

PROTÓTIPO DE UM GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO MATERIAL PIEZOELÉTRICO

Data de submissão: 07/07/2023

Data de aceite: 07/07/2023

Fernando José Gaiotto

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Foz do Iguaçu – Paraná.
<http://lattes.cnpq.br/4472964146071694>

José Roberto Dias Pereira

Universidade Estadual de Maringá – UEM, Maringá – Paraná.
<http://lattes.cnpq.br/1200043975932513>

Katiani Pereira da Conceição

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Foz do Iguaçu – Paraná.
<http://lattes.cnpq.br/1554427612484722>

Paulo Henrique Soares

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Guarapuava – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/8572034325637373>

RESUMO: O consumo de energia elétrica está aumentando constantemente, seja para carregar carros elétricos, alimentar aparelhos eletrônicos, suprir as necessidades dos bens de consumo ao nosso redor ou garantir seu funcionamento adequado. Buscar diversificar as fontes de energia elétrica tem se mostrado a

abordagem mais racional para aproveitar esse recurso em diversas finalidades. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo construir um protótipo gerador de energia elétrica, utilizando elementos cerâmicos de material piezoelétrico, capaz de converter a energia mecânica de vibração em energia elétrica. Para alcançar esse objetivo, utilizou-se o método de pesquisa aplicada, comumente empregado em problemas de engenharia, permitindo obter resultados concretos e aplicáveis ao protótipo proposto. O sistema consiste em elementos piezoelétricos fixados a um motor elétrico, que são responsáveis por converter a energia de vibração em energia elétrica. Essa energia elétrica, gerada pelos elementos piezoelétricos, foi retificada por um circuito de diodos e armazenada em capacitores e/ou baterias. O protótipo, composto por um único elemento piezo, operando durante 1 hora por dia, foi capaz de gerar energia elétrica suficiente para manter 4 LEDs de alto brilho (4 W) acesos por um tempo superior a 3,6 minutos. Esse sistema demonstrou um grande potencial de aplicação, especialmente quando projetado com um número maior de elementos piezoelétricos, ou seja, um maior número de conversores de energia, e com um tempo

de funcionamento mais prolongado.

PALAVRAS-CHAVE: Energia alternativa. Conversão de energia. Piezoelectricidade. Protótipo de micro gerador de energia.

ABSTRACT: Electricity consumption is constantly increasing, whether it is to charge electric cars, power electronic devices, meet the needs of the consumer goods around us or ensure their proper functioning. Seeking to diversify the sources of electrical energy has proven to be the most rational approach to take advantage of this resource for different purposes. In this context, this work aims to build a prototype generator of electrical energy, using ceramic elements of piezoelectric material, capable of converting the mechanical energy of vibration into electrical energy. To achieve this objective, the applied research method, commonly used in engineering problems, was used, allowing to obtain concrete results applicable to the proposed prototype. The system consists of piezoelectric elements attached to an electric motor, which are responsible for converting vibration energy into electrical energy. This electrical energy, generated by piezoelectric elements, was rectified by a diode circuit and stored in capacitors and/or batteries. The prototype, composed of a single piezo element, operating for 1 hour a day, was able to generate enough electrical energy to keep 4 high-brightness LEDs (4 W) on for a time greater than 3.6 minutes. This system showed great application potential, especially when designed with a greater number of piezoelectric elements, that is, a greater number of energy converters, and with a longer operating time.

KEYWORDS: Alternative energy. Energy conversion. Piezoelectricity. Prototype of micro power generator.

1 | CONTEXTUALIZANDO

Atualmente, o uso de equipamentos eletrônicos vem crescendo constantemente. Temos celulares, tablets, modems e roteadores que dependem de alimentação elétrica. Diante desse cenário, torna-se necessário e crucial o desenvolvimento de novos sistemas de geração de energia. Embora já existam diversos meios de geração de energia disponíveis, a escolha entre eles representa uma corrida tecnológica para muitos países atualmente.

Segundo Gaiotto (2017), nas últimas décadas a produção de materiais e dispositivos inteligentes tem atraído a atenção pesquisadores das mais diversas áreas do conhecimento científico e tecnológico aplicado. Novas linhas de pesquisa dentro da Física, engenharia de materiais e Engenharia Física contribuíram para tal feito. Denomina-se materiais inteligentes os materiais piezoelétricos, eletrostritivos, magnetostritivos e piezomagnéticos. Esses materiais têm importantes propriedades físicas e proporcionam uma vasta gama de aplicações tecnológica, como por exemplo, sensores de vibração, sensoriamento magnético, microgeração de energia e controle de corrente elétrica em circuitos de potência.

As formas de geração de energia limpa, são muitas, incluindo energia solar, energia térmica, energia eólica, energia das ondas do mar e até mesmo a energia proveniente de vibrações. Embora seja pouco utilizada e mencionada, a energia das vibrações se apresenta como uma fonte de energia potencial para a adoção de sistemas microeletrônicos de baixa

potência.

Esta energia mecânica de vibração pode ser convertida em energia elétrica útil, por meio, de transdutores piezoelétricos, eletromagnéticos e eletrostáticos. O transdutor piezoelétrico é considerado uma escolha potencial quando comparado com transdutores eletromagnéticos e eletrostáticos devido à sua alta densidade de energia. Este projeto, tem como objetivo principal, estudar o princípio de conversão de energia mecânica em energia elétrica - efeito piezoelétrico direto, utilizando elementos transdutores piezoelétricos, de Titanato Zirconato de Chumbo, de classe de dureza intermediária (PZT).

No segundo trimestre de 2022, o consumo de eletricidade apresentou um aumento de 1,7% em relação ao mesmo período de 2021. Um destaque nesse resultado é a expansão de 9,9% no consumo da classe comercial. A classe industrial registrou um aumento de 0,7% no consumo, enquanto a classe residencial teve uma queda de 0,7% no mesmo período (EPE, 2022). Estes dados, reafirmam a necessidade de aumentar a produção de energia elétrica no Brasil.

Neste contexto, o trabalho, apresenta um protótipo gerador de energia elétrica, utilizando elementos piezoelétricos para converter energia mecânica de vibração de máquinas rotativas em energia elétrica e armazená-la em um banco de baterias ou utilizá-la de forma síncrona.

O método científico utilizado neste trabalho foi o método de pesquisa aplicada, amplamente utilizado em problemas de engenharia. Esse método permitiu obter resultados concretos e aplicáveis ao protótipo proposto. Para alcançar esse objetivo, foram realizadas análises quantitativas, compreensão dos fenômenos físicos envolvidos e aplicação de conceitos básicos de eletrônica. Os dados foram coletados por meio de medições no circuito eletrônico do protótipo, posteriormente analisados e projetados para funcionamento em períodos mais longos.

O texto a seguir, está organizado em cinco sessões, são elas: fundamentação teórica acerca da piezoeletricidade; circuito retificador com diodos; materiais e método; resultados e discussões, e por fim, as considerações finais.

2 | A PIEZOELETRICIDADE

Os irmãos Jacques e Pierre Curie fizeram uma descoberta importante em 1880: ao aplicar pressão em cristais de quartzo e sais de Rochelle, eles observaram a geração de um potencial elétrico. Esse fenômeno foi chamado de “efeito piezoelétrico direto”. A palavra “piezo” vem do grego e significa pressão, portanto, o efeito piezoelétrico é o potencial elétrico gerado pela deformação do centro de carga da cela unitária de materiais piezoelétricos. Essa propriedade desses materiais é conhecida como piezoeletricidade (GAIOTTO, 2017). Por sua vez, os materiais piezoelétricos também apresentam um efeito de conversão, denominado “efeito piezoelétrico inverso”, que consiste na capacidade de

sofrerem deformação mecânica quando submetidos a um campo elétrico.

O efeito da piezeletricidade pode ser compreendido de forma simplificada como uma distorção na estrutura da cela unitária de um composto piezoelétrico, conforme ilustrado na Figura 1. Na Figura 1(a), temos a representação da cela unitária do cristal de quartzo sem a aplicação de tensão mecânica ou campo elétrico. Já na Figura 1(b), é mostrada uma tensão mecânica aplicada à cela unitária, resultando em sua deformação. Quando a cela está em seu estado natural, sem tensão mecânica, ela permanece neutra, com as cargas negativas e positivas posicionadas espacialmente no mesmo centro.

No entanto, ao aplicar uma tensão mecânica à cela unitária, ocorre uma deformação que desloca a posição do centro de cargas (positivas e negativas), resultando em uma diferença de potencial na cela unitária por meio do efeito piezoelétrico direto. (GAIOTTO, 2017).

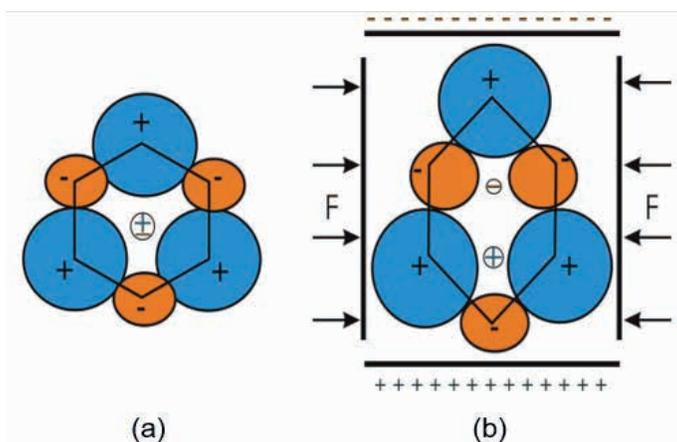


Figura 1: (a) Cela unitária neutra; (b) Tensão mecânica aplicada na cela unitária.

Fonte: Adaptado de VIERA (2017).

Há muito tempo, existem aplicações comerciais com materiais piezoelétricos, mas foi a partir de 1917 que suas aplicações foram reconhecidas oficialmente. Os primeiros dispositivos piezoelétricos foram construídos utilizando quartzo e turmalina. Posteriormente, novos materiais foram desenvolvidos, como o Titanato de bário, que é amplamente utilizado em capacitores devido ao seu alto valor de constante dielétrica (GAIOTTO, 2017).

Em alto-falantes e buzzers, comumente utilizados em diversos dispositivos eletrônicos, é empregada uma cerâmica piezoelétrica presa a um disco fino de latão. Esses componentes operam com base no princípio do efeito piezoelétrico inverso, no qual um sinal elétrico, frequentemente modulado em amplitude e frequência, é aplicado ao material piezoelétrico. Em resposta, o material sofre deformação mecânica e emite um som ou um bipe.

Até o momento, fica evidente a importante contribuição dos materiais piezoelétricos

para o avanço tecnológico. Na área da eletrônica, por exemplo, há uma constante demanda por circuitos elétricos cada vez menores, e a ciência dos materiais tem desempenhado um papel crucial nessa conquista. Segundo Montanher (2013), o dielétrico à base de PZT (Titânio-Zircônio), foi fundamental para o desenvolvimento de circuitos integrados monolíticos de micro-ondas, conhecidos como MMICs, permitindo uma significativa redução de tamanho e maior permissividade.

De acordo com Vieira (2017), acredita-se que os materiais piezoelétricos terão um papel fundamental no futuro, sendo responsáveis por diversas inovações, tais como: carregar celulares por meio de toques, carregar baterias, alimentar marca-passos utilizando a própria respiração do corpo, entre outras aplicações.

Mota (2021), realiza uma análise exploratória das principais revisões bibliográficas envolvendo aplicações com materiais piezoelétrico para geração de energia elétrica, e aponta a família de PZTs como sendo excelentes materiais para tal aplicação.

Embora breve, a fundamentação teórica sobre os materiais piezoelétricos e a piezoelectricidade é considerada suficiente para alcançar o principal objetivo deste trabalho: a construção de um protótipo de gerador de energia elétrica utilizando materiais piezoelétricos.

3 | CIRCUITO RETIFICADOR COM DIODOS

Embora o circuito equivalente para um elemento de material cerâmico de PZT, seja considerado um circuito RLC em paralelo, não entraremos neste mérito nesta seção. O protótipo gerador de energia elétrica necessitará de um circuito elétrico complementar ao circuito intrínseco do material piezo, isto é, um circuito retificador de onda completa, composto por diodos, capacitores e resistores. A saber, neste caso, ao converter energia mecânica da vibração de motores e/ou máquinas rotativas, em energia elétrica, os elementos cerâmicos piezo, geram um sinal senoidal, o qual, foi retificado, utilizando diodos.

Uma das formas de transformar o sinal alternado em um sinal contínuo, é utilizar um circuito retificador. Retificar é o processo de eliminar (em meia onda) ou tornar positivo (em onda completa) o semiciclo negativo do sinal da rede elétrica, permitindo que a corrente circule apenas em um sentido. Os dispositivos responsáveis por essa função são chamados de retificadores, e os componentes específicos utilizados para realizar a retificação são os diodos retificadores. Dado que o protótipo foi construído utilizando um retificador de onda completa em ponte, esta revisão se concentrará especificamente nesse tipo de circuito retificador. A Figura 2, ilustra um circuito retificador de onda completa contendo quatro diodos em ponte.

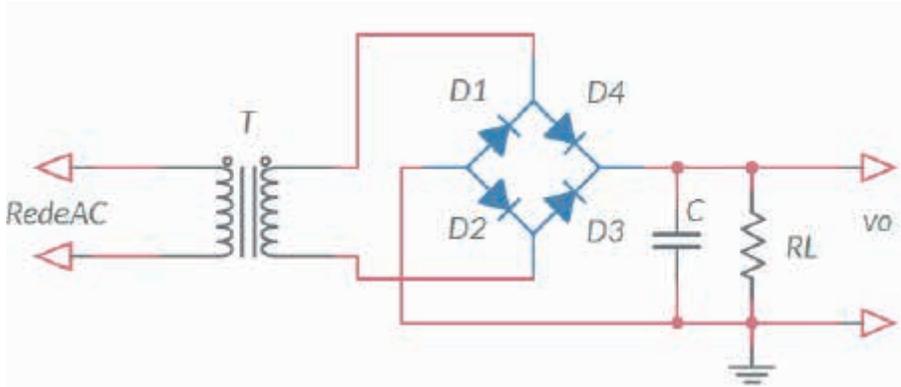


Figura 2 – Circuito retificador de onda completa em ponte.

Fonte: Zurro (2019).

Nesse circuito, os diodos são dispostos de forma a permitir que a corrente flua em direções alternadas durante cada semiciclo da corrente alternada de entrada. Como resultado, a corrente é retificada e flui em um único sentido ao longo de todo o ciclo, produzindo uma forma de onda pulsante, mas com polaridade constante (SADIKU, 2014). Após o sinal ser retificado, normalmente utiliza-se um capacitor (RL) em paralelo com a carga (C), conhecido como capacitor de *ripple*, como ilustrado na Figura 2.

A função do capacitor de *ripple* em um circuito retificador é reduzir as variações ou oscilações indesejadas na corrente contínua (DC) produzida pelo retificador. Essas variações são conhecidas como *ripple* ou ondulação, e são causadas pelo fato de que a corrente retificada não é perfeitamente constante, mas apresenta pequenas flutuações devido à natureza pulsante da retificação.

Ao conectar um capacitor em paralelo com a saída do retificador, o capacitor é capaz de armazenar energia durante os picos de corrente e fornecê-la durante os períodos em que a corrente é menor. Isso ajuda a suavizar a forma de onda da corrente, reduzindo o *ripple* e fornecendo uma corrente mais estável e próxima de um valor constante (BOYLESTAD, 2013).

Durante a polarização direta do diodo, ocorrem fenômenos como recombinação e dissipação de energia térmica. Esses processos causam uma queda de tensão no diodo. No caso de diodos de silício, a queda de tensão direta típica é de aproximadamente 0,7 volts. Já nos diodos de germânio, a queda de tensão direta é em torno de 0,3 volts (BOYLESTAD, 2013). Como em circuito retificador de onda completa em ponte utiliza 4 diodos, sendo 2 diodos polarizados de forma direta em cada semiciclo, esta queda de tensão é o dobro.

Três tipos de diodos foram objetos de estudos no quesito circuito retificador de onda completa: o diodo 1N4007, o diodo 1N4148 e o diodo Schottky 1N5819.

Um dos diodos mais comuns e amplamente utilizados na eletrônica é o diodo

1N4007. Ele pertence à família de diodos retificadores de silício e é amplamente disponível no mercado. O mesmo é capaz de trabalhar com uma corrente máxima de 1 ampere e uma tensão reversa de até 1000 volts.

Já o diodo 1N4148 é um diodo de uso geral de silício que também possui várias aplicações na eletrônica. Chama a atenção por apresentar comutação rápida, e, portanto, pode ser utilizado em circuitos onde é necessário um tempo de resposta rápido, como em circuitos de chaveamento e osciladores.

O diodo Schottky é usado em circuitos de comutação, sistemas de pulsos de curta duração e circuitos de proteção contra transientes. A queda de tensão na polarização direta desse diodo é muito pequena e tem comutação ultrarrápida, o que o faz adequado para as aplicações mencionadas. Estas características, nos chamou muito a atenção, e, portanto, nesta categoria, foi escolhido o modelo 1N5819.

4 | DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se no método de pesquisa aplicada, amplamente utilizado na resolução de problemas de engenharia. A combinação desse método com a abordagem quantitativa, que envolve a compreensão de fenômenos físicos, aumenta ainda mais a eficácia do estudo. Juntos, esses métodos visam a pesquisa científica, explorando as leis gerais e princípios físicos de funcionamento relacionados ao protótipo gerador de energia elétrica, que constitui o principal objetivo deste trabalho.

Neste trabalho, foi utilizado cerâmicas piezoelétricas do tipo PZT-5A, disponíveis em forma de discos finos, polarizadas na direção transversal (modo espessura). Esses materiais são amplamente encontrados no mercado em diversas formas e tamanhos, tornando-os convenientes para o propósito deste estudo. Para facilitar ainda mais a fixação dos terminais às cerâmicas piezoelétricas, optaremos por utilizar os *buzzers*, que consistem em buzinas eletrônicas compostas por uma fina camada de material piezoelétrico colada a um disco de latão, como ilustrado na Figura 3.



Figura 3: Elementos piezoelétricos comerciais – *buzzers*.

Fonte: O autor (2022).

De forma específica, os seguintes materiais foram selecionados e utilizados na construção do protótipo gerador de energia elétrica:

- *Buzzers* de 35mm de diâmetro;
- Cabo elétrico para ligação;
- Diodos 1N4007, 1N4148, 1N5819;
- Capacitores Eletrolíticos 100 μ F, 470 μ F, 1000 μ F-25V;
- Resistores 330 Ω \pm 1%(1/4W), 1k Ω \pm 1%(1/4W), 10k Ω \pm 1%(1/4W);
- LEDs SMD alto brilho (4 W).

Equipamentos, como ferro de solda, osciloscópio e multímetro digital, também foram utilizados.

O protótipo como um todo é composto por três partes: fonte de vibração, onde estão fixados os elementos *buzzers* (1); circuito retificador (2); armazenamento ou consumo imediato da energia elétrica gerada (3).

A fonte de vibração (1) é o elemento principal deste trabalho. Um conjunto de transdutores piezoelétricos, fixo neste local, é capaz de extrair energia mecânica de vibração dos motores elétricos CA, máquinas rotativas, unidades condensadoras de ar condicionado, entre outros. Esses equipamentos geralmente operam continuamente, apresentando vibração constante, o que os torna, locais ideais para a utilização de elementos piezoelétricos para captação de vibração. Isso difere da abordagem comumente encontrada em outros trabalhos, que utilizam elementos piezo para gerar energia elétrica por meio da energia mecânica de pedestres passando por tapetes contendo buzzers, nas calçadas, ou, carros e/ou ônibus nas ruas e estradas.

O circuito eletrônico (2) consiste em pontes retificadoras de diodos e capacitores, um para cada transdutor. O objetivo desse circuito é captar os picos de tensão elétrica gerados pelos transdutores, retificá-los e convertê-los em tensão contínua. Esses picos de tensão são gerados tanto na tração quanto na compressão de cada célula piezoelétrica.

Após passar pelo circuito retificador, a corrente elétrica, agora em forma de corrente contínua, é utilizada de forma síncrona para acender quatro pequenos LEDs e/ou armazenada em capacitores (3).

A energia armazenada pode alimentar dispositivos eletrônicos de baixa potência, como modems *Wi-Fi*, radares de trânsito, câmeras IP e até mesmo carregar outros dispositivos, como *smartphones*, fones de ouvido sem fio e *tablets*.

Uma representação esquemática do trabalho é apresentada na Figura 5. Os elementos piezoelétricos (*buzzers*), também conhecidos como transdutores, são fixados na estrutura, bancada ou carenagem dos motores elétricos ou máquinas rotativas. A energia mecânica é convertida em energia elétrica pelo efeito piezoelétrico direto e retificada com o uso da eletrônica. Por fim, ela é utilizada instantaneamente ou armazenada na bateria.

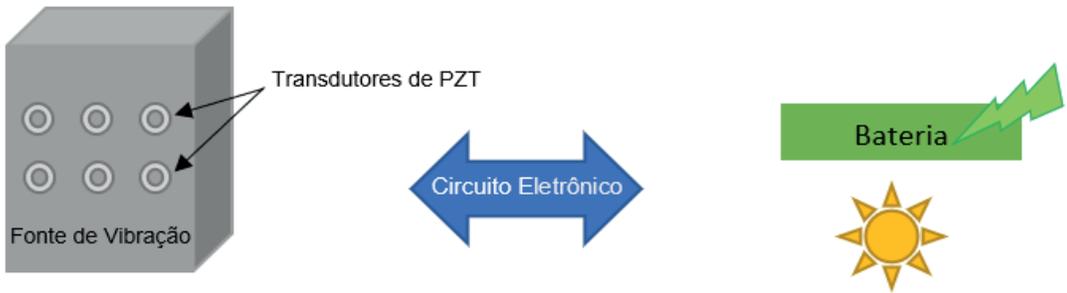


Figura 4: Esquema representativo do desenvolvimento do trabalho.

Fonte: O autor (2022).

5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

As máquinas rotativas são grandes fontes de energia de vibração. Em muitos casos, essa vibração possui pequenas amplitudes e alta frequência, como ocorre nos ambientes que cercam os motores elétricos. Diante desse cenário, decidimos selecioná-lo como objeto de estudo, com o objetivo de captar a energia mecânica de vibração de um motor elétrico e convertê-la em energia elétrica por meio do efeito piezoelétrico direto, do material piezoelétrico (*buzzers*). Para isso, utilizamos um motor elétrico de corrente alternada (CA) da marca EBERLE, ligado à rede elétrica convencional de 110 V/60 Hz. O motor possui uma potência de $\frac{1}{2}$ cv e é constituído por dois polos. Ele foi fixado em uma bancada com eixo livre (sem roldana), conforme ilustrado na Figura 5.



Figura 5 – Motor Elétrico CA da EBERLE.

Fonte: O autor (2022).

Uma abordagem óbvia seria fixar os *buzzers* diretamente no corpo do motor. No entanto, isso seria um grande erro por dois motivos:

- os elementos piezoelétricos captariam os ruídos da rede elétrica de 60 Hz;
- o campo magnético gerado pelo motor induziria correntes de Foucault nos ele-

todos dos elementos piezo.

Em ambas as situações, haveria uma diferença de potencial que não seria proveniente da vibração do motor ou do ambiente em que ele está localizado. Portanto, não nos interessa! Para contornar essa questão, foi necessário isolar eletricamente os *buzzers* da carcaça do motor e afastá-los do seu corpo, conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 6 – Montagem e fixação de um elemento Piezoelétrico.

Fonte: O autor (2022).

O elemento piezo, neste caso um *buzzer*, de 35 mm de diâmetro, tem a capacidade de captar a energia de vibração do sistema composto pelo motor, bancada, haste de fixação, entre outros elementos. Essa energia é convertida em picos de tensão elétrica que se repetem ao longo do tempo, formando senoides com diferentes frequências e amplitudes, como ilustrado na Figura 7. Nessa imagem, é possível observar o registro da tela do osciloscópio na função Matemática - FFT (Transformada Rápida de Fourier), que confirma a presença de picos em diversas amplitudes e frequências.

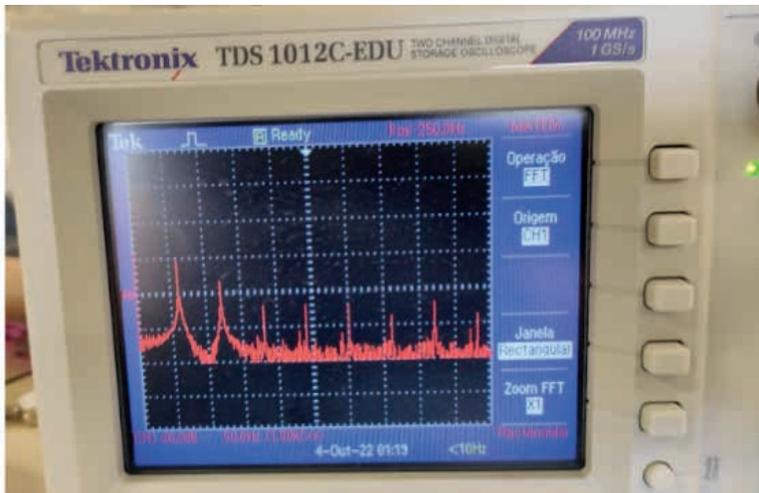


Figura 7 – Registro da tela do osciloscópio da função matemática - FFT.

Fonte: O autor (2022).

Para converter este sinal, que possui característica AC (corrente alternada), em CC (corrente contínua), foram construídos inicialmente três circuitos retificadores de onda completa, utilizando diodos de diferentes tipos:

- 1N4007;
- 1N4148;
- 1N5819.

A Figura 8 ilustra a representação esquemática do circuito elétrico geral, construído utilizando o software MULTISIM Live, uma plataforma gratuita, disponibilizada no site da *National*. Notem, que a parte à esquerda do circuito (circuito retificador) deve ser replicada para cada elemento piezoelétrico, e é o objeto desta pesquisa.

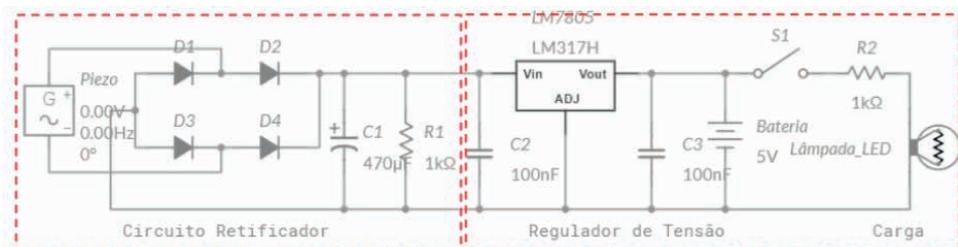


Figura 8 – Representação generalizada do circuito elétrico retificador e carga.

Fonte: O autor (2022).

Já a Figura 9, ilustra três pontes retificadoras de onda completa com os diodos, montadas em uma placa de fenolite. Foram utilizados os diodos 1N4007, 1N5819 e 1N4148.

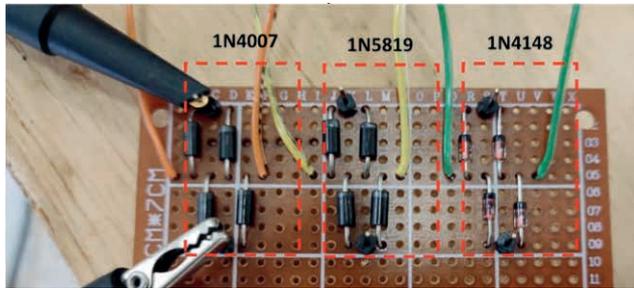


Figura 9 – Ponte retificadora de onda completa com diodos: 1N4007; 1N4148; e 1N5819.

Fonte: O autor (2022).

Realizaram-se diversas configurações para determinar o tipo ideal de diodo a ser utilizado no circuito retificador. Conforme o esperado, os diodos 1N5819, também conhecidos como diodos Shockley, demonstraram resultados mais satisfatórios devido à sua barreira de potencial em torno de 0,3 V. Essa confirmação pode ser observada nas Figuras 10, 11 e 12, que apresentam a resposta elétrica de um único elemento piezo. É perceptível que a Figura 12 exibe um sinal elétrico com um semiciclo mais próximo do ideal, com menor ruído e maior amplitude.

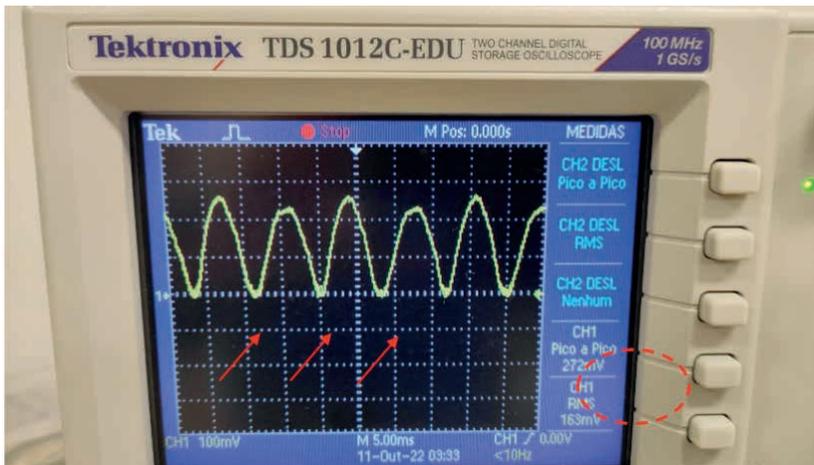


Figura 10 – Sinal elétrico retificado com a ponte composta por diodos 1N4007.

Fonte: O autor (2022).

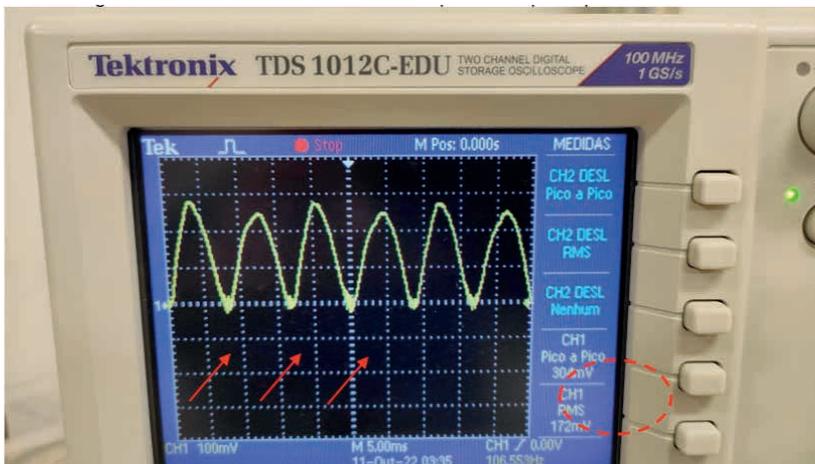


Figura 11 - Sinal elétrico retificado com a ponte composta por diodos 1N4148.

Fonte: O autor (2022).

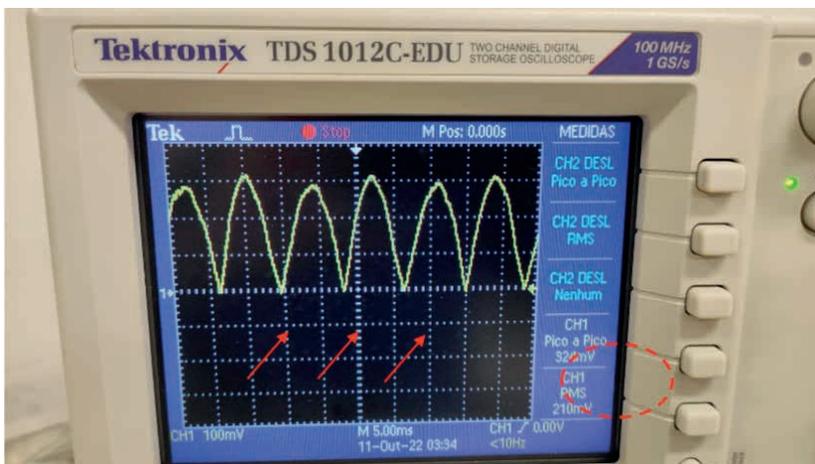


Figura 12 - Sinal elétrico retificado com a ponte composta por diodos 1N5819.

Fonte: O autor (2022).

Apresentaremos, a seguir, os resultados do protótipo, incluindo projeções e perspectivas, no quesito geração de energia elétrica e função do tempo de funcionamento.

O sistema foi construído com um único elemento transdutor de PZT, que converte a energia de vibração em eletricidade. Essa energia elétrica gerada foi utilizada para carregar um capacitor eletrolítico de 470 μF , levando-o de 0,0 V a 10,0 V em aproximadamente 1 minuto. Em seguida, o capacitor foi conectado a um resistor de 1 k Ω , em paralelo, que atuou como limitador de corrente. Por fim, quatro LEDs foram ligados em paralelo para demonstração visual do funcionamento. A Figura 13, ilustra os LEDs acessos, e a Figura 14, o protótipo sendo medido.



Figura 13 – LEDs acessos com a energia elétrica do protótipo.

Fonte: O autor (2022).

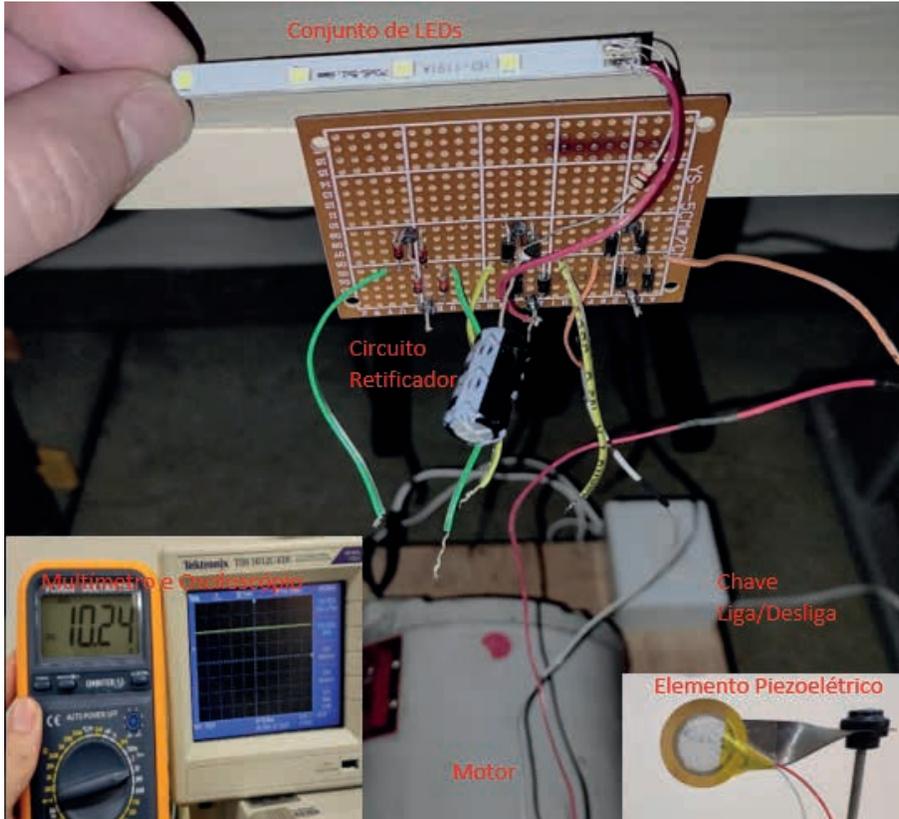


Figura 14 – Sistema de aquisição de energia elétrica implementado.

Fonte: O autor (2022).

Observe no canto inferior esquerdo da Figura 14 que há um osciloscópio conectado à saída do retificador, registrando a presença do sinal de corrente contínua (CC). O multímetro, na escala CC, confirmava a sua intensidade.

Devido a danos acidentais em alguns elementos piezoelétricos, o número de transdutores PZT disponíveis ficou limitado a apenas um, impossibilitando a utilização de um banco de carga ou bateria para armazenamento da energia elétrica gerada.

Com base nos resultados apresentados até o momento, realizou-se uma análise e uma prospecção, as quais serão descritas a seguir.

A primeira análise levou em consideração a capacitância do capacitor e a tensão

sobre ele, e desse modo, determinou-se a carga, em Coulomb, armazenada no capacitor, durante um determinado tempo. Temos

$$Q = C.V$$

$$Q = 470.10^{-6} \times 10,0$$

$$Q = 4,70mC$$

Normalmente a capacidade das baterias é expressa em mAh, que representa miliampere-hora. Para realizar uma análise nesse contexto, fizemos o uso de SADIKU 2014, que estabelece que 1,00 mAh equivale a 3,6 Coulombs. Portanto, essa carga corresponde a aproximadamente $1,31 \times 10^{-3}$ mAh. Com base nesse valor, realizamos uma projeção considerando um número maior de sistemas de conversão de energia e um tempo de funcionamento mais longo. Os resultados obtidos foram organizados na Tabela 1.

Nº de Elementos Transdutores (Buzzers)	Tempo funcionamento do conversor de energia	Capacidade de energia armazenada em mAh	Tempo dos 4 LEDs aceso
1	1 min	$1,30 \cdot 10^{-3}$	3,6 s
1	1 h	$78,0 \cdot 10^{-3}$	3,6 min
10	1 h	$780 \cdot 10^{-3}$	36 min
10	1 dia	18,7	14,4 h
100	30 dias	5610	4320 h

Tabela 1 – Prospecção da energia elétrica produzida pelo sistema conversor de energia.

Fonte: O autor (2022).

Embora algumas dezenas de μAh possam parecer uma quantidade pequena de energia elétrica gerada, devemos considerar que essa energia seria desperdiçada. À medida que aumentamos o tempo de funcionamento do sistema de conversão e a quantidade de elementos piezoelétricos, conseguimos obter energia suficiente para carregar completamente a bateria de um *smartphone*, que geralmente possui uma capacidade de aproximadamente 5000 mAh. Além disso, esta mesma energia, seria capaz de manter os mesmos quatro LEDs acesos por até 180 dias. Essas perspectivas, colocam este protótipo como um sistema potencial no mercado de energias alternativas.

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa aplicada, há perspectivas promissoras para o futuro. A comprovação prática do efeito piezoelétrico direto em materiais como PZTs abre caminho para explorar fontes de vibrações mecânicas provenientes de máquinas rotativas em funcionamento, um local ainda pouco explorado para geração de energia elétrica

O protótipo apresentado neste trabalho, demonstrou ser eficiente, pois apresentou resultados satisfatórios, e atingiu o seu objetivo com sucesso. A energia elétrica gerada por ele, após ser retificada por uma ponte de diodos, foi utilizada para o acendimento de quatro LEDs SMD de 1 W de potência, cada um.

Os resultados gerados pelo protótipo, com um único elemento piezo, foram analisados e nos levou a concluir que, se funcionar 1 hora por dia, gerará energia elétrica suficiente para manter 4 LEDs acesos por 3,6 minutos. E ainda, em prospecção, demonstrou grande potencial de aplicação, quando expandido seu tempo de funcionamento e número de elementos piezo.

Por fim, podemos concluir que o protótipo gerador de energia elétrica, se apresenta como uma forma alternativa de gerar energia elétrica, para ser utilizada equipamentos eletroeletrônicos que utilizam baixa potência.

Como perspectivas futuras, existem várias possibilidades de aprimoramento e expansão do protótipo. É viável analisar a viabilidade de instalar o protótipo em outro local, como uma máquina condicionadora de ar, e identificar o ponto ideal de instalação levando em consideração a incorporação de mais elementos transdutores (buzzers). Além disso, uma opção interessante seria construir um banco de cargas com baterias, permitindo o armazenamento da energia elétrica gerada para uso posterior, somente quando necessário. Essas medidas contribuiriam para maximizar a eficiência e o aproveitamento da energia gerada pelo sistema.

REFERÊNCIAS

ATCP Engenharia Física. Applications note RT – ATCP-01. **Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades**. Disponível em: www.atcp-ndt.com/imagens/produtos/ceramicas/artigos/RT-ATCP-01.pdf. Acesso em 20 out de 2016.

BOYLESTAD, R. L.; NASHESKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education, 2013.

BOLETIM TRIMESTRAL DE CONSUMO DE ELETRICIDADE. Ano III. Número 9. 1º trimestre de 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-483/topico-634/Boletim%20Trimestral%20de%20Consumo%20de%20Eletricidade%20ANO%20III%20-%20N%C2%BA9.pdf> Acesso em 05 Set de 2022.

GAIOTTO, F. J., **Desenvolvimento De Sensores Magnetoelétricos Multifuncionais E Sua Integração Em Dispositivos Inteligentes: Detecção De Correntes Elétricas E Campos Magnéticos**. 2017. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Estadual de Maringá. UEM. Maringá, Paraná. 141 f. (2017).

MONTANHER, D. Z. **Compósitos Laminares Magnetoelétricos Aplicados ao Sensoriamento de Campos Magnéticos**. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Estadual de Maringá. UEM. Maringá, Paraná. 95 f. (2013).

MOTA, B. C., **Captação E Geração De Energia No Pavimento Rodoviário Com A Aplicação De Células Piezoelétricas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) - Universidade Federal Do Ceará. UFC, Fortaleza, Ceará. 133 f. (2021).

MULTISIM LIVE **Simulador de circuitos eletrônicos**. Disponível em: <https://www.multisim.com/content/8pZewnb2JruTfigB9waxhc/prototipo-3/open/>. Acessado em 20 Set de 2022.

MURATA ELECTRONICS, PZT **Application Manual**, June 1999. Disponível em <http://www.aurelienr.com/electronique/piezo/piezo.pdf>. Acesso em 16 Jan de 2022.

SADIKU, M. N. O.; MUSA, S. M.; ALEXANDER, C. K. **Análise de circuitos elétricos com aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2014.

VIEIRA, R. G. **A piezoeletricidade no cotidiano!** Ciência e Diversão. Disponível em: <http://parquedaciencia.blogspot.com.br/2013/08/a-piezoeletricidade-no-cotidiano.html>. Acesso em 03 mar 2017.

ZURO, V. R., **Tópicos Especiais em Engenharia Eletrônica**. 2021. Material didático institucional – UNINTER.