensível a vibrações, convertendo-as em energia elétrica com alta eficiência, conforme ilustrado na Figura 5 (Li *et al*., 2023).

Figura 5 – Configuração bimorfa de vigas em balanço

Fonte: Adaptado Covaci; Gontean, 2020 (Ago/2024)

Circular: Os sensores circulares utilizam uma camada piezoelétrica em formato de anel, com eletrodos localizados no centro e nas bordas externas. Essa configuração é ideal para operações em baixa frequência, intensificando a geração de energia e aumentando a eficiência do sistema, conforme ilustrado na Figura 6 (Chen *et al.,* 2023).

Figura 6 – Sensor piezoelétrico – circular (a - visão frontal / b - visão lateral)

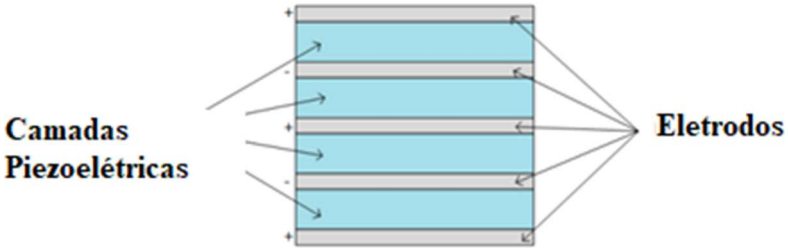


Fonte: Adaptado Covaci; Gontean, 2020 (Ago/2024)

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Pilha: Os sistemas em pilha consistem em múltiplas camadas piezoelétricas dispostas de forma paralela, com eletrodos entre as camadas. Essa configuração, ilustrada na Figura 7 maximiza a geração de energia ao alinhar a força aplicada com a polaridade das camadas, permitindo uma coleta mais eficiente em dispositivos que requerem alta densidade energética (Zhou *et al.,* 2024).

Figura 7 – Sensor piezoelétrico – pilha



Fonte: Adaptado Covaci; Gontean, 2020 (Ago/2024)

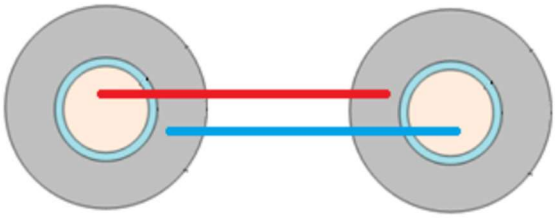
Associação de sensores piezoelétricos

A forma como os sensores piezoelétricos são associados, seja em série ou em paralelo, influencia diretamente os parâmetros elétricos do sistema, como tensão, corrente e potência gerada. Essas configurações desempenham um papel crucial na adaptação da energia gerada às demandas específicas do projeto, possibilitando ajustes na geração de tensão ou no fornecimento de maior corrente, conforme necessário (Wang; Song, 2006).

A associação em série de sensores piezoelétricos, demostrada na Figura 8, resulta na soma das tensões geradas por cada sensor, mantendo a corrente equivalente à de um único dispositivo. Essa configuração é particularmente útil em sistemas que demandam alta tensão de saída. Contudo, a corrente disponível permanece limitada pela capacidade individual de cada sensor (Bezerra, 2021).

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

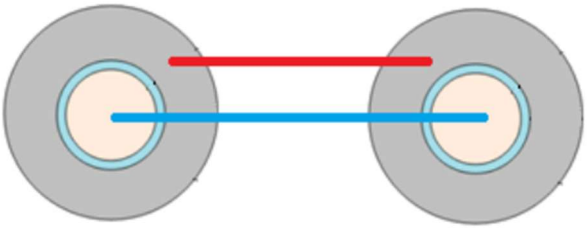
Figura 8 – Associação em série



Fonte: Moreira, 2021 (Ago/2024).

A configuração em paralelo de sensores piezoelétricos , demostrada na Figura 9, resulta na soma das correntes geradas por cada sensor, mantendo a tensão equivalente à de um único dispositivo. Essa configuração é ideal para sistemas que requerem maior corrente, como em aplicações que demandam mais potência para operar cargas maiores. No entanto, a tensão de saída é limitada àquela fornecida por um sensor individual. (Bezerra, 2021).

Figura 9 – Associação em paralelo



Fonte: Moreira, 2021 (Ago/2024).

A associação mista combina configurações em série e paralelo de sensores piezoelétricos, otimizando o desempenho ao aproveitar os benefícios de ambas as associações. Em uma associação mista, alguns sensores são conectados em série para aumentar a tensão, enquanto outros são associados em paralelo para aumentar a corrente. Esse tipo de configuração é particularmente eficaz em aplicações que exigem tanto uma alta tensão quanto uma corrente significativa, resultando em uma potência ideal (Física curiosa, 2025).

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Conforme apresentado por Lefeuve *et al.* (2006), em uma comparação entre configurações em série, paralelo e mista, a associação mista demonstrou resultados superiores em sistemas de colheita de energia com vibrações variáveis. A configuração mista proporcionou uma saída de potência mais estável e elevada, o que foi essencial para o desempenho de sistemas autônomos em ambientes de vibração moderada.

De forma semelhante, Lallart e Guyomar (2008) investigaram a eficiência de configurações mistas em sistemas piezoelétricos com acoplamento eletromecânico e concluíram que a associação mista apresentou uma saída mais consistente em condições de carga dinâmica, superando as configurações em série e paralelo isoladamente. O estudo destaca que a combinação de ambas as associações melhora a resposta do sistema, garantindo melhor desempenho em comparação com as configurações tradicionais.

Esses estudos mostram que a associação mista não apenas melhora a estabilidade da tensão e corrente, mas também proporciona uma maior eficiência na coleta de energia em comparação com as configurações em série e paralelo, tornando-se uma abordagem ideal em sistemas de colheita de energia com demandas dinâmicas.

Potência

A corrente gerada pelo sensor piezoelétrico é considerada alternada, sendo assim, necessário um resistor para convertê-la em contínua (Wang; Song, 2006). Neste caso, para calcular a potência máxima de saída do sensor, pode-se utilizar a seguinte equação:

$$P = V * I$$

Onde,

P – Potência máxima de saída;

V – Tensão ao longo do circuito;

I – Corrente do circuito.

Quando a entrada ocorre em pulso, senso o caso dos sensores piezoelétricos, a duração da tensão de saída gerada é breve, tornando necessário o uso de um capacitor na saída do sistema de colheita de energia. Esse capacitor permite o armazenamento temporário da energia,

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

possibilitando uma liberação mais estável e contínua da corrente, mesmo após o término do pulso (Moreira, 2021).

Nesse contexto, a energia armazenada no capacitor (E) pode ser calculada pela fórmula:

$$E = \frac{1}{2} * C * V^2$$

Onde,

E – Energia gerada e armazenada no capacitor;

V – Tensão de saída;

C – Capacitância do capacitor.

Ao modelar a energia gerada e a potência associada ao resistor e capacitor adicionados ao sistema, é importante analisar o comportamento desses componentes passivos. O capacitor, ao armazenar energia, ajuda a suavizar as variações de tensão, enquanto o resistor pode atuar no controle da corrente, garantindo uma descarga gradual e segura do capacitor (Moreira Filho, 2014).

Metodologia

Para a construção do projeto do piso nanogerador piezoelétrico, que captura energia a partir de vibrações e pressões contínuas, apresento a seguir a lista dos materiais necessários:

1. Pastilha piezoelétrica 27mm
2. Arduino
3. Protoboard
4. Display LCD
5. Diodo retificador 1N4007
6. Capacitor 10uF
7. Resistor 100k ohm
8. Resistor 10k ohm
9. Transistor BC547
10. LED

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

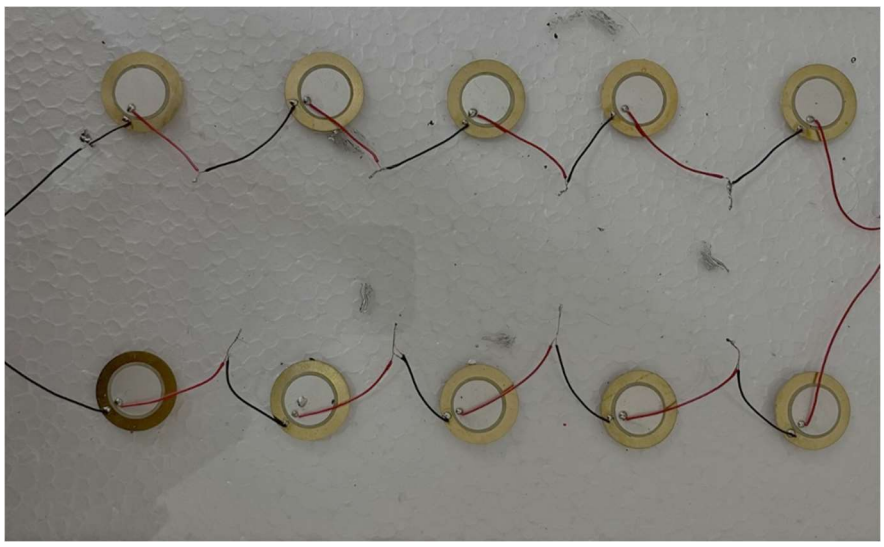
Pastilha piezoelétrica

O protótipo do piso foi desenvolvido utilizando dez pastilhas piezoelétricas, essas pastilhas foram escolhidas por sua capacidade de gerar energia elétrica a partir de vibrações e pressões mecânicas. As pastilhas piezoelétricas utilizadas possuem uma camada de cerâmica piezoelétrica conectada a uma base metálica, permitindo uma conversão eficiente da energia mecânica em elétrica por meio do efeito piezoelétrico. A configuração escolhida foi a associação mista, conforme demonstrado na Figura 10, combinando oito sensores conectados em série e dois em paralelo para otimizar a geração de tensão e corrente.

Cada pastilha tem um diâmetro de 27 mm, com um range de tensão de saída que pode variar entre 1V a 15V, dependendo da intensidade da força aplicada. A corrente gerada é da ordem de microamperes, característica que torna necessária a utilização de um capacitor para o armazenamento da energia coletada.

O cristal selecionado, quartzo, foi selecionado por sua alta resistência e eficiência na conversão energética, sendo fundamentais para a criação de um sistema sustentável. A energia gerada pelos sensores foi acumulada em um capacitor, permitindo sua utilização futura para alimentar pequenas cargas, demonstrando o potencial do sistema para aplicações urbanas.

Figura 10 – Associação mista das pastilhas piezoelétricas



Fonte: Próprio autor.

Arduino | Protoboard

O Arduino é uma plataforma de desenvolvimento eletrônica que combina uma placa de microcontrolador com um ambiente de programação. No projeto, foi utilizado o modelo Arduino Uno R3, escolhido por sua versatilidade e ampla compatibilidade com sensores e periféricos. Esse modelo processa os sinais elétricos gerados pelas pastilhas piezoelétricas, controla os LEDs e exibe os dados coletados em um display LCD modelo 1602A.

A protoboard, ou placa de ensaio, foi utilizada para a montagem temporária dos circuitos sem a necessidade de solda. Com uma matriz de pequenos furos conectados internamente, a protoboard permitiu a conexão de componentes como resistores, LEDs, capacitores e o Arduino, possibilitando ajustes rápidos e testes antes da montagem definitiva do sistema.

No projeto, o Arduino Uno foi integrado ao circuito para coletar os sinais das pastilhas piezoelétricas, processar as informações e comandar os LEDs, além de exibir os dados em tempo real no display LCD. Essa abordagem facilitou a prototipagem e a análise do desempenho do sistema em diferentes condições de pressão e vibração.

Diodo retificador | Capacitor | Resistores | Transistor

O diodo é um componente essencial para a retificação da corrente gerada pelos sensores piezoelétricos, que produzem corrente alternada (AC). No projeto, será utilizado uma ponte retificadora do diodo 1N4007, que permite o fluxo de corrente em uma única direção, convertendo-a em corrente contínua (DC) e evitando o retorno da corrente para os sensores. Essa retificação garante que a energia seja acumulada corretamente no capacitor (Boylestad; Nashelsky, 2019).

O capacitor armazena temporariamente a energia coletada pelos sensores piezoelétricos. Ao ser pressionado, o sistema gera energia que é acumulada no capacitor e liberada lentamente para o circuito. Ele funciona como um "reservatório", estabilizando a corrente para evitar flutuações que poderiam prejudicar componentes como o display e os LEDs (Floyd, 2021).

Os resistores desempenham papéis importantes no circuito, limitando a corrente e controlando a tensão. Dois resistores serão utilizados no projeto, cada um com uma função específica (Boylestad; Nashelsky, 2019).

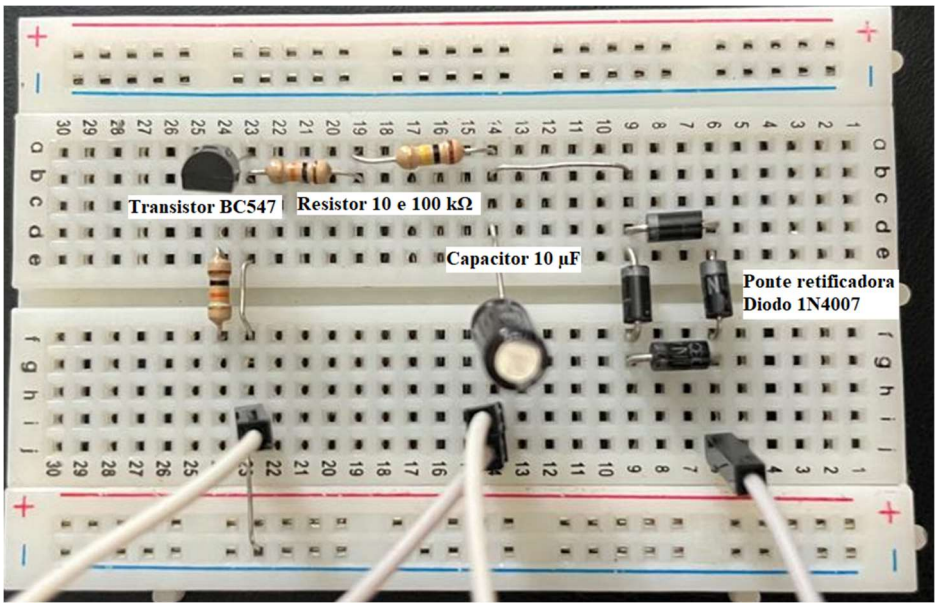
- **Resistor de 100k ohm:** Controla a corrente no circuito e auxilia o capacitor na descarga lenta, evitando o acúmulo de cargas residuais quando o sistema não está em uso.
- **Resistor de 10k ohm:** Atua como divisor de tensão e limitador de corrente, protegendo componentes sensíveis, como LEDs e transistores, contra sobrecorrente.

O transistor BC547 funciona como um interruptor e amplificador de corrente. No projeto, ele amplifica a baixa corrente gerada pelos sensores piezoelétricos, tornando-a suficiente para acionar outros componentes, como os LEDs. Além disso, o transistor age como um interruptor controlado, permitindo que o Arduino regule eficientemente o fluxo de corrente para os LEDs, otimizando o funcionamento do circuito (Sedra; Smith, 2021).

Análise de dados e resultados

Todo o circuito foi montado na protoboard, conforme apresentado na Figura 11, com sua disposição detalhada a seguir.

Figura 11 – Circuito montado a protoboard



Fonte: Próprio autor.

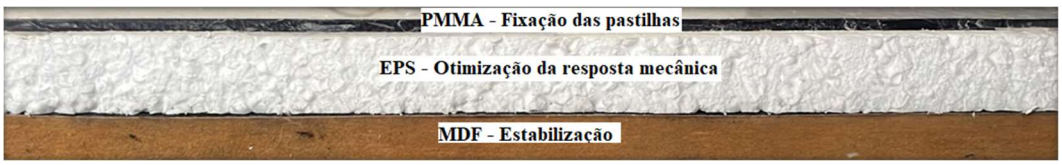
Para retificar a forma de onda gerada pelos sensores piezoelétricos, foi utilizado a clássica ponte de diodos. Essa ponte, composta por quatro diodos do tipo 1N4007, converte a

tensão alternada gerada pelos sensores em tensão contínua. A saída da ponte de diodos é conectada a um capacitor de 10 µF, que armazena temporariamente a energia retificada. Um resistor de 100 kΩ é conectado entre a saída do capacitor e a base do transistor, limitando a corrente e garantindo a polarização correta do transistor para evitar danos.

O transistor BC547 é usado como um interruptor e amplificador de corrente, controlando a liberação da energia armazenada no capacitor para acionar os LEDs. Um segundo resistor de 10 kΩ, conectado após o transistor, limita a corrente para os LEDs, protegendo-os contra sobrecorrente e garantindo uma descarga gradual do capacitor.

Para otimizar a resposta mecânica do sistema, na montagem do piso foi necessário considerar o impacto da rigidez do suporte sobre a deformação dos sensores piezoelétricos. Colocar os sensores diretamente sobre a base de madeira reduziria significativamente sua deformação, comprometendo a eficiência da geração de energia. Para resolver esse problema, as pastilhas piezoelétricas foram inicialmente coladas em uma placa de acrílico (PMMA), que serviu como base estrutural para sua fixação. Em seguida, foi utilizado um suporte intermediário feito de poliestireno expandido (EPS), conhecido popularmente como isopor, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Montagem do piso



Fonte: Próprio autor.

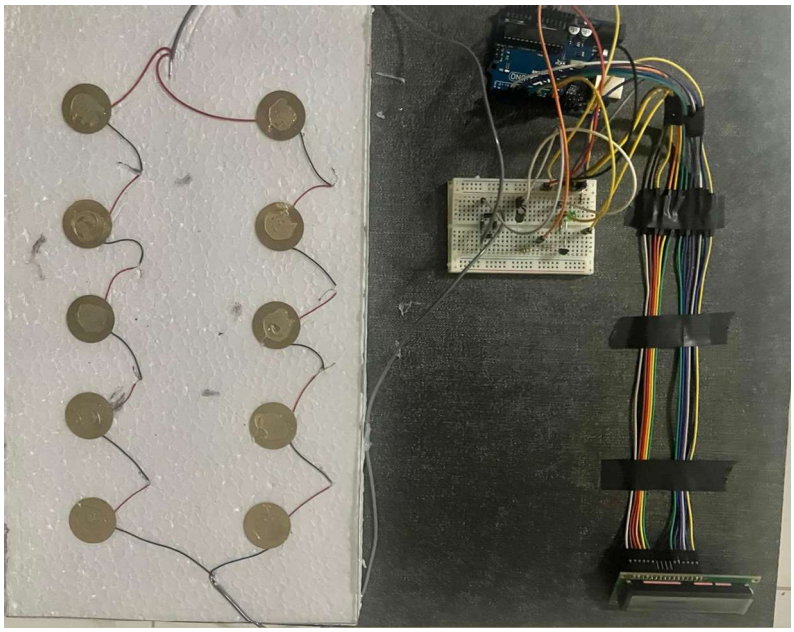
O poliestireno expandido (EPS) foi escolhido devido à sua baixa densidade e alta capacidade de absorver impactos, proporcionando uma superfície mais flexível e garantindo uma área de deformação maior para os sensores. Esse "travesseiro" de EPS permitiu uma melhor distribuição da força aplicada, aumentando a pressão exercida sobre os piezoelétricos e, consequentemente, maximizando a geração de energia elétrica (Epsole, 2024).

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Essa configuração contribuiu para a eficiência do sistema, especialmente em cenários de vibrações ou impactos irregulares, otimizando a deformação dos sensores e a captura da energia mecânica gerada.

O circuito completo, demonstrado na Figura 13, integra todas as funções: coleta e armazenamento da energia gerada, alimentando os LEDs, e permitindo que o Arduino meça e exiba as informações coletadas no display LCD. Dessa forma, o protótipo não apenas utiliza a energia coletada, mas também oferece uma visão clara e visual do seu funcionamento em tempo real, facilitando a análise de desempenho e eficiência do sistema.

Figura 13 – Circuito completo



Fonte: Próprio autor.

A protoboard foi conectada a um Arduino e a um display LCD para monitorar e exibir dados sobre a energia gerada pelas pastilhas piezoelétricas. As pastilhas foram integradas ao piso e conectadas à protoboard, onde o circuito foi montado. A saída da protoboard, após a ponte de diodos e o capacitor, é conectada a uma entrada analógica do Arduino.

Esse microcontrolador é responsável por registrar as variações de tensão geradas pelos pulsos das pastilhas piezoelétricas. Ele processa essas informações e as transmite para o display

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

LCD, que exibe, em tempo real, a quantidade de pulsos e a tensão gerada pelo sistema. Simultaneamente, o circuito aciona LEDs conectados à protoboard, indicando visualmente o funcionamento do sistema e demonstrando a energia gerada.

O código Arduino apresentado na Figura 14, por fim, realiza a leitura dos pulsos e da tensão na entrada analógica. Esse código conta quantos pulsos de energia são gerados pelas pastilhas piezoelétricas e apresenta a tensão média, atualizando o display LCD continuamente. Com isso, o sistema permite um monitoramento constante da quantidade de energia gerada.

Figura 14 – Código Arduino

```
#include <LiquidCrystal.h>
// Configuração do LCD
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

#define PIEZO_PIN A0     // Entrada analógica para o piezo
#define LED_PIN 8        // Pino do LED
#define THRESHOLD 100    // Limiar para considerar uma pressão (em milivolts)

int pressCount = 0;       // Contador de pressões
float voltage = 0;        // Tensão lida
unsigned long lastPressTime = 0;  // Para debounce
const unsigned long DEBOUNCE_DELAY = 200; // 200ms de debounce

void setup() {
  pinMode(PIEZO_PIN, INPUT);
  pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
  lcd.begin(16, 2);  // Configura o LCD com 16 colunas e 2 linhas
  lcd.print("Presses: 0");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Voltage: 0 mV");
}
void loop() {
  // Ler a tensão gerada pelo piezo
  int sensorValue = analogRead(PIEZO_PIN);
  voltage = sensorValue * (5000.0 / 1023.0); // Converte para milivolts
  // Detecta pressão se a tensão for maior que o limiar
  if (voltage > THRESHOLD) {
    unsigned long currentTime = millis();
    if (currentTime - lastPressTime > DEBOUNCE_DELAY) {
      pressCount++;
      digitalWrite(LED_PIN, HIGH); // Acende o LED
      lastPressTime = currentTime;
    }
  } else {
    digitalWrite(LED_PIN, LOW); // Apaga o LED
  }
  // Atualiza o LCD com a contagem de pressões e a tensão atual
  lcd.setCursor(9, 0);
  lcd.print(pressCount);
  lcd.setCursor(9, 1);
  lcd.print(voltage);
  lcd.print(" mV  ");  // Adiciona espaços extras para apagar valores antigos

  delay(100);
```

Fonte: Próprio autor.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Para a realização dos testes, foram aplicadas massas de 2, 5 e 10 kg, previamente calibradas pelo laboratório de calibração de equipamentos Presertec. Essa abordagem permitiu observar a resposta do sistema à aplicação de diferentes massas, possibilitando a análise da tensão gerada em cada cenário. Os resultados obtidos forneceram uma base inicial para avaliar a eficiência do protótipo e explorar sua escalabilidade em aplicações futuras.

Os resultados obtidos têm como objetivo demonstrar a relação entre a massa aplicada sobre o piso e a tensão gerada pelos sensores piezoelétricos. Para isso, foram realizados testes com diferentes valores de massa aplicados ao centro da superfície do piso. Cada massa foi testada em cinco repetições, e os valores médios de tensão gerada em cada caso foram calculados e registrados. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 1, permitindo uma análise detalhada da eficiência do sistema e da resposta dos sensores à variação de carga.

Tabela 1 – Resultados obtidos

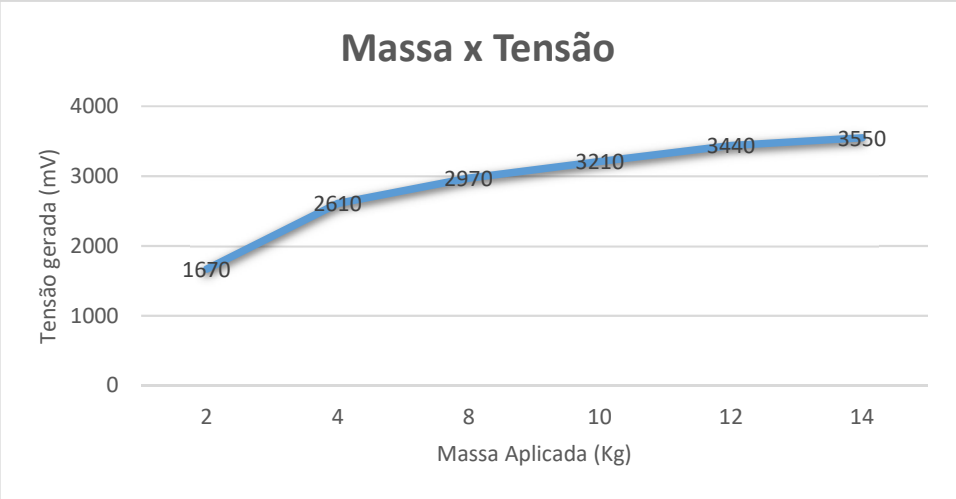
MASSA APLICADA (Kg)	TENSÃO GERADA (mV)
02	1670
05	2750
07	2910
10	3210
12	3440
15	3570

Fonte: Próprio autor (07/12/2024).

Com base nos dados apresentados na Tabela 1, foi elaborado um gráfico relacionando a tensão gerada pelos sensores piezoelétricos e a massa aplicada, apresentado na Figura 16. O gráfico permite visualizar de forma clara a tendência de aumento linear da tensão em função do peso, evidenciando a eficiência do sistema em converter energia mecânica em elétrica. Essa representação gráfica facilita a análise do comportamento do protótipo e reforça a viabilidade do uso de sensores piezoelétricos em aplicações práticas.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Figura 16 – Massa x Tensão



Fonte: Próprio autor (07/12/2024).

Com base nos resultados apresentados, observa-se que há uma relação direta entre o peso aplicado e a tensão gerada, indicando que o sistema responde proporcionalmente ao aumento da força exercida sobre a superfície.

Além disso, os dados destacam a capacidade do sistema de gerar uma tensão suficiente para alimentar pequenas cargas, como LEDs e outros dispositivos de baixa potência. Esse comportamento reflete o potencial do protótipo como uma alternativa sustentável para a coleta e reutilização de energia em aplicações de pequeno porte.

Considerações finais

Ao longo deste trabalho, foi desenvolvido e analisado um protótipo de piso gerador de energia elétrica via sensores piezoelétricos, para avaliar sua capacidade de coletar energia mecânica proveniente de vibrações e pressões constantes. Os resultados demonstraram a viabilidade da proposta e trouxeram *insights* relevantes para desenvolvimentos futuros. A seguir, são destacadas as principais conclusões do estudo:

- Viabilidade e desempenho: O protótipo comprovou a eficácia de sensores piezoelétricos na conversão de energia mecânica em elétrica. Os testes mostraram uma relação proporcional entre o peso aplicado e a tensão gerada.

- Potencial sustentável: O projeto propõe como solução a coleta de energia renovável em ambientes urbanos. Tendo como a instalação de pisos piezoelétricos em locais de grande circulação, podendo contribuir para a sustentabilidade energética e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).
- Limitações: Algumas limitações foram observadas, como baixa eficiência em cargas pequenas.
- Possibilidades de expansão: Estudos futuros podem explorar diferentes configurações de sensores para aumentar a eficiência energética, especialmente em áreas de grande fluxo, como estações de transporte, academias e shoppings.
- Contribuições acadêmicas e tecnológicas: Este estudo avança no campo da colheita de energia, propondo uma abordagem prática e sustentável para o aproveitamento de energia mecânica em dispositivos de baixa potência e sistemas urbanos inteligentes.
- Próximos passos: A continuidade do estudo envolverá a coleta de dados de corrente gerada pelos sensores para calcular a potência do sistema. Isso permitirá determinar a quantidade necessária de sensores para alimentar equipamentos específicos. Também será explorada a integração de estratégias de armazenamento e gestão de energia, aumentando a eficiência geral do sistema.

Essas conclusões reforçam o potencial do piso gerador de energia elétrica via sensores piezoelétricos, como alternativa sustentável para a geração de energia renovável em aplicações urbanas.

Referências

BEZERRA, H. S. **Proposta do uso de Pastilhas Piezoelétricas para Conversão de Energia**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2021.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2019.

CEFET-RJ. **Geração de Energia através de Materiais Piezoelétricos**. Disponível em: https://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Energia%20atrav%C3%A9s%20de%20Materiais%20Piezoel%C3%A9tricos.pdf. Acesso em:15 ago. 2024.

CHEN, X.; YANG, W.; LU, J. Circular piezoelectric sensors for energy harvesting: Advances and applications. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 250, p. 89-97, 2023.

COLOMBO, A. Piezoeletricidade: da descoberta dos Curie à aplicação em sensores. **Revista de Física Aplicada**, v. 10, n. 2, p. 45-50, 2020.

COVACI, C.; GONTEAN, A. Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review. **Sensors**, v. 20, n. 12, p. 3512, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3512/htm. Acesso em: 24 ago. 2024.

CURIE, P.; CURIE, J. Développement, par compression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémièdres à faces inclinées. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, v. 91, p. 294-295, 1880.

DIXIT, N.; SARAF, A. K.; SINGH, M. P. Design and Simulation of Piezoelectric Bimorph Cantilever Beam. **Proceedings of International Conference on Advancements in Computing & Management (ICACM),** 2019.

EPSOLE. **Propriedades do material de poliestireno expandido**. Disponível em: https://epsole.com/pt/propriedades-do-material-de-poliestireno-expandido/. Acesso em: 14 out. 2024.

FÍSICA CURIOSA. **Associação de Resistores**. Disponível em: https://fisicacuriosa.com/associacao-de-resistores/. Acesso em: 05 out. 2024.

FLOYD, T. L. **Fundamentos de Circuitos Elétricos e Eletrônicos**. 11.ed. São Paulo: Pearson, 2021.

GEOVANNAL, C. **Piezoeletricidade**. 2010. Disponível em: https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2007/GeovannaL_Cotta_RF1.pdf. Acesso em: 17 ago. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: ODS 7 – Energia limpa e acessível**. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html. Acesso em: 20 ago. 2024.

JACQUES, J.; PIERRE, C. Historical Perspectives on Piezoelectricity: The Discovery and Development. **Journal of Physics**, v. 35, n. 4, p. 1-10, 2020. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/41134156. Acesso em: 03 set. 2024.

JEON, Y. B.; JEONG, H.; HWANG, K.; KIM, J. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 122, n. 1, p. 16-22, 2005.

KIM, J.; LEE, S.; CHOI, H. Stability and Performance of Piezoelectric Materials in Humid Environments. **Materials Science and Engineering**, v. 15, n. 3, p. 243-252, 2022.

KIM, Y.; LEE, Y.; LEE, J. Energy harvesting from the motions of tire and shoe during walking. **Journal of Sound and Vibration**, v. 363, p. 126–138, 2016.

LALLART, M.; GUYOMAR, D. Electromechanical coupling enhancement by nonlinear and synchronized approaches for piezoelectric energy harvesting. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 23, n. 5, p. 1311-1319, 2008.

LEE, H.; PARK, J. Applications of Quartz in Energy Harvesting: Advances and Perspectives. **Renewable Energy Science**, v. 30, n. 1, p. 89-102, 2023.

LEFEUVE, E.; FETTWEIS, G.; OJEDA, S. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 126, n. 2, p. 405-416, 2006.

LI, Z.; WANG, C.; YU, J. Piezoelectric energy harvesting systems for low-frequency vibration. **Energy Conversion and Management**, v. 115, p. 62-73, 2023.

MINDAT. **Mineral and Crystal Properties**. Disponível em: https://www.mindat.org. Acesso em: 17 ago. 2024.

MOREIRA, Beatriz Lanna. **Geração de Energia por Sensores Piezoelétricos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

ONU Brasil. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil**. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 22 jun. 2024.

PRIYA, S.; INMAN, D. J. **Energy Harvesting Technologies**. New York: Springer, 2009.

PROGRAMA CIDADES SUSTENTÁVEIS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: ODS 7 e ODS 11**. Disponível em: https://www.cidadessustentaveis.org.br/institucional/ods. Acesso em: 20 ago. 2024.

SAFARI, A.; AKDOĞAN, E. K. Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications. **Springer Science & Business Media**, 2008.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 8.ed. São Paulo: Pearson, 2021.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic Circuits**. 2014.

SHROUT, T. R.; ZHANG, S. J. Lead-free piezoelectric ceramics: Alternatives for PZT? **Journal of Electroceramics**, v. 19, n. 1, p. 113-126, 2007.

SODANO, H. A.; O'CONNELL, C.; INMAN, D. J. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. **Shock and Vibration Digest**, v. 36, n. 3, p. 197-206, 2004.

WANG, Z. L.; SONG, J. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. **Science**, v. 312, n. 5771, p. 242-246, 2006.

WANG, Z. L.; WU, W. Nanogenerators for self-powered devices and systems. **Science Advances**, v. 1, n. 7, p. 1-12, 2015.

ZHAO, B.; QIAN, F.; HATFIELD, A.; ZUO, L.; XU, T.-B. A Review of Piezoelectric Footwear Energy Harvesters: Principles, Methods, and Applications. **Sensors**, v. 23, n. 13, p. 5841, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/13/5841. Acesso em: 3 set. 2024.

ZHANG, Y.; LIU, X.; WANG, R. Piezoelectricity in Tourmaline: A Comprehensive Review. **Journal of Advanced Materials Research**, v. 45, n. 2, p. 112-119, 2021.

ZHOU, H.; LI, X.; FAN, Y. Multilayer piezoelectric actuators for energy harvesting: An overview. **Renewable Energy Reviews**, v. 145, p. 123-134, 2024.

ZHOU, M.; LI, Q.; WANG, Z.; JIN, Y. Research progress and latest achievements of road piezoelectric vibration energy capture technology based on intelligent transportation construction. **Intelligent Transportation Infrastructure**, v. 2, 2023.