



**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS  
CURSO**

SAMUEL RINCON LIGOSKI  
RA: 21653939

**SISTEMA DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA VIA SENSORES  
PIEZOELÉTRICOS**

BRASÍLIA  
2019



SAMUEL RINCON LIGOSKI

## **SISTEMA DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA VIA SENSORES PIEZOELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica do UniCEUB– Centro Universitário de Brasília

Orientador (a): **Prof Francico Javier De Obaldía Díaz**

BRASÍLIA  
2019



SAMUEL RINCON LIGOSKI

## **SISTEMA DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA VIA SENSORES PIEZOELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica do UniCEUB – Centro Universitário de Brasília

Orientador (a): **Prof Francico Javier De Obaldía Díaz**

Brasília, 2019.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof Francico Javier De Obaldía Díaz - Mestre**  
Orientador (a)

---

Nome e titulação.  
Examinador (a)

---

Nome e titulação.  
Examinador (a)

# Sistema De Microgeração De Energia Via Sensores Piezoelétricos

## Energy Microgeneration System Through Piezoelectric Sensors

Samuel Rincon Ligoski<sup>1</sup>, Prof Francico Javier De Obaldía Díaz<sup>2</sup>,  
Primeiro examinador<sup>3</sup>, Segundo examinador<sup>4</sup>

### Resumo

O presente trabalho busca estudar as características inerentes às células piezoelétricas e elaborar um sistema com “Energia Elétrica Piezoelétrica”, através de sensores piezoelétricos, mostrando a possibilidade de aplicação em dispositivo com consumo de energia em baixa escala, que possa contribuir em fatores como: economia de energia, energia limpa e comodidade. Será utilizada apenas a célula de cerâmica piezoelétrica na forma de pastilha, mesmo existindo outros tipos. Os materiais piezoelétricos ao serem deformados, criam um campo elétrico, apresentando uma D.D.P. (diferença de potencial). Serão levantadas informações e resultados do efeito piezoelétrico, colaborando para estudos futuros, buscando subsidiar pesquisas voltadas ao tema, visto que o mesmo ainda não é expandido. Logo após do estudo, será apresentado um possível protótipo eletrônico para o cotidiano para que possa ser feita a Colheita de Energia, que tenha uma energia mecânica envolvida, para que essa grandeza mecânica seja convertida em elétrica. Demonstrou-se que sistemas não lineares como é caso do piezoelétricos são extremamente complexos, e que a simulação e adaptações para sistemas lineares serão necessários.

**Palavras-chave:** Colheita de Energia, Piezoeletricidade, Sistemas Energéticos.

---

<sup>1</sup> UniCEUB, aluno.

<sup>2</sup> UniCEUB, orientador.

<sup>3</sup> UniCEUB, primeiro examinador.

<sup>4</sup> UniCEUB, segundo examinador.

## **Abstract**

The present work aims to study the inherent characteristics and to elaborate a system with “Piezoelectric Electric Power”, through piezoelectric sensors, raising the possibility of application in a device with low energy consumption, which may contribute to factors such as: energy saving, clean energy and convenience. Only piezoelectric ceramic in tablet form will be used, even if other types exist. When piezoelectric materials are deformed, they create an electric field, presenting a D.D.P. (potential difference). Information and results of the piezoelectric effect will be brought that may serve for further studies, since some tests were not tested or taken into consideration by the authors of the studies found. Soon after the study, an electronic prototype will be presented for everyday life so that the Energy Harvesting can be done, which has a mechanical energy involved, so that this mechanical quantity can be converted into electrical. Nonlinear systems such as piezoelectrics have been shown to be extremely complex, simulation and adaptations to linear systems will be required.

**Keywords:** Energy Harvesting, Piezoelectricity, Energy Systems.

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização excessiva de combustíveis fósseis tem ocasionado o esgotamento de suas reservas, visto que cada vez mais a sociedade moderna se torna dependente de energia. Pensando nisso, a busca por novas formas de obtenção de energia se fazem necessárias.

Os dispositivos que são utilizados no cotidiano vêm sofrendo uma miniaturização, necessitando cada vez de menos energia, maior ergonomia e mais autonomia, sem aumentar a necessidade de carregamento ou outros fatores de impacto, como por exemplo, troca de pilhas, que afetam diretamente na geração de resíduos sólidos, impactando o meio de onde vivemos.

A história humana pode ser dividida de acordo com o material mais usado em determinada época, idade do bronze e idade do ferro são alguns dos exemplos. Hoje vivemos a chamada era do silício.

Recentemente os materiais chamados inteligentes tem chamado atenção e são fontes de vários estudos, sendo estimulados por novas tecnologias, esses materiais não possuem formas ou características definidas, mas são identificados quando reagem a estímulos exteriores, sendo grandezas de várias formas, como, mecânica, elétrica, temperatura, e a maioria desses materiais possuem a reciprocidade ou a reversibilidade, ou seja, aplicando-se uma grandeza mecânica que se transforma em eletricidade, o inverso também ocorre (OLIVEIRA, 2013).

A utilização das energias disponíveis no ambiente para determinada abordagem é utilizada pela humanidade há muito tempo como as rodas de água e o moinho de vento, que são provenientes da energia mecânica. Hoje temos as fontes alternativas como solar, térmica e vibração.

Com essa abordagem surge o conceito de Colheita de Energia (Energy Harvesting), para alimentar pequenas cargas a partir de fontes externas de energia, transformando-as

em eletricidade a partir de característica específicas, e uma das vertentes é a piezoeletricidade.

Em 1880 os irmãos Curie descobriram o efeito piezoelétrico (somente o efeito direto, o efeito inverso foi matematicamente deduzido por Gabriel Lippmann em 1881), mas a sua primeira aplicação foi em sonares durante a Primeira Guerra Mundial pelo francês Paul Langevin.

Os materiais com propriedade piezoelétricas podem gerar uma diferença de potencial a partir de uma força mecânica exercida sobre ele, ou alteração do estado mecânico quando é imposta uma grandeza elétrica em seus terminais.

### 1.2 Objetivo

Transformar a energia mecânica gasta em ações cotidianas, como o da digitação, em eletricidade, a partir de materiais posicionados sob o local que onde será exercida a ação, e visando o funcionamento pelo princípio piezoelétrico, gerando assim, energia suficiente para alimentar o dispositivo.

#### 1.2.1 Objetivo Específico

- Gerar a energia no instante da utilização do dispositivo;
- Especificar e construir circuito adaptado com a pastilha piezoelétrica;
- Implementar circuito de apoio para armazenar energia enquanto usa-se o dispositivo;
- Construir o protótipo e testar em alguma das possíveis aplicações.

### 1.3 Justificativa

A busca por aplicações da piezoeletricidade tem impulsionado muitas pesquisas nos últimos anos, o tema é abordado por diversos autores, por sua importância na atualidade. Os resultados de

tais estudos compõem um banco de informações que auxiliaram na elaboração de modelos que contemplem afetivamente a utilização de dispositivos de baixa potência.

ROCHA (2010) cita que existe uma crescente demanda por dispositivos eletrônicos portáteis com baixa potência, criando um cenário propício para a inserção de materiais piezoelétricos. Dentro dessa discussão, é possível entender a importância da criação de modelos visando o estudo da viabilidade de transformação da piezoelectricidade em uma relevante forma de geração de energia elétrica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

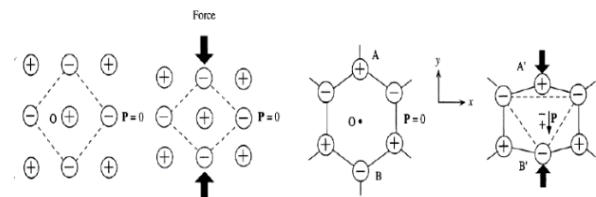
Para uma melhor compreensão do funcionamento da geração de energia piezoelétrica, é de suma importância conhecer o equacionamento e o comportamento dos componentes utilizados. Portanto, a seguir será apresentada uma breve revisão bibliográfica que levou a formulação e desenvolvimento de um transdutor piezoelétrico e também para possíveis componentes que o tornem um gerador de energia elétrica viável.

### 2.1 Materiais Piezoelétricos

Em 1880 os Irmãos Jacques e Pierre Curie notaram que cristais de topázio, turmalina e quartzo quando submetidos a uma força mecânica sobre o mesmo, geram cargas elétricas. Segundo IKEDA (1996) a comprovação do material ser piezoelétrico vem por meio da relação entre a deformação mecânica aplicada e o campo elétrico produzido. O inverso também ocorre, um material piezoelétrico, quando submetido a um campo elétrico, sofre alteração em suas formas e dimensões.

Se um agente externo exerce uma força mecânica sobre o cristal, a simetria do cristal se altera, tendo uma distribuição irregular das cargas, criando um campo elétrico (Figura 2.1).

Figura 2.1. Simetria do Cristal.



Fonte: KASAP (2006)

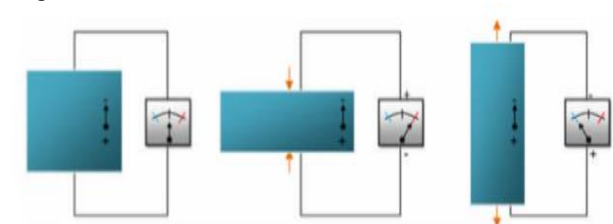
Além dos cristais, que são naturais, existem outros tipos de piezoelétricos, que são provenientes dos materiais sintéticos, que são as cerâmicas piezoelétricas, como por exemplo, o PZT (OLIVEIRA, 2013).

### 2.1.1 Piezoelectricidade

A palavra “Piezoelectricidade” vem do grego e significa “Eletricidade por pressão”.

O fenômeno da piezoelectricidade tem dois efeitos, consideram-se como Efeito Piezoelétrico Direto, apresentado na Figura 2.2, quando a geração de energia elétrica é a consequência de uma força mecânica aplicada.

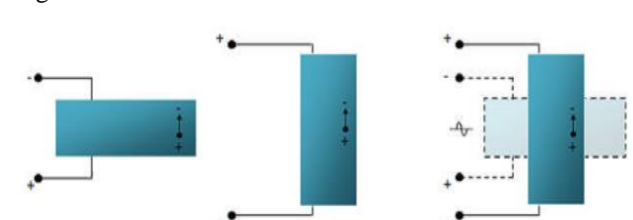
Figura 2.2. Efeito Piezoelétrico Direto.



Fonte: CASIMIRO (2009).

No Efeito Piezoelétrico Inverso, apresentado da Figura 2.3, uma alteração mecânica no material é submetido pela aplicação de uma carga elétrica.

Figura 2.3. Efeito Piezoelétrico Inverso.



Fonte: CASIMIRO (2009).

Piezoelasticidade pode ser descrita como a linearidade da interação entre sistema mecânico e um sistema elétrico em materiais piezoelétricos.

E esses efeitos são descritos pelas seguintes equações:

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (1)$$

$$S = dE + s^T T \quad (2)$$

Onde,  $D$  é o fluxo dielétrico [ $C/m^2$ ],  $T$  pressão mecânica [ $N/m^2$ ],  $E$  campo elétrico [ $N/C$ ],  $S$  extensão [sem dimensão],  $d$  constante de carga piezoelétrica [ $C/N$ ],  $\varepsilon^T$  a permissividade com  $T$  constante [ $F/m$ ] e  $s^E$  a deformidade com  $E$  constante [ $m^2/N$ ] (CONÇALVEZ, 2011).

## 2.2 Elementos de Circuitos

Há elementos básicos para a elaboração de circuitos, fonte de tensão, resistor, capacitor e diodo e para fins de análise, podemos relacionar corrente, tensão e potência, com as seguintes fórmulas:

$$V = I \times R \quad (3)$$

$$P = V \times I \quad (4)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (5)$$

Onde  $V$  é a tensão [ $V$ ],  $I$  é a corrente [ $A$ ],  $R$  é a resistência [ $\Omega$ ] e  $P$  é a potência [ $W$ ].

### 2.2.1 Resistor

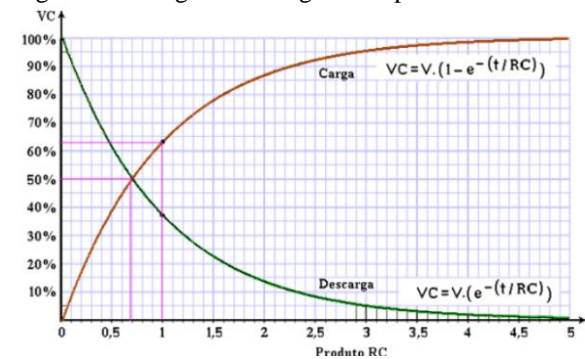
“Resistência é a capacidade dos materiais de impedir o fluxo de corrente, mais especificamente, o fluxo de carga elétrica” (NILSSON, 2009). Praticamente todos os materiais possuem uma resistência, que é descrita pela Lei de Ohms (Equação 3).

### 2.2.2 Capacitor

Para que haja o efeito capacitivo ( $C$ ), segundo (NILSSON, 2009), os condutores elétricos devem estar separados por um

material dielétrico ou isolante. Com essa condição a carga elétrica encontra uma dificuldade de continuar o fluxo pelo capacitor, assim o capacitor responde a uma passagem de corrente, retendo a carga e armazenando a energia na forma de campo elétrico, e devolvendo-a quando a corrente para de ser aplicada, mas para esse efeito acontecer é necessário um certo tempo como descrito na Figura 2.4.

Figura 2.4. Carga e Descarga do Capacitor.



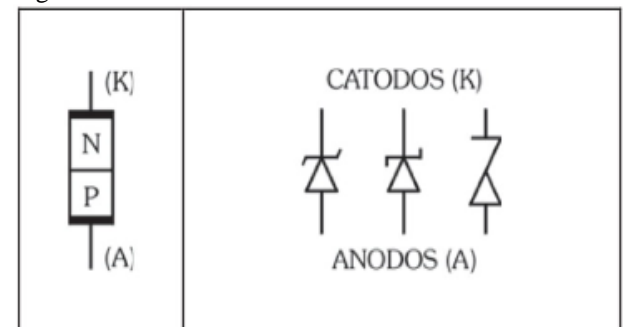
Fonte: CAVALCANTE (2019).

### 2.2.3 Diodo Zener

O diodo é descrito por (MARKUS, 2008) como sendo um dispositivo semicondutor formado por uma única junção PN, com o cristal tipo P é o anodo, e o N, é o catodo, como mostrado na Figura 2.5.

O nome diodo é derivação das palavras duplo (di) com eletrodo (odo).

Figura 2.5. Diodo Zener.



Fonte: MARKUS (2008).

O diodo Zener é um diodo especial composto de silício, que difere do diodo comum pelo fato de suportar uma



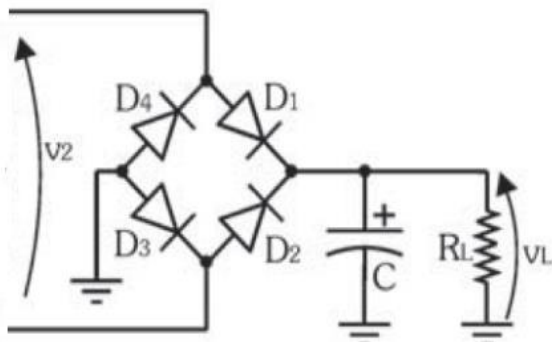
determinada corrente reserva sem que tenha a ruptura.

### 2.2.4 Retificador com Filtro Capacitivo

Segundo CIPELLI (2007), com o uso de retificadores controlados, pode-se obter, a partir de uma tensão alternada, uma tensão contínua variável (com níveis que vão de um valor máximo até zero).

O método mais comum de retificação é o modelo de diodo em ponte, mas nem sempre é o único componente, podendo incluir filtros, como por exemplo, para deixar-se a onda retificada atenuada é feita a aplicação de capacitor em shunt, como mostrada na Figura 2.6.

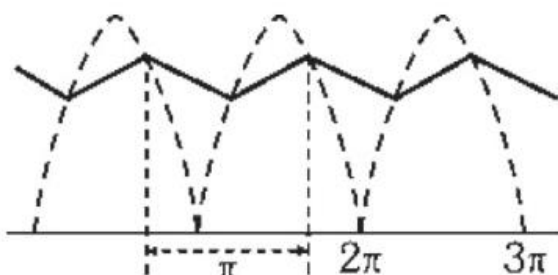
Figura 2.6. Diodo em Ponte com Filtro Capacitivo.



Fonte: MARKUS (2008).

O capacitor em shunt tem como a sua finalidade filtrar as grandes variações das tensões retificadas, tornando-a quase constante, como descrito na Figura 2.7.

Figura 2.7. Onda Retificada

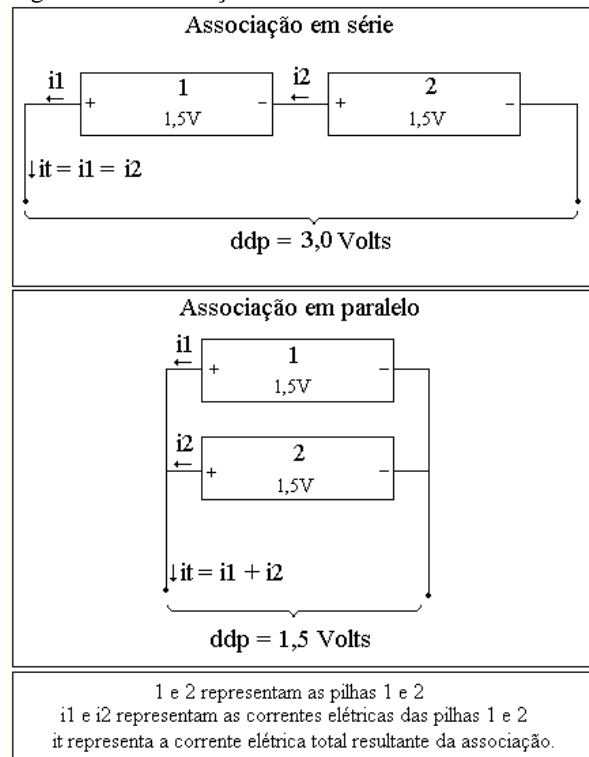


Fonte: CIPPELE (2007).

### 2.2.3 Associação de Fontes

É comum em circuitos elétricos ter mais de uma fonte para alimentar uma carga, desta forma, o modo em que as fontes são associadas resultará em características diferentes para o circuito, como demonstrado na Figura 2.8.

Figura 2.8. Associação de Fontes.



Fonte: UNESP/BAURU (2019).

Para a associação em série, a corrente é a igual em todas as fontes e se mantém a mesma, mas a tensão é somada, em paralelo a tensão se mantém e a corrente é somada, mas só é possível a associação em paralelo quando as tensões forem iguais.

### 2.3 Tecnologias Existentes

Atualmente têm-se dispositivos diversos que se baseiam no princípio piezoelétrico para diferentes aplicações, e algumas são mostradas na Figura 2.9.

Figura 2.9. Aplicações para o Piezoelétrico.



### 2.3.4 Pavimento piezoelétrico

A ideia central se baseia em apoiar uma determinada placa (que receberá uma força) em quatro apoios. Esses apoios limitam a movimentação indesejada e também possuem uma mola em cada apoio, para que quando uma força para de ser exercida, os transdutores voltem ao estado natural, assim sendo possível deforma-lo novamente, criando uma diferença de potência em seus terminais, convertendo uma energia mecânica em elétrica. Com isso foi criado o PIZO, por CASIMIRO (2009).

Figura 2.10. Protótipo PIZO.



Fonte: CASIMIRO (2009).

O PIZO é a miniaturização do protótipo, alguns testes foram realizados com quatro geradores, foi encontrada uma corrente total de 5 mA. E também foi elaborado um ensaio com quatro leds (1,5 mA) e quatro capacitores (33  $\mu$ F) sendo que, no ensaio os leds acenderam durante um segundo.

### 2.3.5 Abastecimento Semafórico com Piezoelétricos

Esse protótipo tem como intuito gerar eletricidade com a passagem de carros sobre os transdutores, assim criando uma diferença de potencial. Nota-se a criação de dois circuitos específicos, um para a retificação e outro para o armazenamento da energia gerada, da qual será utilizado para fornecer energia ao semáforo.

Figura 2.11 Tablado com Piezoelétrico.



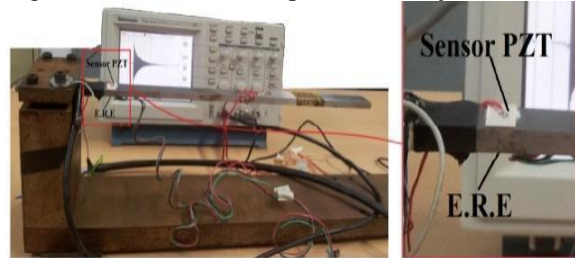
Fonte: FERREIRA (2015).

Os resultados encontrados por FERREIRA (2015) com o protótipo (Figura 2.11) mostraram para uma quantidade de 10 pastilhas é possível gerar 68 mA e uma tensão de 4.43 V com um peso de 28 kg.

### 2.3.7 Piezoelétrico como Sensor de Deformação

O trabalho feito por LIMA (2013) analisa as forças mecânicas de tração, compressão e cisalhamento, e se baseia nas repostas obtidas provenientes dos piezoelétricos.

Figura 2.12. Transdutores para Deformação.



Fonte: LIMA (2013).

Os resultados obtidos pelo experimento da Figura 2.12 mostraram que o sensor piezoelétrico consegue medir deformações na ordem de  $10^{-3} \mu\text{m/m}$ .

### 2.3.8 Piezocerâmicos em UAVs

Para aumentar do tempo de voo de aviões não tripulados (Figura 2.13) foram instalados nas asas do avião alguns piezocerâmicos para captar as vibrações durante o voo e converte-las em energia para a parte elétrica do avião.

Figura 2.13. Avião Não Tripulado Hermes 450.



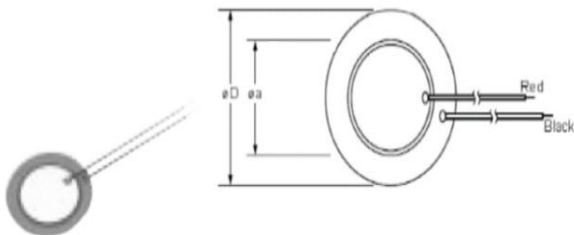
Fonte: EDA (2010).

Durante o processo de fabricação é aplicado nas asas os piezocerâmicos que não altere a geometria ou a massa de forma significativa. Os resultados obtidos pela EDA (2010) mostraram que é possível obter um valor de potência de 157,72 mW/g<sup>2</sup>, sendo  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

### 3 METODOLOGIA DO TRABALHO

Primeiramente, será feito um estudo em torno da pastilha piezoelétrica de forma teórica e prática e relacioná-las, com alternâncias de pesos sobre o piezoelétrico, relação deformação e carga fornecida. A Figura 3.1 ilustra como é realizada a conexão dos cabos na pastilha piezoelétrica.

Figura 3.1 Pastilha Piezoelétrica.



Fonte: NEWARK (2016).

Em uma segunda etapa será feita a análise das pastilhas em conjunto e posicionamento, isto é, em paralelo, em série ou misto, fazendo testes e buscando a melhor posição. Usando nove pastilhas em série, nove em paralelo, três ligados em série conectando três séries em paralelo no misto, com total de nove pastilhas também.

A terceira etapa está relacionada ao estudo das cargas de possíveis dispositivos que podem ser alimentados com o protótipo a ser construído neste trabalho.

Na quarta etapa serão tratados os componentes do circuito, como retificador de onda e armazenamento.

Na quinta etapa serão feitas medições com o conjunto das pastilhas piezoelétricas com o circuito da quarta etapa.

Finalmente, se possível, uma sexta etapa, tendo conjunto da etapa cinco aplicado com dispositivos encontrados na terceira etapa.

Figura 3.2. Diagrama de Processos.



Fonte: O AUTOR.

- 1º módulo - Pastilha Piezoelétrica

O módulo piezoelétrico consiste na simulação da superfície que receberá determinada força, com isso, convertendo a energia pelo efeito piezoelétrico para alimentar a carga.

- 2º módulo - Retificador

A retificação por meio de ponte de diodo é responsável pela transformação da onda gerada na forma alternada (C.A.) em contínua (C.C.).

- 3º módulo - Conversor

O módulo conversor consiste em controlar e limitar com filtro capacitivo, os níveis de tensão para que possa ser armazenado.

- 4º módulo - Armazenamento

A Bateria é encarregada de armazenar a energia gerada pelo piezoelétrico, fornecendo a tensão de forma correta, necessária na alimentação do dispositivo.

- 5º módulo - Dispositivo

O módulo do dispositivo consiste na carga a ser alimentada, no caso, o teclado foi o escolhido.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item serão apresentados e analisados dados desenvolvidos de forma prática para o projeto com pastilhas piezoelétricos

### 4.1 Estudos do Piezoelétrico

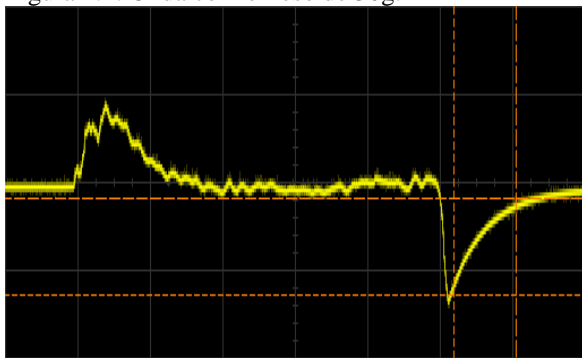
A proposta de utilizar a energia contida em atividades deve ser preestabelecida de demonstrações e testes.

#### 4.1.1 Estudos com uma Pastilha

Utilizou-se de pastilhas piezoelétricas de 27 mm e com cerâmica de 18 mm, com capacitância medida de 20.7 nF.

Quando pressionado o piezoelétrico cria uma diferença de potencial em seus terminais. Nas imagens 4.1 e 4.2 observa-se o comportamento da tensão ao longo do tempo, com a inserção de pesos de 50g e 1000g respectivamente sobre a piezoelétrico, tendo oscilações entre os eixos verticais e horizontais. Onde o eixo horizontal representa o tempo e o vertical a tensão.

Figura 4.1. Onda com o Peso de 50g.



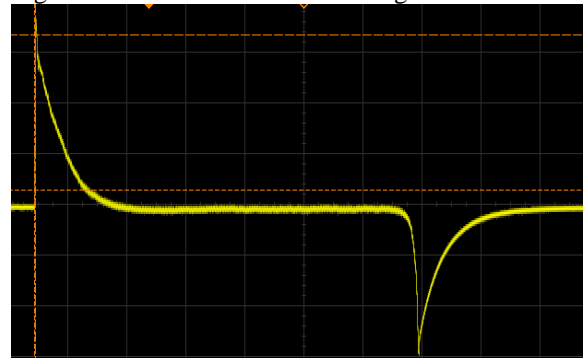
Fonte: O AUTOR.

Na Figura 4.1 o piezoelétrico ficou sendo pressionado, gerando o primeiro pico, conforme observado no gráfico, e permanecendo com alterações até retornar ao ponto zero, foi quando parou-se de pressionar o piezoelétrico.

Observou-se ainda, que sem estar sendo pressionado, ocorreu um pequeno declínio no gráfico, que logo retornou ao zero inicial.

Pode-se então observar que mesmo sendo pressionado a um determinado tempo, ocorre um novo ponto de estabilidade do piezoelétrico, que volta ser alterado quando a força em si para de ser exercida. Cria-se então, uma amplitude de tensão próxima à encontrada quando se é pressionado, mas com o sentido inverso, ou seja, quando pressionado gera energia, que será consumida para voltar ao seu estado inicial. Tal fato condiz com a Lei da Termodinâmica (COLLE, 2019).

Figura 4.2. Onda com Peso de 1000g.



Fonte: O AUTOR

Na Figura 4.2, utilizou-se peso de 1000g. Quando o piezo foi pressionado, o pico ocorreu já no primeiro instante, e posteriormente ocorreu o decaimento gradativo, chegando ao ponto zero, quando parou-se de pressionar o piezo. Observou-se que também ocorreu o declínio no gráfico e o retorno ao ponto inicial.

Sendo assim, para consegue-se visualizar melhor as fases entre a inserção do peso até o retorno da tensão a zero, elaborou-se o gráfico e as seguintes tabelas, que estão separadas em fase positiva e negativa, a fim de se realizar melhor análise.



Tabela 1. Fase Positiva da Onda

Peso (g)	Tempo de Subida (ms)	Tempo de Descida (ms)	Tensão Máxima (V)	Tensão Média (V)	Área (Vxs)
50	205,53	461,67	2,3	0,442	0,640
150	40,22	518,34	4,9	0,983	1,114
250	33,48	540,42	6,6	1,171	1,607
500	17,6	512,77	10,5	1,361	2,386
1000	9,18	503,85	11,7	1,907	2,742
2000	8,98	504,65	12,0	1,918	2,799

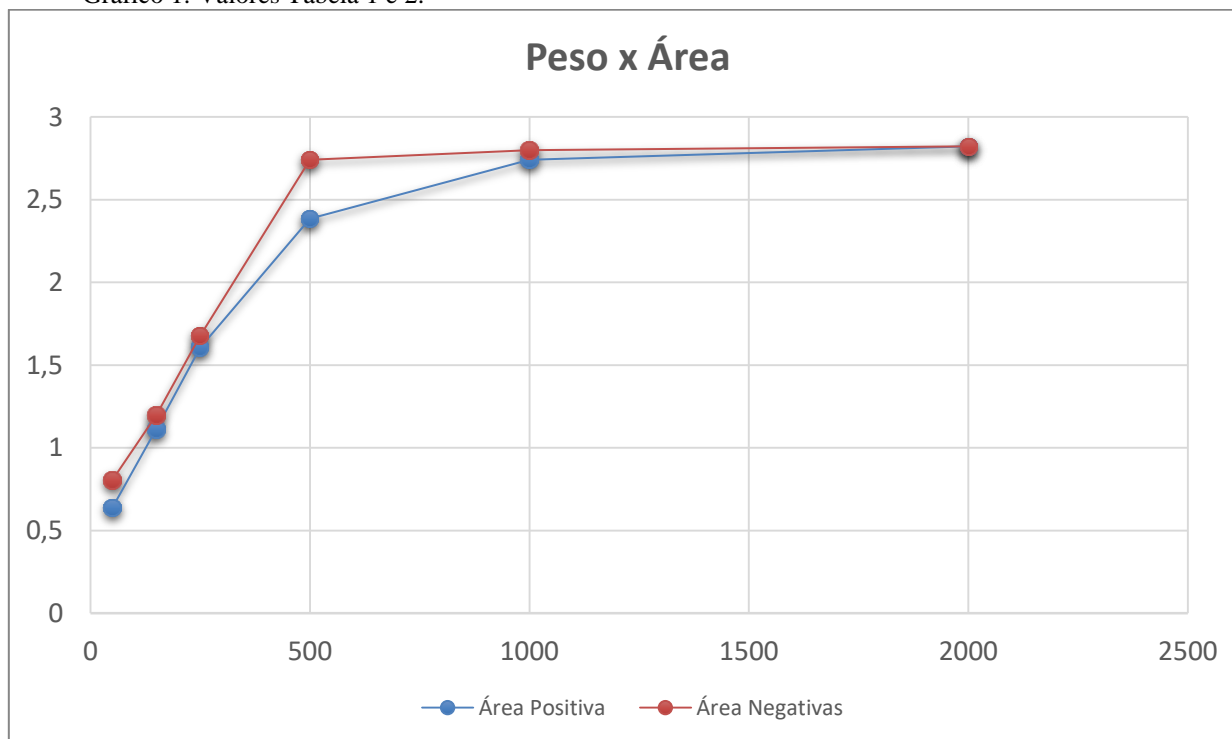
Fonte: O AUTOR.

Tabela 2. Fase Negativa da Onda

Peso (g)	Tempo de Subida (ms)	Tempo de Descida (ms)	Tensão Máxima (V)	Tensão Média (V)	Área (Vxs)
50	641,17	60,33	3,1	0,638	0,807
150	650,02	52,89	4,5	1,012	1,198
250	665,46	43,80	6,3	1,231	1,678
500	587,70	59,58	8,6	1,457	2,742
1000	632,97	62,00	8,9	2,095	2,800
2000	636,20	61,73	9,1	2,103	2,822

Fonte: O AUTOR.

Gráfico 1. Valores Tabela 1 e 2.



Fonte: O AUTOR

E esta área se dá sob a curva das ondas como o das Figuras 4.1 e 4.2, com conceito elétrico de que quando há uma tensão, há uma corrente, e o produto de corrente com tensão é a potência.

Quando essa tensão é diferente de zero e varia em um determinado tempo, logo a potência também varia ao longo do tempo, e tal efeito se relaciona com o conceito de energia ( $E = P \times t$ ).

Pode-se observar então que a tensão máxima se relaciona de forma direta com o peso aplicado, e o tempo de resposta (primeiro pico) varia de acordo com a forma em que o peso é aplicado, ou seja, se a força aplicada incidir de forma mais abrupta, acontecerá à resposta de forma mais rápida.

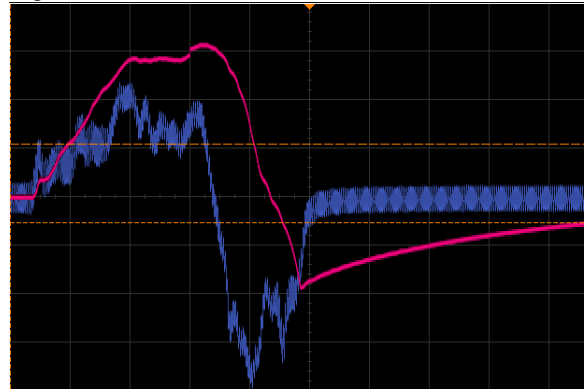
Conforme os valores intrínsecos do próprio piezoelétrico, com dois aspectos importantes: os tempos de descida na fase positiva e subida na negativa. Tal ocorrência pode ser relacionada com a característica capacitiva do piezoelétrico.

Para ter-se uma projeção, com valores próximos de 506 e 635 ms para o tempo de descida na fase positiva e subida na negativa. Pode-se arredondar como um ciclo total para 1 segundo, ou 1 Hz.

#### 4.1.2 Pastilhas em Conjunto

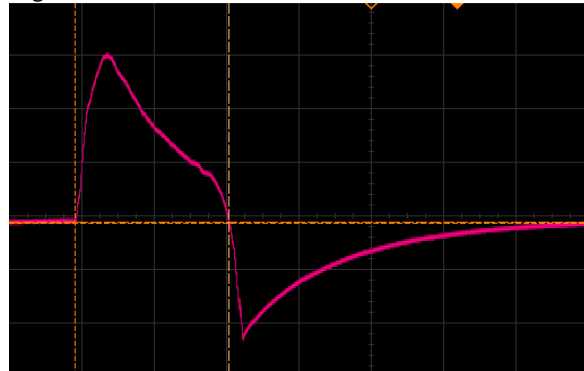
A forma de melhor aproveitar-se uma força aplicada e elevar a potência gerada pelo sistema piezoelétrico é aumentando a quantidade de pastilhas, para tal. Pode-se montar conjuntos com nove pastilhas cada, que deverão ser ligados em série, paralelo e misto (três pastilhas ligadas em série, e ligadas em três paralelos, dando um total de nove pastilhas). A Figura 4.3 descreve a conversão em um modelo em paralelo representado de azul e com o vermelho em paralelo, e a Figura 4.4 o modelo misto.

Figura 4.3. Ondas, Azul Paralela e Vermelha Série.



Fonte: O AUTOR

Figura 4.4. Onda mista.



Fonte: O AUTOR.

Utilizando os valores encontrados no item 4.1 ultrapassando o valor máximo do peso em que o piezoelétrico tem alteração, é imposto um peso de 10 kg sobre os conjuntos das pastilhas, relatando os valores na Tabela 3 abaixo.

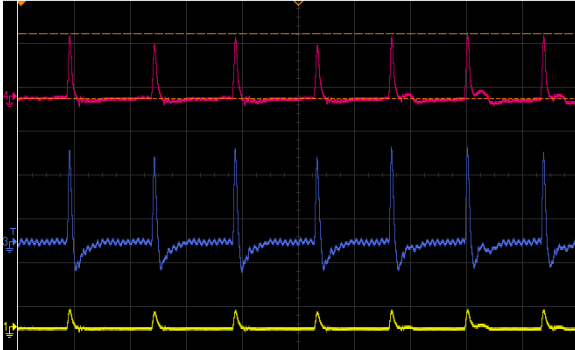
Tabela 3. Usado um Peso de 10 kg Sobre Nove Pastilhas.

Ligação	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tempo subida (ms)
Paralelo	1,02	0,051	0,065	534,31
Série	4,01	0,015	0,061	5.456,54
Misto	3,08	0,026	0,080	1.912,78

Fonte: O AUTOR.

Conforme, mais um teste é ensaiado, diferente do item 4.1.2 a digitação é sobre uma única pastilha em um sistema com nove pastilhas que gera a onda mostrada na Figura 4.5.

Figura 4.5. Clicada, vermelho misto, azul serie, amarelo paralelo.



Fonte: O AUTOR.

Na Figura 4.5 é mostrado outro fator de complicação para a implementação, a distorção criada pelo acoplamento do piezoelétrico em paralelo, presentes no modelo em paralelo e misto, pelo fato de ter uma única pastilha gerando, além do fator capacitivo atuante dos demais piezoelétricos.

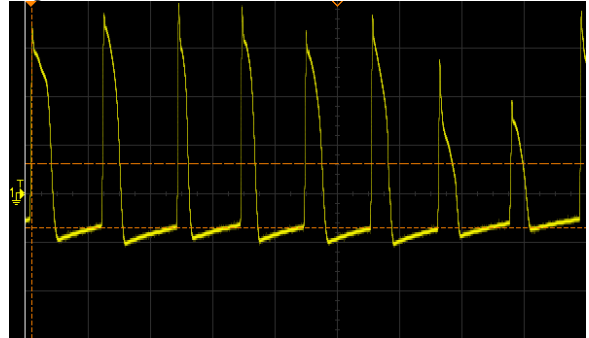
## 4.2 Aplicação para o Efeito Piezoelétrico

Busca-se aplicar o efeito piezoelétrico como uma forma de alimentação de dispositivos eletrônicos, para que não seja necessária a realização de carregamentos ou a troca de pilha/bateria.

Dessa forma, pode-se citar o controle remoto, mouse e teclado de computador, dando ênfase no teclado, devido a questões ligadas a força mecânica exercida, podendo possuir variações de intensidade. Para tal, utilizou-se o teclado sem fio.

Para aplicar um sistema piezoelétrico em um teclado, o primeiro passo é entender o que acontece com o piezoelétrico quando sofre a ação da digitação, que está mostrada na Figura 4.6.

Figura 4.6. Onda Piezoelétrica.



Fonte: O AUTOR.

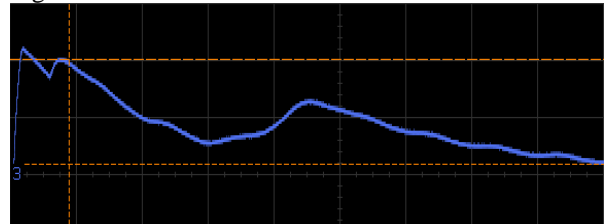
Para a obtenção da Figura 4.6 aplicou-se uma a força de forma repetida com um intervalo curto que não respeita os tempos encontrados na Tabela 1, já que muitas vezes o tempo entra as ações mecânicas é menor que o tempo da estabilização capacitiva do piezoelétrico, e observou-se que a relação da área é sempre respeitada (a área da parte positiva igual a parte negativa.), ou seja, que para o piezoelétrico gere energia novamente é preciso consumir toda energia do ciclo anterior para voltar a condição de estabilidade física.

### 4.2.1 Retificação da Onda

Os dispositivos eletrônicos necessitam de estabilidade em sua alimentação, por isso é necessário ajustar a onda, ou seja, retificá-la.

No intuito de aperfeiçoar a transformação a onda C.A. da Figura 4.6 em C.C., é acoplando uma ponte de diodo, com diodo de Germânio, três capacitores (cerâmica) de 10 nF cada, em paralelo para filtrar, e medir a queda de tensão em um resistor de  $1M\Omega$ , tem-se a seguinte onda retificada para uma clicada (Figura 4.7).

Figura 4.7. Onda Retificada.



Fonte: O AUTOR.



Com os dados obtidos em algumas tentativas e utilizando equação (5), tem-se a seguinte Tabela 4:

Tabela 4: Valores de uma Clicada.

Tentativa	Tensão máxima (V)	Tensão média (V)	Potencia máxima ( $\mu\text{W}$ )	Potencia média ( $\mu\text{W}$ )	Tempo (ms)
1	6,9	2,412	47,61	5,818	131,14
2	4,6	1,693	21,16	2,866	133,00
3	5,0	1,669	25,00	2,786	131,14
4	5,3	1,879	28,09	3,531	132,46
5	5,7	1,969	32,49	3,878	131,26
<b>Média</b>	5,5	1,924	30,74	3,776	131,76

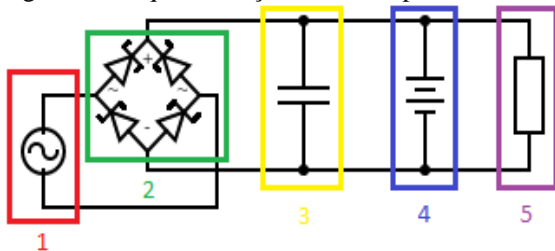
Fonte: O AUTOR.

Usando o valor médio com potência média de  $5,818 \mu\text{W}$  e  $131,76 \text{ ms}$  como o valor máximo de um piezolétrico sobre regime de digitação, em que o tempo (pra volta no regime de estabilidade) é respeitado.

#### 4.2.2. Protótipo

A montagem do prótoto de deu da seguinte maneira (Figura 4.8) de forma resumida.

Figura 4.8 Esquemática do Protótipo.



Fonte: O AUTOR.

1. Vermelho, este item é composto pela pastilha piezoelétrica sob a tecla, como mostrado na Figura 4.9, com o intuito de transformar a força mecânica da digitação em energia elétrica.

Figura 4.9. Pastilha Piezoelétrica Sob uma Tecla.



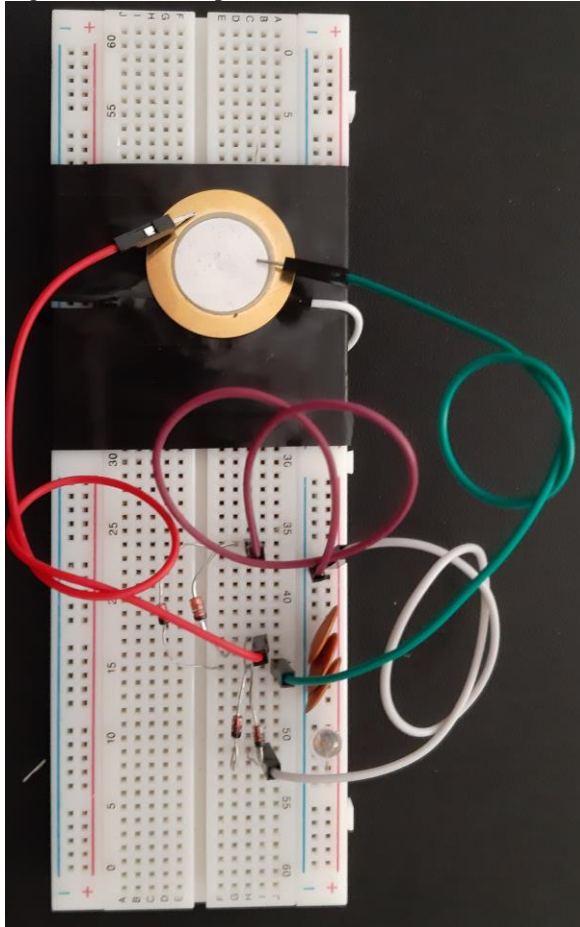
Fonte: O AUTOR

2. Verde, disposto com quatro diodos zener em ponte, que são responsáveis em retificar a onda proveniente do piezoelétrico.
3. Amarelo, constitui do banco de capacitores, com um total de  $30 \text{ nF}$ , com o intuito de filtrar e atenuar a tensão oscilante.
4. Azul, bateria recarregável de  $3,6 \text{ V}$  (tensão de operação do teclado) a ser carregada pelo piezoelétrico e alimentar a carga (teclado).
5. Roxo, por fim, o teclado, a carga a ser alimentada.

Para esse sistema, a geração piezoelétrica com uma potência gerada de  $5,818 \mu\text{W}$  mostrou-se insuficiente no instante da

digitação, além do teclado necessitar de mais energia para o modo standby, que é quando não há digitação, e tais testes foram feitos no conjunto da Figura 4.10.

Figura 4.10. Protótipo de Teste.



Fonte: O AUTOR.

#### 4.3 Problemas encontrados

Inicialmente, para retificar a onda de forma completa é criada uma ponte de diodo simples, com testes, esse método provou ser incapaz de chegar aos resultados esperados. Tal fato pode ser explicado pelo tempo de resposta instantâneo do piezoelétrico, bem como a queda de tensão nos diodos (utilizados diodos de silício e germânio, com 0,3 e 0,7 Volts de queda respectivamente), notou-se também, o surgimento de ruídos na componente da tensão, na tentativa de minimizar o problema com a queda de tensão, aplicou-se junto à ponte de diodo um

transformador com derivação central, que ainda se mostrou ineficaz quanto a retificação da onda gerada pelo piezoelétrico, isso para uma retificação de onda completa, o caso de retificação de meia onda não é interessante, já que se perderia meia onda, ou seja, metade da potência gerada seria perdida.

Alguns autores citam que utilizaram de gerenciador de cargas. Logo, implementou-se o Energy Harvester LTC3588 com o intuito de regular a carga.

Contudo o LTC3588 necessita de valores de tensão, corrente e frequência que não são possíveis a partir da conversão das pastilhas piezoelétricos nos aspectos idealizados, citando como exemplos, a tensão de entrada, mesmo tendo uma grande força aplicada no piezoelétrico.

#### 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conversão de força mecânica em energia elétrica foi investigada neste trabalho. Simulações foram realizadas com diversas forças sendo aplicadas em modelo com associações em diferentes situações, na forma não linear direta do piezoétrico.

A geração piezoelétrica dar-se de forma quase instantânea, possibilitando a sua aplicação.

A parte mais complexa deste trabalho foi retificar a onda gerada pelo piezoelétrico, já que ela não ocorre de forma linear.

Para o circuito de armazenemto, o objetivo foi alcançado em parte, visto que o armazenamento só foi possível por meio de capacitores, mas para armazenamento em baterias seria necessário elaborar um sistema mais robusto, devido a necessidade do carregamento de bateria necessitar uma tensão constante.

Com o prototipo acoplado em um teclado, a geração piezoelétrica mostrou-se ter um déficit em relação à carga necessária para alimentar o teclado.

De modo geral para ter-se uma geração piezoelétrica como uma fonte para a Colheita

de Energia viável, seria necessária uma melhor investigação e entendimento de cada aplicação e sua forma de obtenção, devido a sua complexidade.

Por fim pode-se inferir que o estudo foi esclarecedor, mas os objetivos de aplicação não foram totalmente alcançados, por motivos de limitação em algumas esferas, mas que podem ser ultrapassadas em trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

- CASIMIRO, F., GASPAR, P. D. E GONÇALVES, L. C.. **Aplicação Do Princípio Piezoelétrico No Desenvolvimento De Pavimentos Para Aproveitamento Energético**. Universidade da Beira Interior, Portugal, 2009.
- CAVALCANTE, LUCIANO FONTES. **Capacímetro Digital**. Slideplayer, 2019. Disponível em <<https://slideplayer.com.br/slide/1256211/>>. Acesso em: 01/11/2019.
- CIPELLI, ANTONIO MARCO. **Teoria E Desenvolvimento De Projetos De Circuitos Eletrônicos** / Antonio Marco V. Cipelli, Otávio.
- COLLE, SERGIO. **Lições De Termodinâmica Clássica: Volume II – Primeira Lei Da Termodinâmica**. Sergio Colle. 1 ed. 2018.
- CONÇALVEZ, T.R.S.. **Colheita Piezoelétrica De Energia**. Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- IKEDA, T.. **Fundamentals of Piezoelectricity**. Oxford-Inglaterra: Oxford University Press, 1996.
- LIMA, W.B.. **Transdutores de Deformação a Base de Sensores Piezoelétricos**. Universidade Federal Fluminense. Niterói (2013).
- KASAP, S.; CAPPER. **Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials**. Springer US, 2007.
- FERREIRA, L.F.S.S.. **Sistema de Geração de Energia Via Sensores Piezoelétricos**. - Brasília : UniCEUB, 2015.
- MARKUS, Otávio. **Ensino Modular: Sistemas Analógicos – Circuitos com Diodos e Transistores** / Otávio Markus – 8 ed. São Paula: Érica, 2008.
- NEWARK. **Element 14. Multicomp ABT-441-RC Piezo Element, 27mm, 4200Hz**. Disponível em: < <http://www.newark.com/multicomp/abt-441-rc/piezo-element-27mm-4200hz/dp/33P6318> > Acesso em: 7 out. 2019.
- NILSSON, JAMES W.. **Circuitos Elétricos**. 8 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- OLIVEIRA, S. D. A. **Os Materiais Inteligentes E Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- ROCHA J.G.; GONÇALVES L. M.; ROCHA.; SILVA M. P.; LANCEROMÉNDEZ. **Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010.
- UNESP/Bauru. **Associação de Fontes**, 2019 Disponível em: <<http://www2.fc.unesp.br/experimentosdefisica/ele08.htm>>. Acesso em: 01/11/2019.