

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
LUDMILA MECIAS DE REZENDE

GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA PIEZOELETRICIDADE

Varginha
2020

LUDMILA MECIAS DE REZENDE

GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA PIEZOELETRICIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. MSc. João Mário Mendes de Freitas.

Varginha

2020

LUDMILA MECIAS DE REZENDE

GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA PIEZOELETRICIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof. MSc. João Mário Mendes de Freitas.

Prof.

Prof.

OBS.:

Dedico a minha a família pelo apoio constante,
e a todos que contribuíram para o alcance de
mais uma etapa na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, professores, amigos, colegas e principalmente ao meu namorado e melhor amiga por terem contribuído na concretização deste trabalho.

“O segredo para ser criativo está em dormir bem e abrir a sua mente para as possibilidades infinitas. O que seria um homem sem sonho?”

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho aborda a geração de energia elétrica através da piezoelectricidade. Tal abordagem se justifica devido a dependência de energia elétrica em função do avanço tecnológico. O objetivo deste trabalho é analisar as variações obtidas ao submeter um protótipo com variações em sua configuração. Assim será possível identificar qual configuração otimizará a geração de energia, e reduzir custo da elaboração de um modelo aplicável. Esta tarefa será realizada ao submeter os materiais piezoelétricos a ensaios de pressão e seus resultados serão mensurados através do osciloscópio. Inicialmente, será verificado através de ensaios preliminares a geração de energia elétrica em uma pastilha individual. Os resultados possibilitarão a elaboração de modelos teóricos que servirão como base de comparação para os protótipos com os tipos de ligação variadas entre em paralelo, série e mista. Com os resultados dos ensaios práticos foi verificado que os protótipos tiveram grandes variação entre as ligações, a ligação que obteve o melhor desempenho foi a ligação em paralelo. Outro ponto observado é quanto a curvatura do gráfico, o gráfico de corrente apresenta maior linearidade, supõe-se que se utilizar valores intermediários é possível estabelecer, com auxílio de ferramentas matemáticas como por exemplo regressão linear, uma equação que rege esse fenômeno.

Palavras-chave: Piezoelectricidade. Energia. Fontes renováveis. Energia em Microescala.

ABSTRACT

This work addresses the generation of electrical energy through piezoelectricity. Such an approach is justified due to the dependence on electric energy due to technological advances. The objective of this work is to analyze the variations obtained when submitting a prototype with variations in its configuration. Thus, it will be possible to identify which configuration will optimize energy generation and reduce the cost of developing an applicable model. This task will be performed when submitting piezoelectric materials to pressure tests and their results will be measured through the oscilloscope. Initially, it will be verified through preliminary tests the generation of electric energy in an individual tablet. The results will enable the development of theoretical models that will serve as a basis for comparison for prototypes with different types of connection between parallel, series and mixed. With the results of the practical tests it was verified that the prototypes had great variation between the connections, the connection that obtained the best performance was the connection in parallel. Another point observed is regarding the curvature of the graph, the current graph has greater linearity, it is assumed that using intermediate values it is possible to establish, with the aid of mathematical tools such as linear regression, an equation that governs this phenomenon.

Keywords: *Piezoelectricity. Energy. Renewable sources. Microscale Energy.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento das cargas presentes nas moléculas dos cristais piezoelétricos	18
Figura 2 - Relação de um elemento piezoelétrico a estímulos aplicados	19
Figura 3 - Plataforma com barra vertical e ventilador na mesma direção	21
Figura 4 - Montagem experimental para estudo do PZT	22
Figura 5 - Protótipo com piezoelétrico para medição de densidade	23
Figura 6 - Base metálica e o bloco de fixação da viga com o PZT	23
Figura 7 - Pastilha piezoelétrica PZT	26
Figura 8 - Estação de solda profissional Hk-936 ^a Hikari	27
Figura 9 - Pastilha PZT soldada	27
Figura 10 - Osciloscópio digital	28
Figura 11 - Ligação da pastilha no osciloscópio	28
Figura 12 - Peso de 50g fixado com a haste	29
Figura 13 - Peso de 50g fixado com a haste com pesos removíveis	29
Figura 14 - Ligação em série	31
Figura 15 - Ligação em paralelo.....	31
Figura 16 - Ligação mista.....	32
Figura 17 - Pesos utilizado para os testes dos protótipos	32
Figura 18 - Ligação em série no osciloscópio	33
Figura 19 - Ligação em paralela no osciloscópio	33
Figura 20 - Ligação mista no osciloscópio	34
Figura 21 - Gráfico de tensão de pico de uma pastilha	35
Figura 22 - Gráfico de corrente de pico de uma pastilha	36
Figura 23 - Gráfico de potência de pico de uma pastilha	36
Figura 24 - Teste de hipótese pré-projeto	37
Figura 25 - Gráfico de tensão de pico dos protótipos.....	38
Figura 26 - Gráfico de corrente de pico dos protótipos.....	38
Figura 27 - Gráfico de potência de pico dos protótipos	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados teóricos obtidos	37
Tabela 2 - Resultados individuais.....	43
Tabela 3 - Resultados do protótipo em paralelo	44
Tabela 4 - Resultado do protótipo em série.....	44
Tabela 5 - Resultados do protótipo misto.....	44

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	19
Equação 2	19
Equação 3	20
Equação 4	20
Equação 5	25
Equação 6	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A – Ampere

BRIC – Brasil, Rússia, Índia e China

GEEs – Gases de efeito estufa

LED – *Light Emitting Diode*

PVC – Policloreto de vinila

PVDF – Fluoreto de polivinilideno

PZT – Titanato de zirconato de chumbo

V – Volts

W – Watt

Ω - Ohm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Matriz energética	15
2.1.1	Classificação da energia	15
2.1.2	Fontes renováveis e não renováveis	15
2.1.3	Energia limpa	16
2.2	Piezoelétrico	16
2.2.1	Funcionamento	17
2.2.2	Aplicações	20
2.2.3	Limitações	24
2.3	Eletrotécnica	24
3	METODOLOGIA	26
3.1	Material e cuidados	26
3.2	Ensaio preliminares	27
3.3	Elaboração do protótipo	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Resultados individuais	35
4.2	Resultados das ligações	37
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41
	APÊNDICE A - Valores obtidos nos ensaios individuais	43
	APÊNDICE B - Valores obtidos nos ensaios dos protótipos	44

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda a geração de energia elétrica a partir de materiais piezoelétricos, que são capazes de gerar tensão elétrica quando aplicados esforços mecânicos, dessa forma é possível aproveitar esse potencial energético, como por exemplo, a vibração gerada por veículos, metrô e aviões, o impacto causado por pedestres ao caminhar e até mesmo a instalação no calçado para carregar equipamentos eletrônicos. Pois a cada ciclo a cerâmica piezoelétrica produz energia elétrica com a conversão de energia mecânica para elétrica.

A utilização de dispositivos geradores de energia com a tecnologia da pastilha piezoelétrica, poderão ser adaptados para servir como fontes alternativas de geração de energia em baixa escala. O objetivo geral é analisar as variações obtidas ao submeter um protótipo com variações em sua configuração. Assim será possível identificar qual configuração otimizará a geração de energia, e reduzir custo da elaboração de um modelo aplicável.

Tal abordagem justifica devido nas últimas décadas a humanidade tornou-se dependente da energia elétrica, essa dependência cresce em função do avanço tecnológico. Em contrapartida, a base de nossa matriz energética é constituída, em sua maioria, por fontes que não são limpas e insustentáveis, que por sua vez causa impactos significativos ao meio ambiente. Como é o caso das usinas termoelétricas, de combustíveis fósseis, emitem altas quantidades de gases de efeito estufa (GEEs) ou as hidrelétricas que causam impactos ambientais com alagamento de grandes áreas e impactos sociais e o reassentamento da população local. Desenvolver novas fontes alternativas, como a produção em pequena escala toma cada vez mais espaço dentro da matriz, como é o caso da energia solar, cada vez mais presente nas residências (FEARNSIDE, 2015; LAWSON; PEREIRA, 2017; TORRES, 2012).

Há um grande potencial de energia não utilizada em locais com grande movimentação, como em centro comercial e universidades. Com isso é possível utilizar esse potencial como uma fonte de energia elétrica. De acordo com Damke (2019) é possível produzir energia limpa em pequena escala através de materiais cerâmicos piezoelétrico através da conversão de energia mecânica em energia elétrica.

Esta tarefa será realizada ao submeter os materiais piezoelétricos a ensaios de pressão e seus resultados serão mensurados através do osciloscópio. Inicialmente, será verificado através de ensaios preliminares a geração de energia elétrica em uma pastilha individual. Os resultados possibilitarão a elaboração de modelos teóricos que servirão como base de comparação para os protótipos com os tipos de ligação variadas entre em paralelo, série e mista, que é uma ligação mesclada de paralelo e série.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será abordado assuntos relacionados às fontes de geração de energia elétrica, as características piezoelétricas presentes em alguns materiais e as aplicações e limitações destes materiais.

2.1 Matriz energética

Com o crescimento populacional e o desenvolvimento tecnológico, a demanda mundial por energia elétrica cresce continuamente. Dessa forma, surge a necessidade de criar formas eficiente para sua produção (SANTOS et al, 2006).

A fonte de energia mais utilizada para movimentar a economia dos países é de combustíveis fósseis. No Brasil, Rússia, Índia e China (BRIC) as maiores fontes de energia são de 50% de carvão mineral e 20% petróleo para a alimentação dos quatro países. O Brasil se destaca pela grande participação de energia renovável na produção total de energia. A energia renovável mundial é de 13%, enquanto os países do BRIC são de 15%. A participação do Brasil no BRIC corresponde a 46% e em sua matriz energética interna é de 82,5%. O Brasil é responsável pela produção de 7,2% da energia renovável mundial (BRASIL, 2020).

2.1.1 Classificação da energia

As formas de conversão de energia, podem ser classificadas de acordo com a sua disponibilidade: fontes renováveis e não renováveis e quanto aos impactos ambientais causados: energia limpa (VILLALVA, 2015; REIS, 2011).

2.1.2 Fontes renováveis e não renováveis

As fontes de energia não renováveis são aquelas que podem ser esgotada quando o uso é maior do que a sua geração, isto é, as energias não renováveis são aquelas que usam recursos limitados, que irão se esgotar com o uso. São exemplos de fontes não renováveis, derivados de petróleo, combustíveis radioativos e o gás natural, que são utilizadas para transformação de energia elétrica através de energia térmica, conhecida como energia termoeletrica (VILLALVA, 2015; REIS, 2011).

As fontes de energia renováveis são aquelas que a utilização do homem não interfere na sua fonte, são inesgotáveis, pode ser usada continuamente e não acabam. São aquelas que não se apoiam em recursos limitados e o seu uso não gera esgotamento. Pode-se citar como exemplo de fontes renováveis a utilização das águas de rios, maré, sol e vento ou fontes que o homem consegue produzir como a biomassa que pode utilizar a cana de açúcar, resíduos de animais e industriais (VILLALVA, 2015; REIS, 2011).

2.1.3 Energia limpa

Energia limpa está relacionada com as fontes renováveis de energia elétrica, pois elas causam pouco impacto ambiental e apresentam baixos níveis de emissão de poluentes. Apesar das fontes de energia renovável gerarem impactos ambientais, como por exemplo, a poluição sonora emitidas pela geração de energia eólica e as alterações ambientais causados pelas grandes inundações provenientes da geração hidrelétrica, essas fontes são consideradas seguras e limpas (VILLALVA, 2015).

A única fonte de energia limpa não renovável é a proveniente das usinas termonucleares, pois os combustíveis radioativos utilizados em sua geração são limitados, porém, não emitem gás carbono e outras substâncias tóxicas (VILLALVA, 2015).

2.2 Piezoelétrico

Piezoelasticidade é a capacidade de alguns cristais gerarem tensão elétrica por resposta a pressão mecânica. A capacidade dos materiais piezoelétricos foi descoberta há mais de um século por Pierre e Jacques Curie. Descobriram que essa classe de material quando pressionados geram cargas elétricas, e quando colocam no campo elétrico se esforçam mecanicamente (MOHEIMANI; FLEMING, 2006; CALLISTER, 2008).

O termo piezoelasticidade, nome proposto por Hankel, provém do grego, onde “piezo” significa apertar/pressionar e juntou-se a designação eletricidade de modo que piezoelasticidade é interpretado como a produção de energia elétrica devido à compressão sobre determinados materiais ou eletricidade por pressão (VIVES, 2008).

A piezoelasticidade é encontrada naturalmente em vários materiais monocristalinos, entre eles o quartzo, turmalina e topázio. Porém esses materiais não são adequados para a utilização de atuadores. Existem os materiais artificiais cerâmicos policristalinos, como o titanato de zirconato de chumbo (PZT) que podem ser fabricados para exibir propriedades piezoelétricas

significativas, são fáceis de fazer e apresenta fortes domínios elétricos e mecânicos (MOHEIMANI; FLEMING, 2006).

A piezoelectricidade é complexa e abrange conceitos de eletrônica, e a maioria das áreas da física como mecânica, elasticidade e resistência de materiais, termodinâmica, acústica, propagação de ondas, óptica, entre outros. Os materiais piezoelétricos são utilizados em dispositivos que convertem energia mecânica em elétrica ou vice-versa (CALLISTER, 2008; VIVES, 2008).

2.2.1 Funcionamento

Alguns materiais cerâmicos têm a propriedade piezeletricidade, ou seja, geram um campo elétrico ou tensão quando há uma deformação mecânica sobre ele, ou vice-versa, quando o material sofre uma deformação mecânica gera um campo elétrico (CALLISTER, 2008).

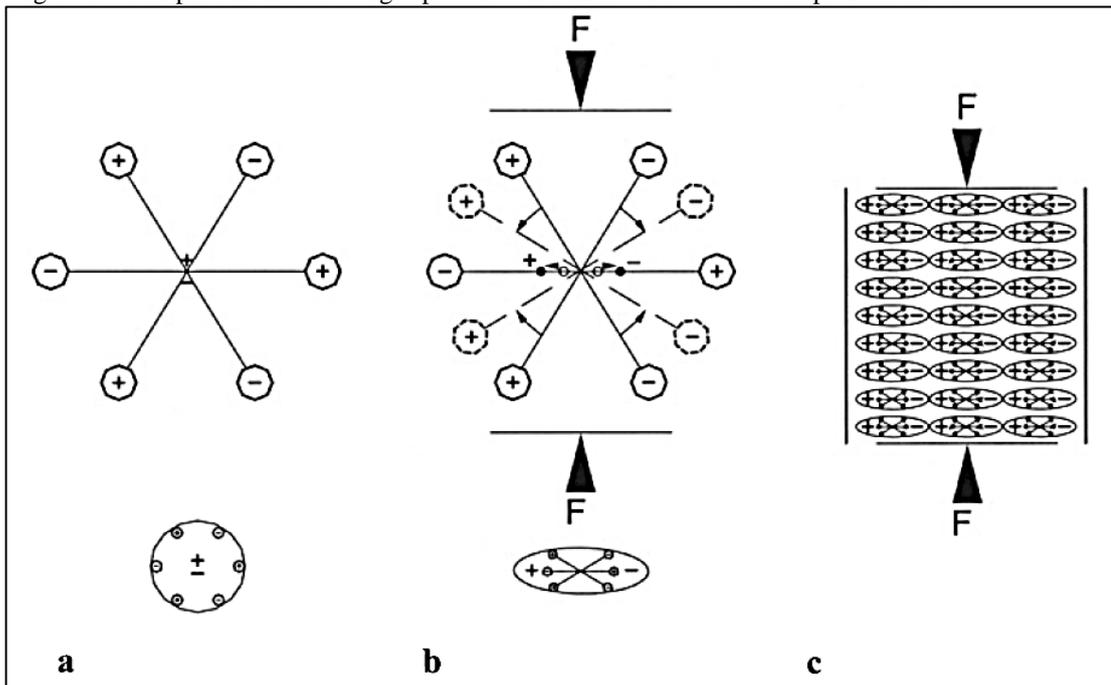
O campo elétrico gerado ocorre, pois, a polarização é induzida e um campo elétrico é estabelecido através de uma aplicação de uma força externa e a reversão do sinal da força externa inverte a direção do campo. (CALLISTER, 2008).

Os irmãos Currie observaram que as cargas positivas e negativas apareceram em várias partes das superfícies do cristal, compreenderam que as diferentes direções são de acordo com a sua simetria (VIVES, 2008).

Os cristais no estado natural, os centros de gravidade das cargas positiva e negativa de cada molécula coincidem, com isso os efeitos das cargas negativas e positivas são cancelados, ou seja, eletricidade neutra. Após exercer uma pressão externa sobre o material, sua estrutura interna muda, o que causa a separação dos centros de gravidade positivo e negativo, que por sua vez cria pequenos dipolos, onde os polos opostos no interior do material são cancelados mutuamente que gera uma distribuição de carga vinculada na superfície do material, ou seja, o material é polarizado. E a polarização gera um campo elétrico que pode ser usado para transformar energia mecânica em energia elétrica (VIVES, 2008).

A Figura 1 ilustra o comportamento das cargas presente nas moléculas dos cristais piezoelétricos, onde (a) apresenta a molécula no estado normal, (b) molécula sujeita a uma força externa e (c) efeito polarizador nas superfícies do material que é responsável pela geração do campo elétrico no material (VIVES, 2008).

Figura 1 - Comportamento das cargas presentes nas moléculas dos cristais piezoelétricos

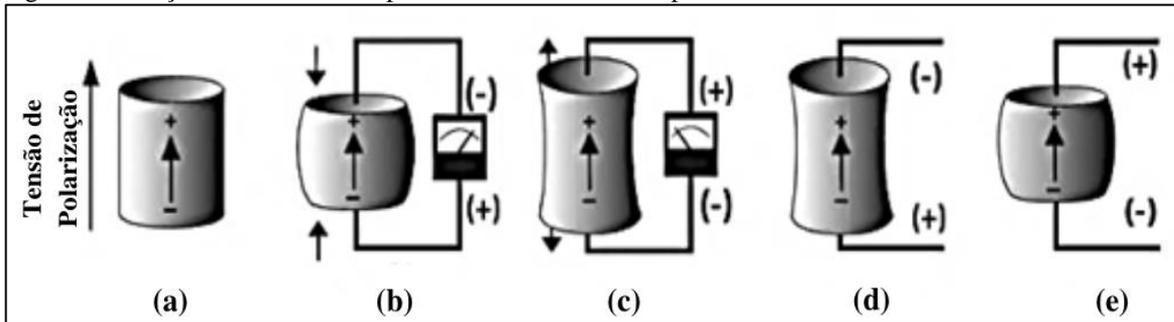


Fonte: Vives (2008).

A Figura 2 demonstra o comportamento de um elemento piezoelétrico a estímulos aplicados, observa-se que ao comprimir ou tracionar mecanicamente o piezoelétrico altera-se o momento bipolar associado a esse elemento. Isso cria uma tensão, compressão ao longo da direção da polarização, ou tensão perpendicular à direção da polarização, gera tensão da mesma polaridade que a tensão de polarização (b). A tensão na direção da polarização, ou compressão perpendicular a essa direção, gera uma tensão com polaridade oposta à tensão de polarização (e). Ao operar neste modo, o dispositivo funciona como um sensor. Ou seja, a cerâmica piezoelétrica converte a energia mecânica de compressão ou tensão em energia elétrica (MOHEIMANI; FLEMING, 2006).

Valores para tensão de compressão e tensão gerados pela aplicação de tensão no piezoelétrico são linearmente proporcionais, até uma tensão específica, que depende das propriedades do material. Isso vale para a tensão aplicada e a tensão gerada. Se uma tensão da mesma polaridade da tensão de polarização for aplicada no piezoelétrico, na direção da tensão de polarização, o elemento aumentará e seu diâmetro se tornará menor (d). Se uma tensão de polaridade oposta à da tensão de polarização for aplicada, o elemento se tornará mais curto e mais amplo (e). Se uma tensão alternada for aplicada ao dispositivo, o elemento será expandido e contraído, na frequência da tensão aplicada. Quando operado neste modo, a cerâmica piezoelétrica é usada como atuador. Ou seja, a energia elétrica é convertida em energia mecânica (MOHEIMANI; FLEMING, 2006).

Figura 2 - Relação de um elemento piezoelétrico a estímulos aplicados



Fonte: Adaptado de Moheimani e Fleming (2006).

O campo elétrico é criado, quando é aplicada uma diferença de tensão entre dois eletrodos depositados em superfícies de alguns materiais, se mudar a diferença de tensão, muda também o campo elétrico e o deslocamento elétrico, o que induz uma corrente elétrica através dos eletrodos (VIVES, 2008).

O funcionamento das pastilhas é pelo efeito piezoelétrico, que resume na deformação da estrutura de alguns materiais quando uma pressão mecânica é realizada sobre ele, o que faz com que se tenha uma polarização das cargas, que gera uma diferença de potencial, transforma a energia mecânica em elétrica (ANTUNES et al, 2014).

O fenômeno piezoelétrico nas primeiras abordagens, realizados pelos irmãos Currie demonstraram que a densidade da superfície da carga ligada gerada era proporcional à pressão exercida, e desapareceria com ela. Este relacionamento pode ser dado pela equação 1. O efeito reverso, foi igual à razão entre a polarização produzida e a magnitude da tensão aplicada no direto efeito. Dessa forma consistente, o efeito piezoelétrico reverso pode ser dado pela equação 2 (VIVES, 2008):

$$Pp = d.T \quad (1)$$

$$Sp = d.E \quad (2)$$

Onde, “Pp” representa o vetor e polarização, cuja magnitude é igual a densidade de superfície de carga ligada por efeito piezoelétrico, “d” corresponde ao coeficiente de formação piezoelétrica, “T” representa a tensão para ao qual o material piezoelétrico é submetido, “Sp” indica a tensão produzida e “E” é a magnitude do campo elétrico aplicado (VIVES, 2008).

O fenômeno piezoelétrico pode ser descrito através do acoplamento das equações eletromagnética e mecânica. O efeito direto é dado pela equação 3 e o efeito reverso pela equação 4 (VIVES, 2008):

$$D = d\sigma + \varepsilon.E \quad (3)$$

$$S = s\sigma + d.E \quad (4)$$

Onde “D” é o vetor deslocamento elétrico, “d” indica o coeficiente piezoelétrico, “σ” representa o valor da tensão mecânica aplicada no material piezoelétrico, “ε” corresponde a permissividade dielétrica do material, “E” retrata o campo elétrico “S” corresponde a deformação sofrida pelo material piezoelétrico em consequência a exposição do material a um campo externo e “s” é o coeficiente elástico (VIVES, 2008).

2.2.2 Aplicações

Uma das primeiras aplicações do piezoelétrico foi em sonares, onde objetos sob a água são detectados. Mas recentemente os piezoelétricos tem sido utilizados nos setores automotivos no balanceamento de direção, alarmes de sintoma de segurança, indicadores de desgaste de pneu, entre outras aplicações pode-se citar o uso nos computadores em discos rígidos e transformadores para *notebooks*, no setor comercial e consumo cabeçote de impressão, medidores de deformação e detectores de fumaça e no setor de medicina nas bombas de insulina, terapias ultrassônicas e dispositivos ultrassônicos (CALLISTER, 2008).

Os materiais piezoelétricos estão presentes em diversos segmentos, nas indústrias podem ser usados de várias maneiras, como controle de vibração estrutural, posicionamento de precisão e contribuindo no avanço da nanotecnologia. É utilizado também em produtos esportivos como raquetes de tênis piezoelétricas compostas, esquis e pranchas de *snowboard*, também é utilizado para realizar o controle de vibrações de satélites, aeronaves e discos rígidos (MOHEIMANI; FLEMING, 2006).

A produção de energia através do piezoelétrico pode ser implementada em qualquer lugar, onde se tenha fluxo de pedestres ou automóveis. Dessa forma através das cerâmicas piezoelétricas é possível aproveitar a energia mecânica gerada no impacto dos pés contra o chão ou da vibração dos automóveis e convertê-las em energia elétrica (ARMENDANI et al, 2016).

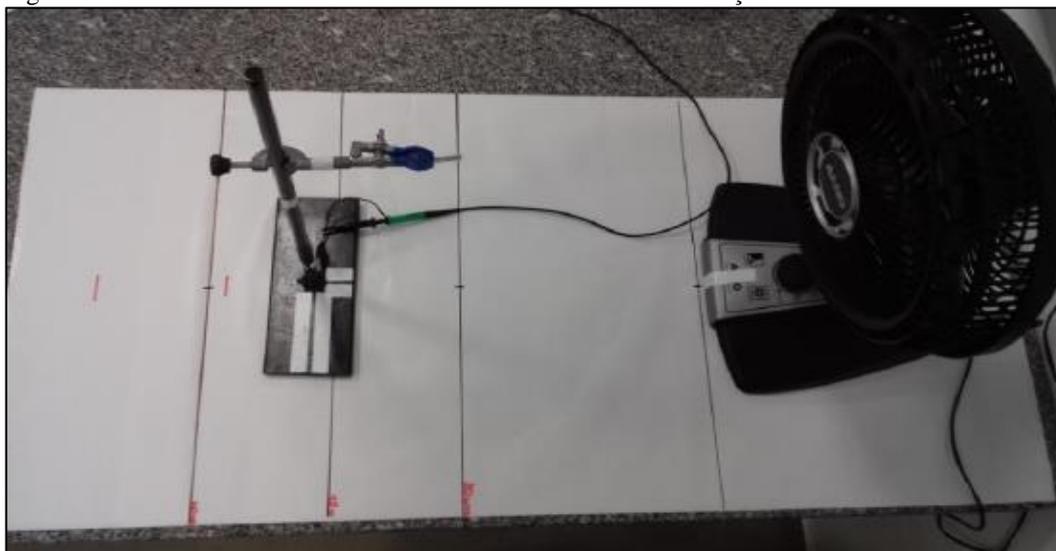
Na área acadêmica, encontram-se casos de aplicações recentes desta tecnologia para a obtenção de energia elétrica.

Antunes et al (2014) descreve sobre a aplicação as pastilhas piezoelétricas na entrada do restaurante universitário de um campus e obteve o resultado que a energia transformada durante um almoço foi o suficiente para suprir a demanda dos banheiros com cinco lâmpadas

de *light emitting diode* (LED) de 7 watts pelo mesmo período de tempo. Para essa funcionabilidade, o piezoelétrico é mais eficiente em eventos momentâneos, como por exemplo em um festival de música, que enquanto as pessoas dançavam 10000 celulares foram carregados, pois a utilização de várias placas com um grande fluxo de pisadas o piezoelétrico é mais eficiente.

Damke (2019) em sua dissertação, analisa a eficiência energética do material piezoelétrico. Onde em uma plataforma foi instalado o polímero piezoelétrico fluoreto de polivinilideno (PVDF) LDT0-028K. E com um simulador de vento, foram produzidas várias velocidades de ventos, entre 4 e 7 m/s, além de variar as distâncias entre o piezoelétrico e o gerador de escoamento de ar, utilizou-se materiais de plásticos flexíveis de policloreto de vinila (PVC), em diferentes configurações, que foram acoplados no extremo livre do piezoelétrico, para melhorar as deformações e obter melhores resultados na saída de tensão, seu experimento pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Plataforma com barra vertical e ventilador na mesma direção



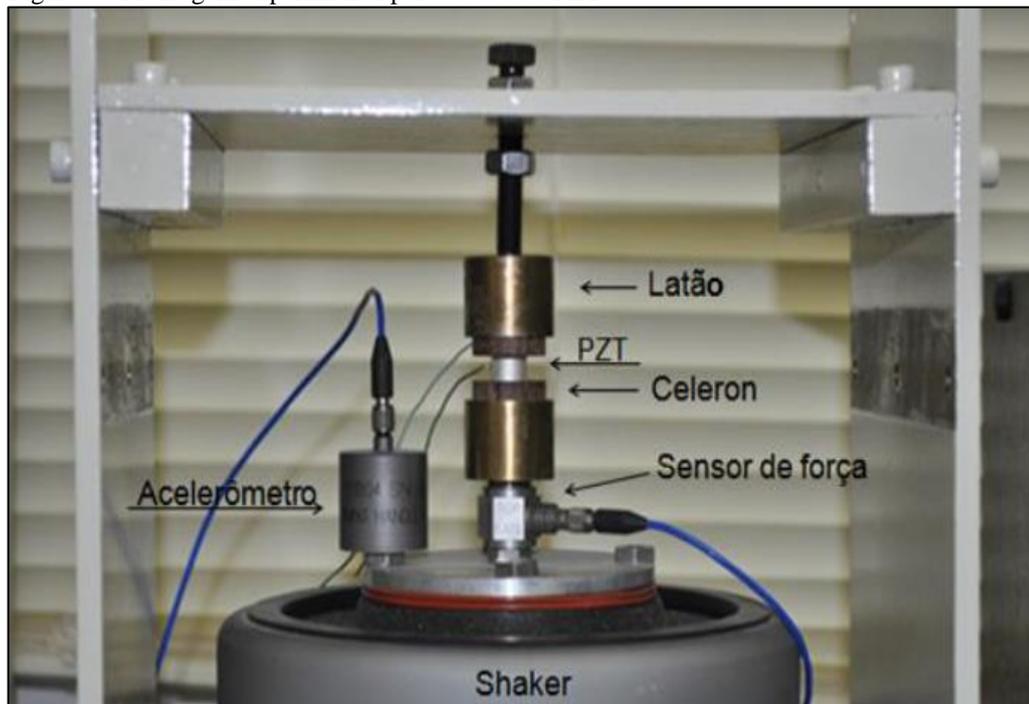
Fonte: Damke (2019).

Após esse experimento foi possível avaliar as melhores condições experimentais onde os melhores resultados obtidos foram com a velocidade do vento de 6,74 m/s apresentou uma geração de 9,40mW de energia.

Rangel (2014), realiza a caracterização de uma célula tubular piezoelétrica para geração de energia elétrica. Foi utilizado o piezoelétrico PZT com geometria cilíndrica tubular, submetido a uma compressão de forma cíclica no sentido axial. Onde foi elaborado um protótipo capaz de realizar a captação da força, aceleração, tensão e potência elétrica gerada

para a célula piezoelétrica, exibido na Figura 4. A partir dos resultados experimentais com uma célula piezoelétrica foi elaborado um gerador piezoelétrico com três células e caracterizado. Para análise do gerador teve um potencial elétrico gerado de 2,5 mW submetido a uma força de compressão de 45,8 N.

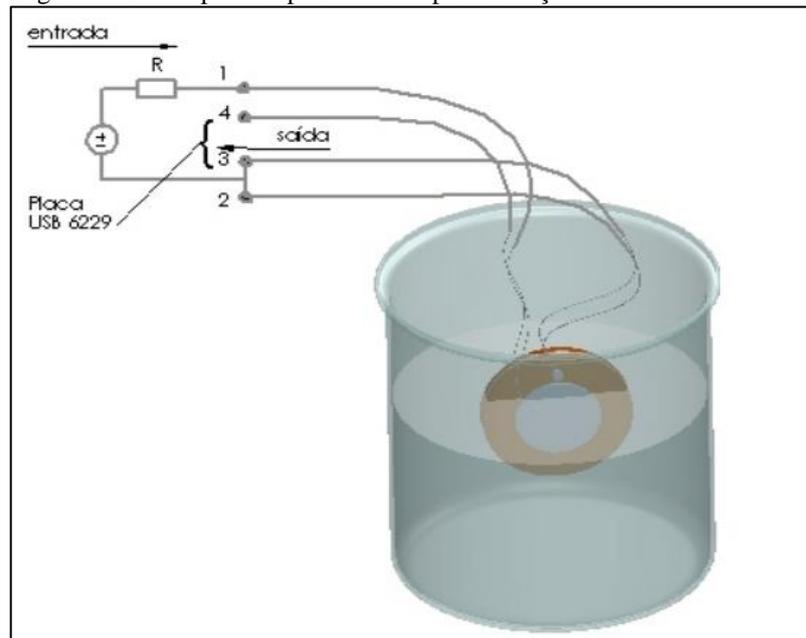
Figura 4 - Montagem experimental para estudo do PZT



Fonte: Rangel (2014).

Viginoski (2013) realiza o estudo de um sistema que utiliza vibração de um transdutor piezoelétrico para medir densidade. Para isso utiliza o conceito de vibração e amortecimento quando tem um contato com líquido, em análise de resposta é a relação da densidade dos líquidos. No seu experimento usou água pura, ar, óleo de soja refinado, trietanolamina, etanol e glicerol. Para a construção do protótipo demonstrado na Figura 5 fez um sistema de medição com o piezoelétrico, projetado um sistema de medição de densidade composto de hardware de aquisição e software de tratamento e análise das informações.

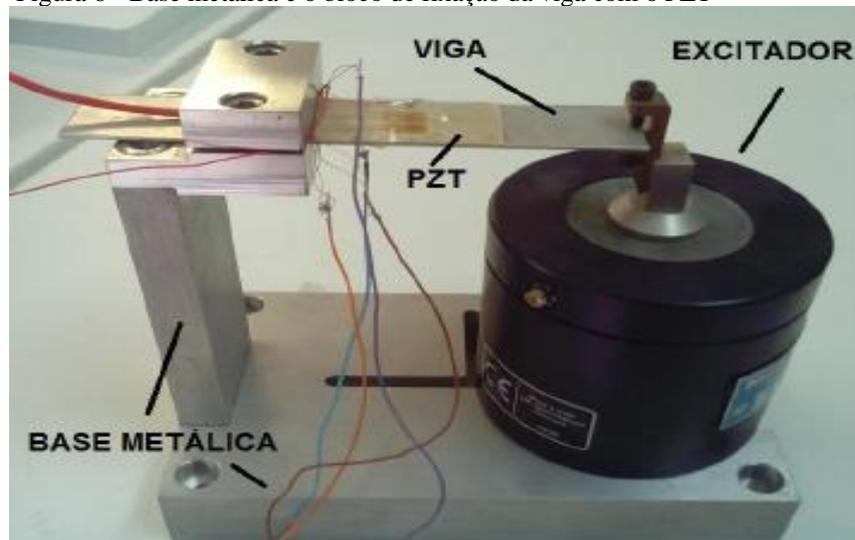
Figura 5 - Protótipo com piezoelétrico para medição de densidade



Fonte: Viginoski (2013).

Moreira Filho (2014), por sua vez, realiza a análise e caracterização da potência elétrica gerada com elemento piezoelétrico. Em seu estudo foi possível determinar a relação entre a deformação mecânica sofrida pelo elemento gerador (piezoelétrico) e a potência elétrica gerada. Seus resultados foram obtidos através de simulações, com o método de elementos finitos e dados experimentais. Como elemento piezoelétrico gerador foi utilizada a cerâmica piezoelétrica de PZT. Para a obtenção dos resultados experimentais, foi desenvolvido um gerador composto por uma viga mono engastada excitada por um excitador nas frequências de interesse, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Base metálica e o bloco de fixação da viga com o PZT



Fonte: Moreira Filho (2014).

Com a utilização deste gerador foi possível constatar que a máxima geração de tensão e potência elétrica ocorreu na frequência de 75 Hz e foi fornecida uma potência elétrica de 1,877 mW para uma deformação de 387,97 $\mu\text{m/m}$ sobre o PZT. Para esta frequência, os resultados obtidos de deformação elástica e tensão elétrica nas simulações, se mostraram equivalentes aos alcançados no experimento (MOREIRA FILHO, 2014).

2.2.3 Limitações

Os materiais piezoelétricos têm um potencial baixo de geração de energia com isso obtém-se energia em microescala (DAMKE, 2019).

Devido a algumas dificuldades na utilização do piezoelétrico e ainda a necessidade de aprimoramento, a dificuldade no armazenamento na energia gerada, que está é realizado por supercapacitores, outro problema é a durabilidade das placas, devido a instalação precisa ser capaz de se deformar e voltar ao seu estado inicial após a compressão, é um desafio resistir aos agentes externos, ao seu uso constante e não deixar de produzir o efeito piezoelétrico. Outra restrição seria ao uso adequado para suprir pequenas demandas de energia que não necessitam de armazenamento, que pode auxiliar no suprimento de atividades onde o consumo é momentâneo e descontínuo (ANTUNES et al, 2014).

Durante a manipulação dos materiais piezoelétricos deve-se observar à temperatura de Currie ou ponto Currie, que é a temperatura na qual a estrutura cristalina do material sofre uma transição de fase e o mesmo deixa de apresentar propriedades piezoelétricas. Depois de ultrapassada esta temperatura, o material perde a polarização remanescente induzida, perde as propriedades piezoelétrica (VIVES, 2008).

2.3 Eletrotécnica

De acordo com Malvino e Bates (2016) a lei de Ohm permite calcular grandezas físicas, como a tensão, corrente e a resistência elétrica de diversos elementos presentes em um circuito. Porém essa lei pode somente ser aplicada a resistências ôhmicas. A primeira lei de Ohm determina que a diferença de potencial entre dois pontos de um resistor é proporcional à corrente elétrica que é estabelecida nele e a razão entre o potencial e a corrente elétrica é sempre constante para os resistores ôhmicos. Como demonstrado da equação 5.

$$R = \frac{V}{I} \quad (5)$$

Na equação o “V” representa tensão ou potencial elétrico em volts (V), “R” retrata a resistência elétrica em Ohm (Ω) e “I” é a corrente elétrica em ampere (A).

Para o calcular a potência utiliza a equação 6:

$$P = V \cdot I \quad (6)$$

Onde “P” corresponde a potência em watt (W), o “V” representa tensão ou potencial elétrico em volts (V) e “I” indica a corrente elétrica em ampère (A) (MALVINO; BATES, 2016).

De acordo Malvino e Bates (2016) quando o circuito está em paralelo soma-se as correntes para obter a corrente total e em série a corrente é a mesma, o inverso acontece para tensão, quando o circuito está em paralelo a tensão é a mesma, e quando está em série a soma-se as tensões para obter a corrente total.

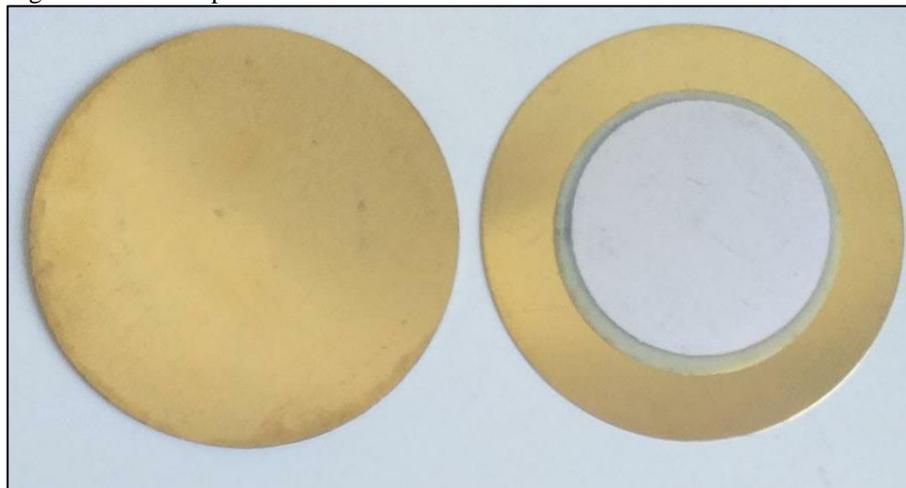
3 METODOLOGIA

A metodologia para a realização desse trabalho foi desenvolvida em duas etapas: a primeira etapa consiste no desenvolvimento do protótipo com uma pastilha individual para a obtenção de seu potencial e a segunda a elaboração do protótipo com nove pastilhas cujo objetivo é avaliar qual a ligação mais eficiente entre em paralelo, série e mista, para obtenção de um maior potencial energético.

3.1 Material e cuidados

De acordo com o catálogo do fornecedor Recicomp (2020) a pastilha piezoelétrica de 35 mm (Figura7), pode ser utilizada como dispositivo sonoro ou como sensor de vibração, ela tem a capacidade de informa à extensão da vibração detectada, quando pressionada, uma tensão elétrica é gerada conforme a força aplicada. A parte central da pastilha, cerâmica PZT, deve ser utilizada como eletrodo positivo e a parte externa como eletrodo negativo. A pastilha possui uma frequência de ressonância de $4,6 \pm 0,5$ kHz, resistência de 300Ω (na ressonância) e capacitância de $20.0 \pm 30\%$.

Figura 7 - Pastilha piezoelétrica PZT



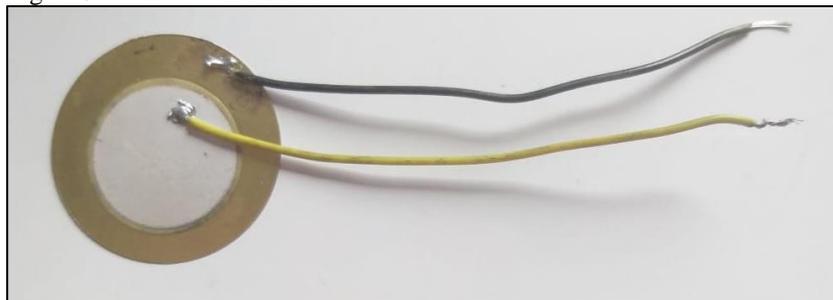
Fonte: O autor.

Para a soldagem dos fios flexíveis 0,5mm, utilizou uma estação de solda profissional Hk-936^a Hikari (Figura 8), com a temperatura regulada em 200°C e como eletrodo o estanho para solda de eletroeletrônicos de 1,00mm.

Figura 8 - Estação de solda profissional Hk-936^a Hikari

Fonte: O autor.

Figura 9 - Pastilha PZT soldada



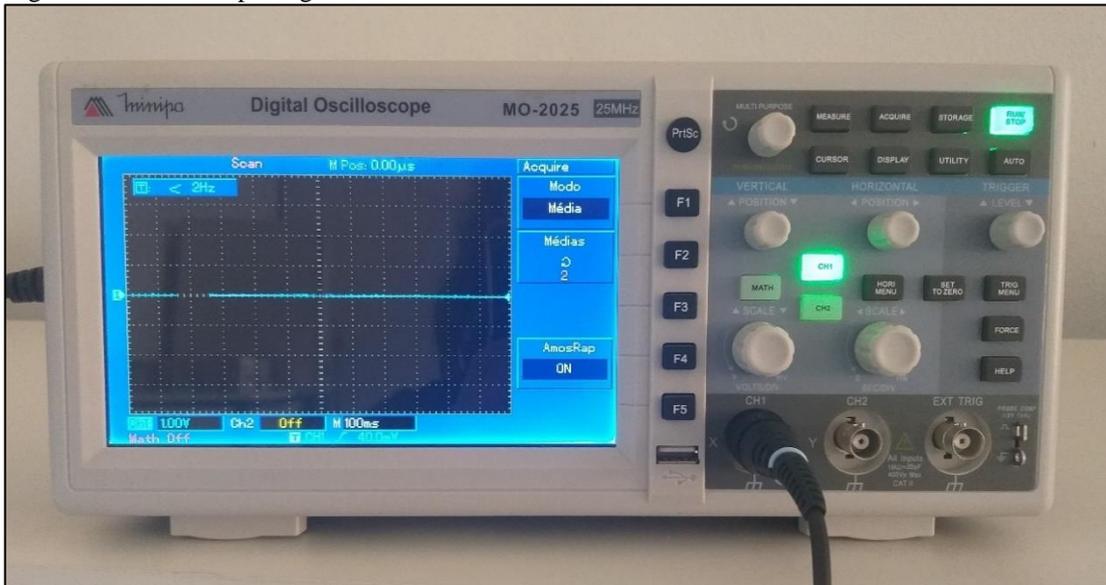
Fonte: O autor.

Para realizar a soldagem dos fios flexíveis na cerâmica, como demonstrado na Figura 9, utilizou-se a temperatura de 200°C foi utilizado por indicação do fornecedor, uma vez que temperaturas superiores podem danificar a cerâmica, pois o ponto Curie desse material é baixo e ao ultrapassá-lo a cerâmica perde suas propriedades piezoelétricas.

3.2 Ensaios preliminares

Ao pressionar a cerâmica, a energia é gerada na forma de pulsos, isto é energia de pico e devido a velocidade desse pulso, não seria possível a obtenção de dados através do multímetro. Por esse motivo optou-se pela utilização do osciloscópio digital da marca Minipa MO-2025 (Figura 10).

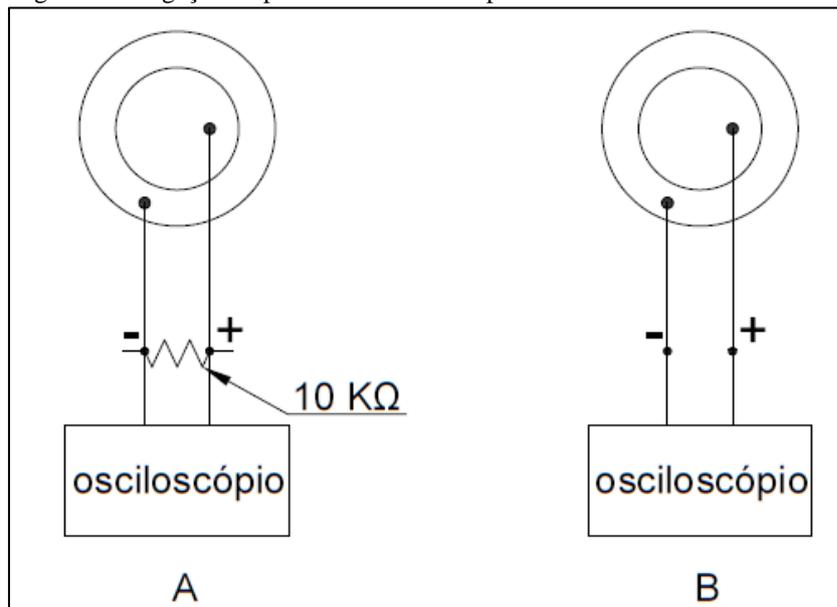
Figura 10 - Osciloscópio digital



Fonte: O autor.

Devido ao osciloscópio fazer somente mensuração da tensão, e para obtenção de potência do transdutor é necessário também a corrente, por isso, para achar a corrente foi utilizado a lei de Ohm e foi feito um circuito fechado com um componente de resistência conhecida, neste caso, foi utilizado um resistor de $10\text{ k}\Omega$. As ligações para a mensuração da pastilha foram feitas como demonstrado na Figura 11. Em que “A” corresponde a ligação fechada e “B” representa ligação aberta.

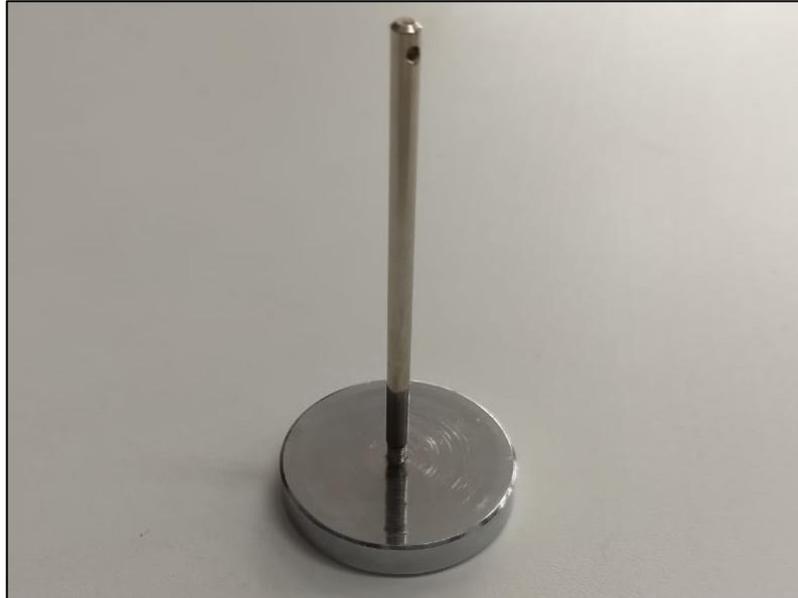
Figura 11 - Ligação da pastilha no osciloscópio



Fonte: O autor.

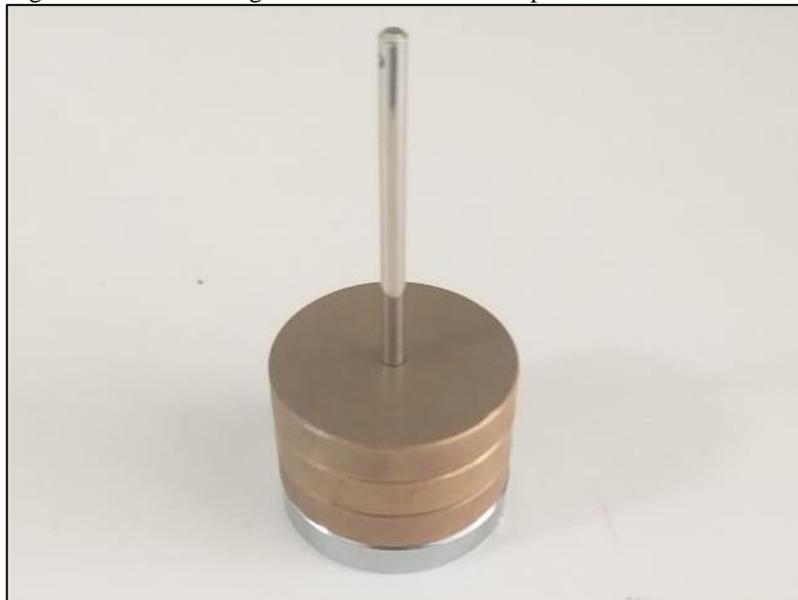
Para realizar o acionamento das pastilhas e ter controle sobre a carga aplicada, foi utilizado um peso de 50 g com uma haste centralizada para que seja possível adicionar mais pesos de 50 g ao longo dos testes, conforme apresentado nas Figura 12 e 13.

Figura 12 - Peso de 50g fixado com a haste



Fonte: O autor.

Figura 13 - Peso de 50g fixado com a haste com pesos removíveis



Fonte: O autor.

Os testes foram realizados nas configurações de 100 g, 200 g, 300 g, 400 g, 500 g, 600 g, 700 g, 800 g e 900 g. Os pesos foram suspensos a uma distância de 5 cm da pastilha e soltos

manualmente. O peso total foi aumentado gradativamente a cada teste até os valores obtidos não variarem.

3.3 Elaboração do protótipo

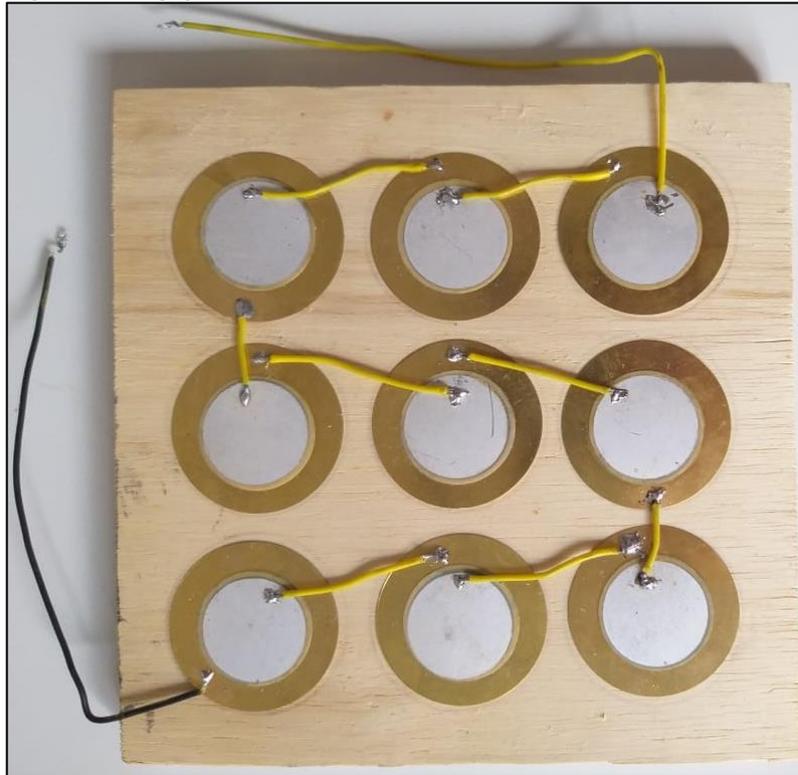
Após os resultados de uma pastilha foi feito os protótipos interligados, onde foi colocado entre duas plataformas de madeira 14x14x0,1cm, para o acionamento simultâneo das pastilhas. A plataforma da superfície foi adequada com canais de modo que os fios e a solda não sofressem esforços quando a plataforma fosse acionada desta forma evita-se que os componentes eletrônicos sejam danificados.

Com os dados individuais elaborou-se modelos teóricos para estipular a geração de energia teórica de cada protótipo, para fazer um comparativo com prático. Para isso foi utilizado as teorias eletrotécnicas citadas no capítulo 2.3 assim como, a lei de Ohm através da equação 6.

Foram realizados três protótipos com nove pastilhas no formato 3x3. Em cada protótipo variou-se a ligação entre série (Figura 14), paralelo (Figura 15) e mista (Figura 16), que é uma ligação mesclada de paralelo e série. Dessa forma espera-se que seja possível identificar qual a melhor configuração para otimizar a energia gerada e quais outras variáveis influenciam nesse fenômeno ao compara o protótipo com o modelo teórico.

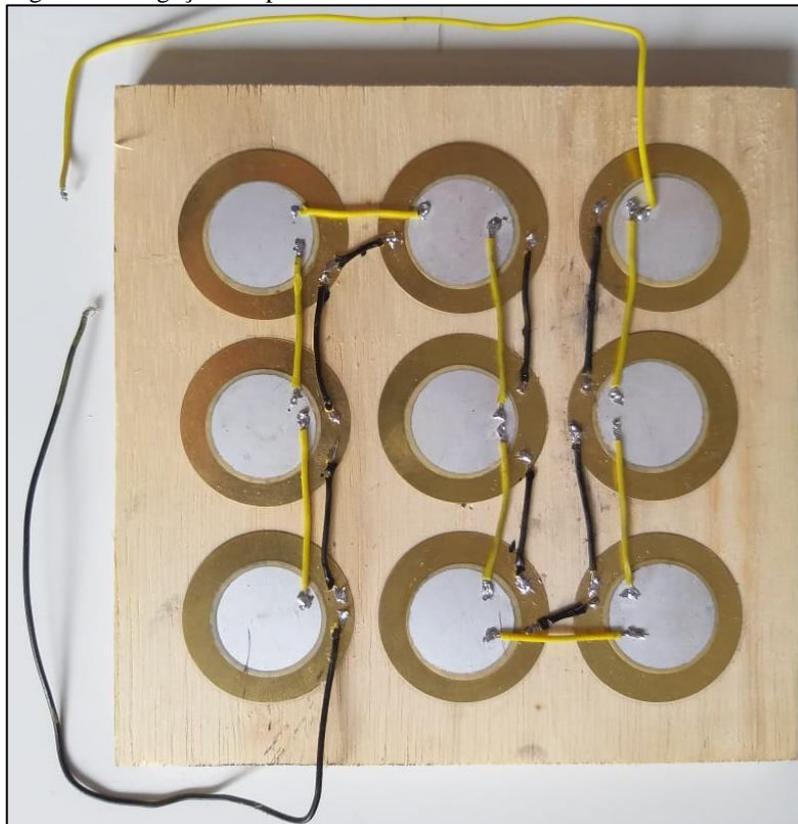
No modelo em série as pastilhas foram interligadas entre elas com os fios soldados do polo positivo ao polo negativo. O modelo em paralelo, por sua vez, os fios foram soldados polo positivo no polo positivo e o polo negativo no polo negativo. Já o misto teve três ligações em paralelo onde a pastilha da extremidade foi soldada em série com outras três pastilha de extremidade.

Figura 14 - Ligação em série



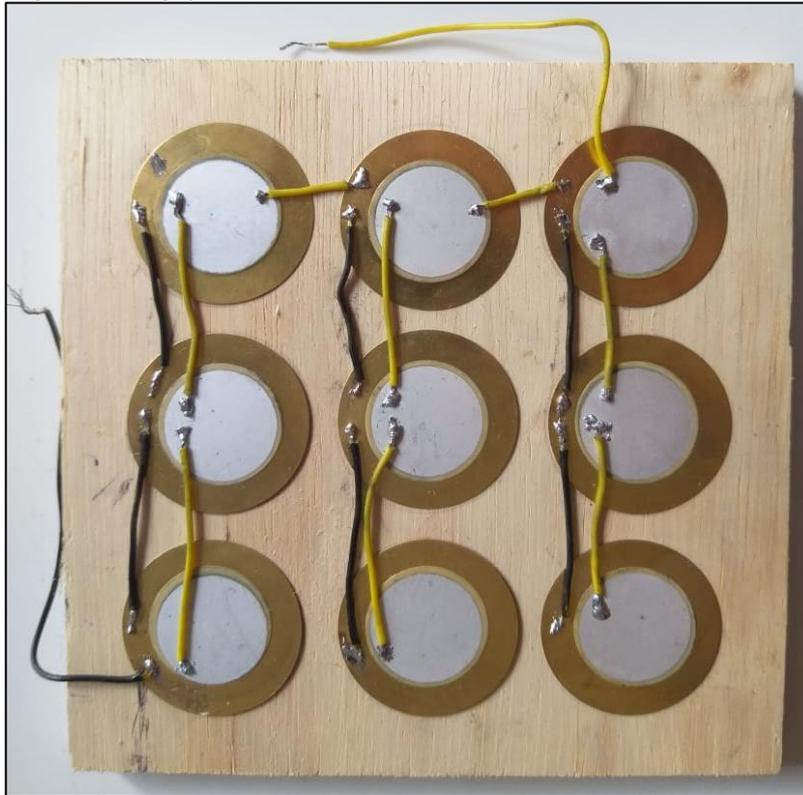
Fonte: O autor.

Figura 15 - Ligação em paralelo



Fonte: O autor.

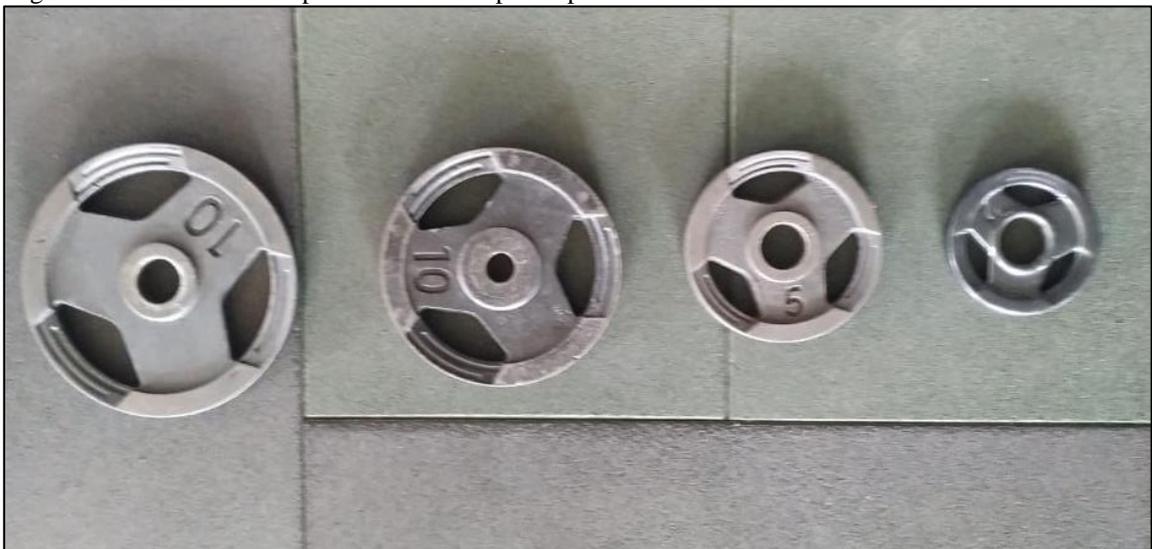
Figura 16 - Ligação mista



Fonte: O autor.

Após os resultados teórico, os protótipos foram testados com a mesma metodologia do modelo individual, através do osciloscópio, porém dessa vez foi necessária uma carga maior para o acionamento, assim foi utilizado anilhas (Figura 17) para o pressionar a plataforma. O peso total foi aumentado gradativamente até que não houvesse alteração na tensão capitada pelo osciloscópio.

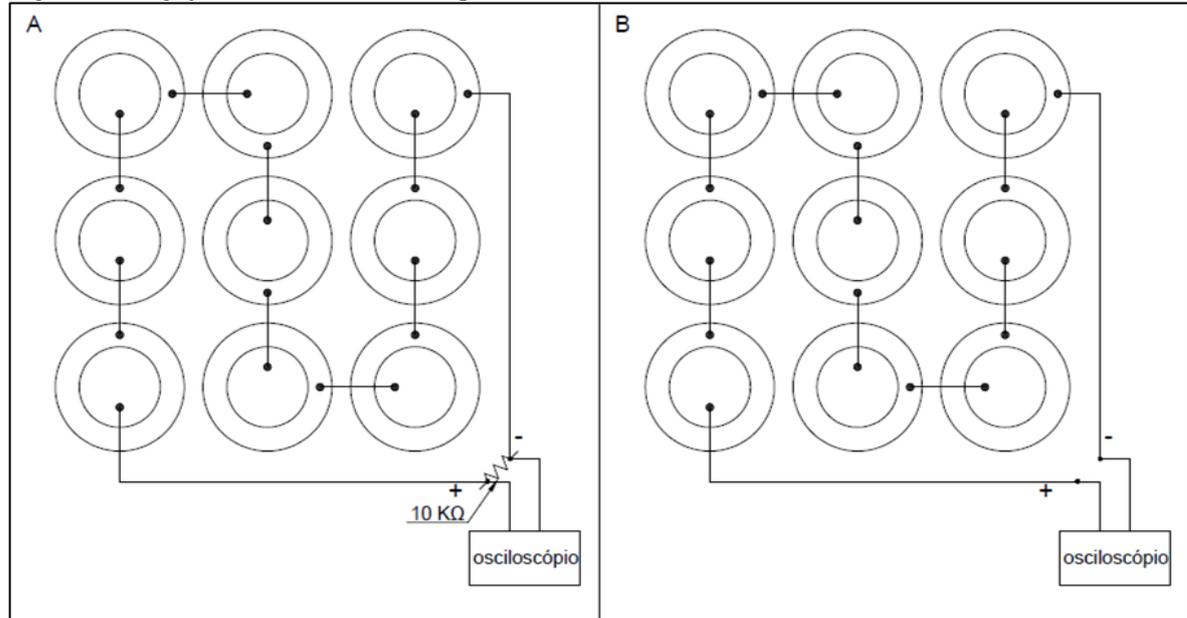
Figura 17 - Pesos utilizado para os testes dos protótipos



Fonte: O autor.

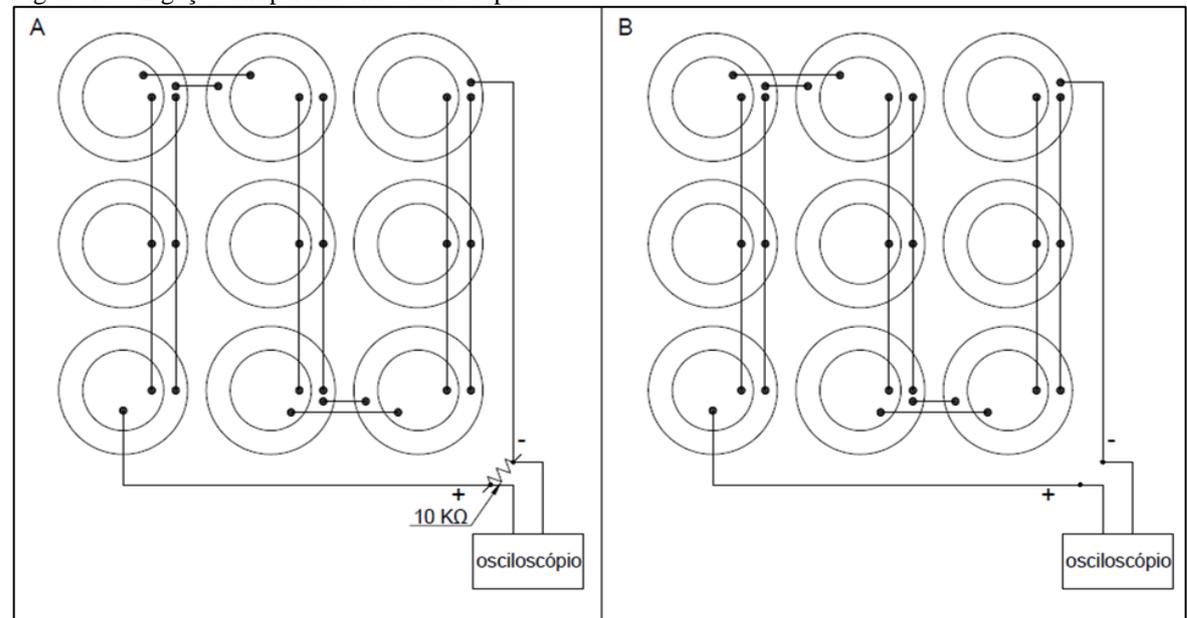
Para encontra o valor de corrente também fez o uso de um resistor de $10\text{ k}\Omega$. As ligações para a mensuração da pastilha foram feitas como demonstrado na Figura 18, 19 e 20. Em que “A” corresponde a ligação fechada e “B” representa ligação aberta.

Figura 18 - Ligação em série no osciloscópio



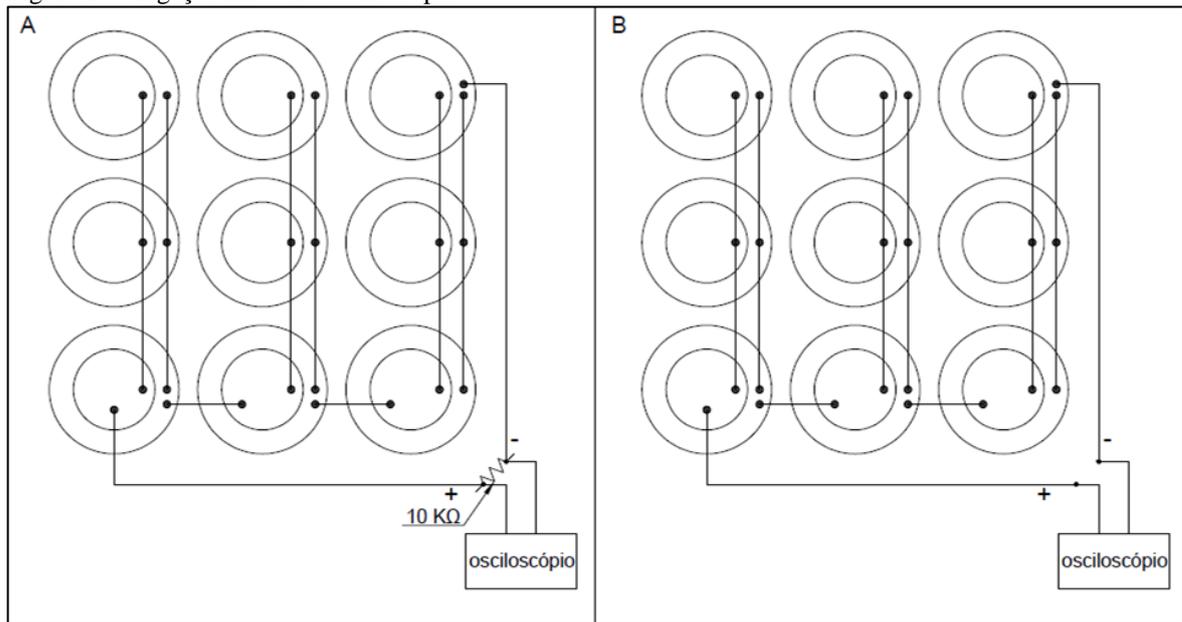
Fonte: O autor.

Figura 19 - Ligação em paralela no osciloscópio



Fonte: O autor.

Figura 20 - Ligação mista no osciloscópio



Fonte: O autor.

Foram coletados dados de dois ensaios para cada teste, de modo que se utiliza-se o valor médio dos dados obtidos.

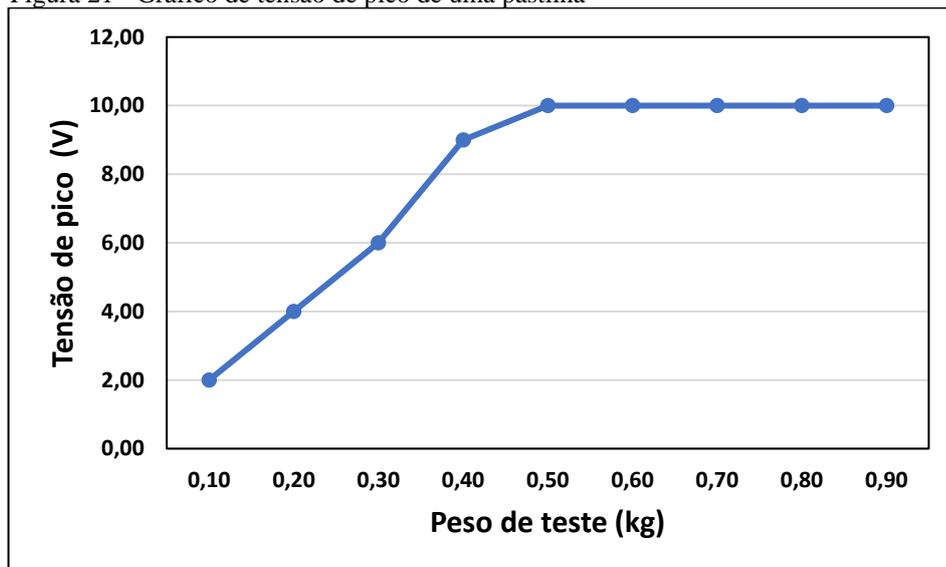
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo foi expresso e avaliado os resultados obtidos com o protótipo preliminar, com apenas uma pastilha. Em seguida esses resultados foram utilizados para obter os valores teóricos que seriam obtidos a partir dos protótipos de nove pastilhas com ligação em serie, paralelo e mista.

4.1 Resultados individuais

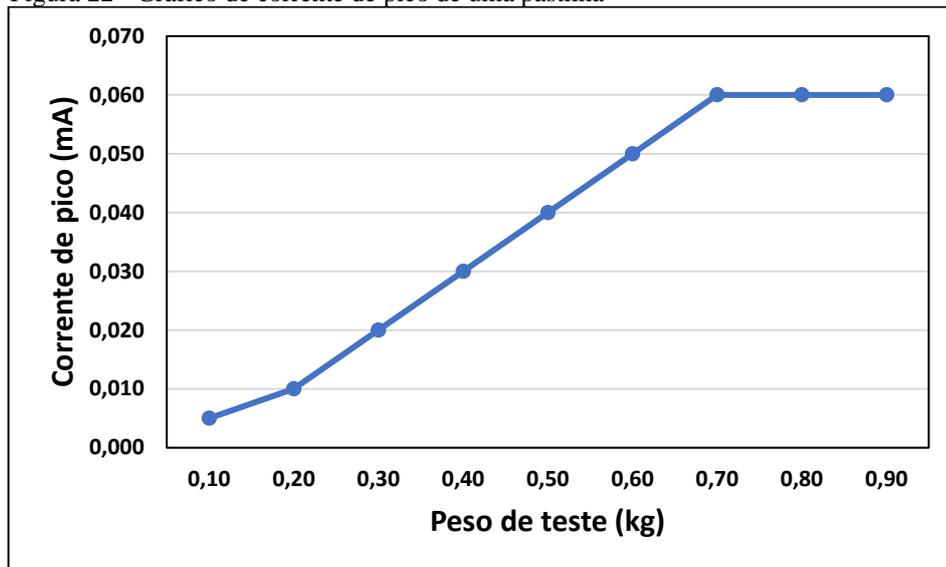
Os resultados de tensão, corrente e potência obtidos de uma pastilha de acordo com o peso pressionado está demonstrado na Tabela 2 no Apêndice A, tais valores foram dispostos na forma de gráficos para melhor visualização (Figura 21, 22 e 23).

Figura 21 - Gráfico de tensão de pico de uma pastilha



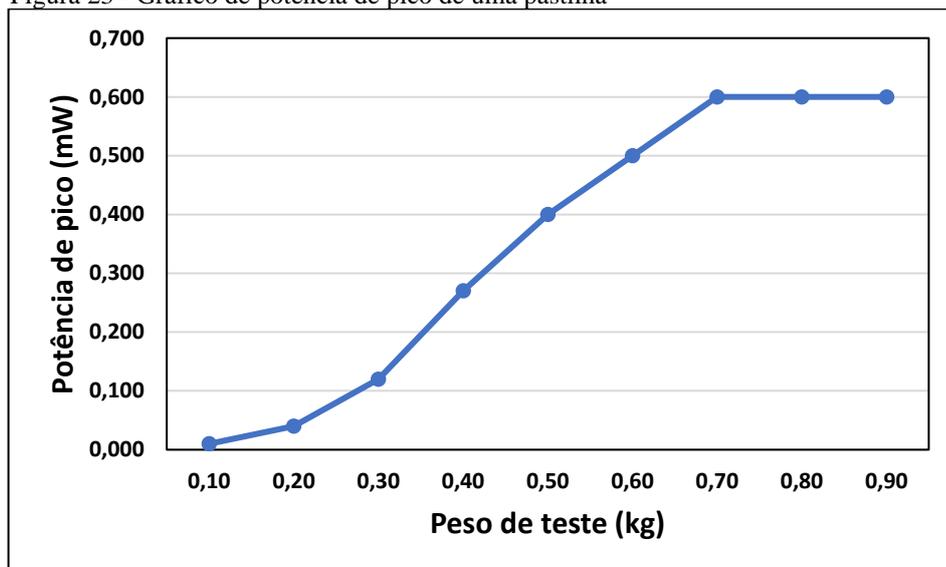
Fonte: O autor.

Figura 22 - Gráfico de corrente de pico de uma pastilha



Fonte: O autor.

Figura 23 - Gráfico de potência de pico de uma pastilha



Fonte: O autor.

Conforme apontado anteriormente por Moheimani e Fleming (2006), os valores para tensão de compressão e tensão gerados pela aplicação de tensão no piezoelétrico são linearmente proporcionais, até uma tensão específica, que depende das propriedades do material. Tal fenômeno pode ser observado facilmente nos gráficos, nota-se que para os gráficos de corrente e potência de pico o fenômeno acontece a partir de carga de 0,7 kg enquanto no gráfico de tensão de pico o fenômeno ocorre com 0,5 kg.

Nota-se que a corrente máxima obtida corresponde a 0,06 mA, ou seja, uma corrente muito baixa. Porém, durante o primeiro teste de hipótese, durante a elaboração do projeto de pesquisa, foi realizado a ligação de uma cerâmica à um LED branco de alto brilho (Figura 24).

Figura 24 - Teste de hipótese pré-projeto



Fonte: O autor.

Tal aplicação possibilita a aplicação da cerâmica PZT para alimentação de sistemas luminosos como por exemplo, a utilização em faixa de segurança, luz de emergência ou até mesmo em entretenimento.

4.2 Resultados das ligações

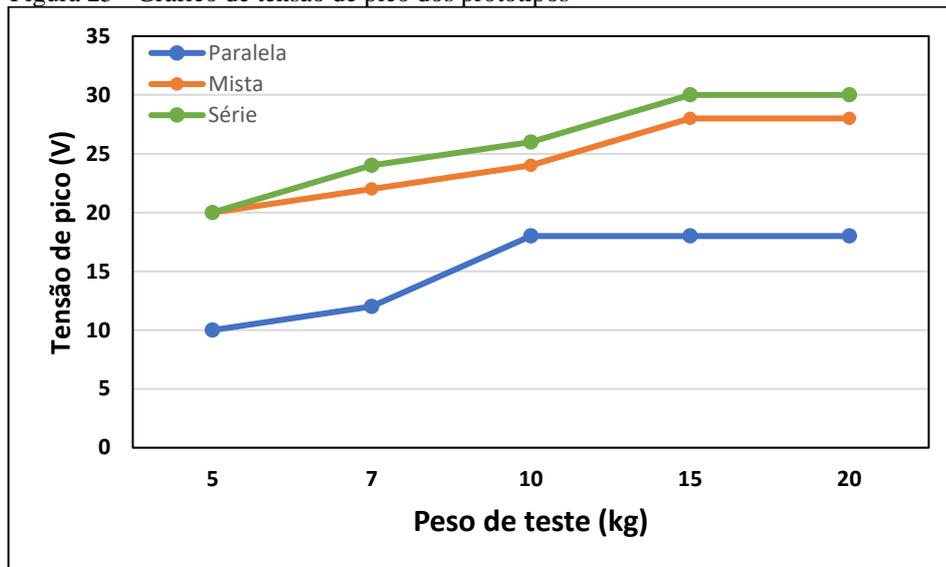
A Tabela 1 descreve os resultados teóricos da geração máxima das ligações em paralela, série e misto feitos os cálculos como descrito no item com 3.3.

Tabela 1 - Resultados teóricos obtidos			
Tipo de ligação	Tensão máx. (V)	Corrente máx. (mA)	Potência máx. (mW)
Paralelo	10	0,54	5,4
Série	90	0,06	5,4
Misto	30	0,18	5,4

Fonte: O autor.

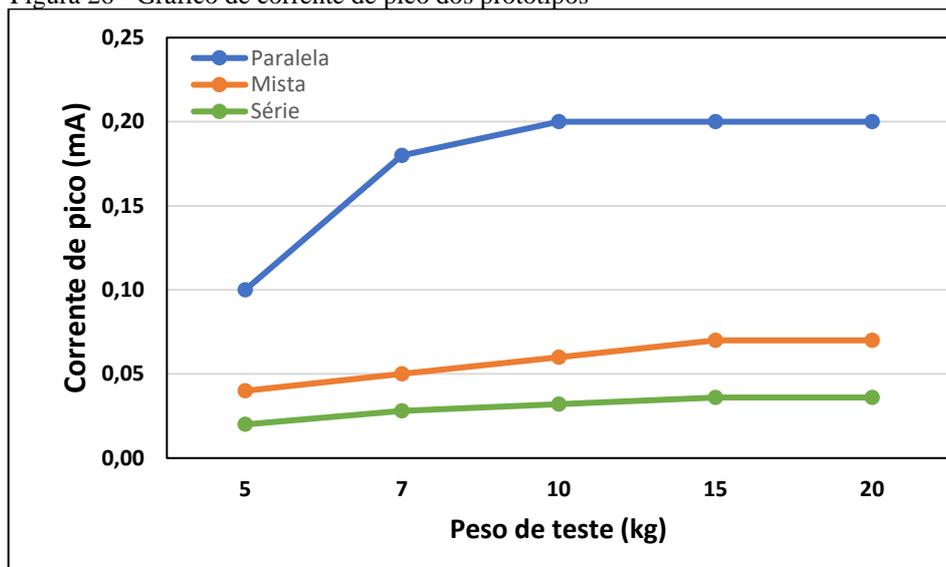
Após a realização dos testes dos protótipos em ligação obteve os seguintes resultados de tensões, correntes e potência, para encontrar os valores de corrente e potência, fez-se uso do procedimento descrito no tópico 3.3, os resultados podem ser observados na Tabela 3, 4 e 5 no Apêndice B, tais valores foram dispostos na forma de gráficos para melhor visualização (Figura 25, 26 e 27).

Figura 25 - Gráfico de tensão de pico dos protótipos



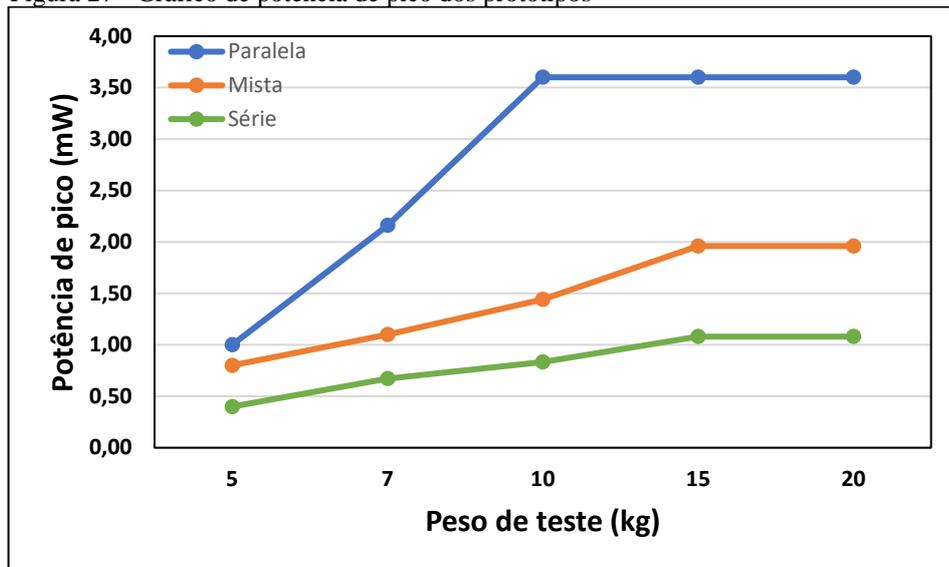
Fonte: O autor.

Figura 26 - Gráfico de corrente de pico dos protótipos



Fonte: O autor.

Figura 27 - Gráfico de potência de pico dos protótipos



Fonte: O autor.

Observa-se que a tensão máxima do paralelo foi 80% maior do que a teórica, já o em série e misto obteve 66,67% e 6,67% respectivamente menor do que o teórico. A corrente a no paralelo, série e misto foram respectivamente 62,96%, 40% e 61,11%. Nota-se que a potência do paralelo foi a que obteve o melhor resultado, apesar de estar 33,33% abaixo do teórico.

5 CONCLUSÃO

Objetivo foi analisar as variações obtidas ao submeter um protótipo com variações em sua configuração. Dessa forma foi possível identificar qual a melhor configuração para geração de energia. Para isso foi avaliado a potência gerada durante os ensaios.

Com os resultados dos ensaios práticos foi verificado que os protótipos tiveram grandes variação entre as ligações, a ligação que obteve o melhor desempenho foi a ligação em paralelo.

Apesar da potência dos cálculos teóricos ter o mesmo resultado entre as ligações no prático a ligação em paralelo obteve melhores resultados do que as demais, porém ela foi menor do que a teórica, o que já era esperado, pois em sistemas reais ocorrem perdas de diversas formas, como por aquecimento da fiação e histerese. Além desses fenômenos por ocorrer perdas por conta do material utilizado, como defeitos na solda, nos fios, e tamanhos inadequado dos fios.

Outro ponto observado é quanto a curvatura do gráfico, o gráfico de corrente apresenta maior linearidade, supõe-se que se utilizar valores intermediários é possível estabelecer, com auxílio de ferramentas matemáticas como por exemplo regressão linear, uma equação que rege esse fenômeno.

Como sugestão para trabalhos futuros, pretende-se realizar testes com forças aplicadas em frequência constantes, assim será possível desenvolver uma forma de aproveitar a energia vibracional em lugares com frequência constante como por exemplo máquinas rotativas.

Outra possibilidade seria a verificação da implantação em uma instituição de ensino, pois devido ao grande fluxo de pessoas tal opção apresenta um grande potencial. E com a energia gerada transmiti-la para as lâmpadas e materiais eletrônicos.

E um estudo comparativo entre diversos materiais piezoelétrico presente no mercado e formas de armazenar a energia produzida, para que o sistema não seja comprometido quando as pastilhas não forem acionadas.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, Evelise de Godoy et al. **PISO QUE TRANSFORMA ENERGIA MECÂNICA EM ELETRICIDADE**. 2014. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/projenergia3/projetos/trabalhos-2014/trabalhos-2014-2/GRUPOH.pdf>>. Acesso em: 21 mai. 2020.
- ARMENDANI, Willian Alves et al. **Conhecendo a Piezoelectricidade, uma nova forma de geração de energia elétrica**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, São Paulo, v. 1. n. 9. p. 314-320., out./nov. 2016.
- BRASIL. Ministério da Economia do. **ENERGIA**. 2020. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/legislacao/9-assuntos/categ-comercio-exterior/599-energia>>. Acesso em: 18 mar. 2020.
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia dos Materiais uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- DAMKE, Luana Ruwer. **Análise da eficiência energética do material polímero piezoelétrico: um novo conceito de energia renovável**. 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis, Universidade Federal Fronteira Sul, Cerro Largo, 2019.
- FEARNSIDE, P. M. **Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras**. Manaus: Editora do INPA, 2015.
- LAWSON, André; PEREIRA, Guilherme. **Termelétricas e seu papel na matriz energética Brasileira**. Fundação Getulio Vargas, 2017. Disponível em: <http://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opinio_fevereiro_-termeletricas-_andre_e_guilherme.pdf>. Acesso em: 11 de junho de 2020.
- MALVINO, Albert; BATES, Dave. **Eletrônica Vol. I**. 8. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- MOHEIMANI, S. O. Reza; FLEMING, Andrew J.. **Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping**. London: Springer, 2006.
- MOREIRA FILHO, Robério Paredes. **Análise e caracterização da potência elétrica gerada com elemento piezoelétrico**. 2014. 142 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.
- RANGEL, Renato Franklin. **Caracterização de uma célula tubular piezoelétrica para geração de energia elétrica**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.
- RECICOMP. **Pastilha Piezoelétrico**, 2020. Disponível em: <<https://www.recicomp.com.br/produtos/pastilha-piezoelétrico-35mm/>>. Acesso em: 11 de junho de 2020.
- REIS, Lineu Belico dos. **Geração de Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Manole, 2011.

SANTOS, Afonso Henriques Moreira et al. **CONSERVAÇÃO DE ENERGIA Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. Itajuba: Fupai, 2006.

TORRES, Regina Célia. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado) em Térmica e Fluidos - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

VIGINOSKI, Cibele Lemos Freire. **Sistema utilizando vibração de um transdutor piezoelétrico para medir densidade de um líquido**. 2013. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica Saraiva, 2015.

VIVES, Antonio Arnau. **Piezoelectric Transducers and Applications**. 2. ed. Valencia: Springer, 2008.

APÊNDICE A - Valores obtidos nos ensaios individuais

Peso (g)	Tensão de pico aberto (V)	Tensão de pico fechado (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
0,10	2,00	0,05	0,005	0,010
0,20	4,00	0,10	0,010	0,040
0,30	6,00	0,20	0,020	0,120
0,40	9,00	0,30	0,030	0,270
0,50	10,00	0,40	0,040	0,400
0,60	10,00	0,50	0,050	0,500
0,70	10,00	0,60	0,060	0,600
0,80	10,00	0,60	0,060	0,600
0,90	10,00	0,60	0,060	0,600

Fonte: O autor.

APÊNDICE B - Valores obtidos nos ensaios dos protótipos

Tabela 3 - Resultados do protótipo em paralelo

Peso (g)	Tensão de pico aberto (V)	Tensão de pico fechado (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
5	10	1,00	0,10	1,00
7	12	1,80	0,18	2,16
10	18	2,00	0,20	3,60
15	18	2,00	0,20	3,60
20	18	2,00	0,20	3,60

Fonte: O autor.

Tabela 4 - Resultado do protótipo em série

Peso (g)	Tensão de pico aberto (V)	Tensão de pico fechado (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
5	20	0,20	0,02	0,40
7	24	0,28	0,03	0,67
10	26	0,32	0,03	0,83
15	30	0,36	0,04	1,08
20	30	0,36	0,04	1,08

Fonte: O autor.

Tabela 5 - Resultados do protótipo misto

Peso (g)	Tensão de pico aberto (V)	Tensão de pico fechado (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
5	20	0,40	0,04	0,80
7	22	0,50	0,05	1,10
10	24	0,60	0,06	1,44
15	28	0,70	0,07	1,96
20	28	0,70	0,07	1,96

Fonte: O autor.